

УДК 631.41:631.415.12:631.81:633.63(470.32)

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО И УРОЖАЙНОСТИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В ЦЧР

© 2021 г. О. А. Минакова^{1,*}, Л. В. Александрова¹, Т. Н. Подвигина¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86, Россия*

**E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.

После доработки 31.08.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

Изменение физико-химических свойств почвы при применении различных доз минеральных удобрений в сочетании с навозом 25–50 т/га выражалось в повышении относительно варианта без удобрений гидролитической кислотности, содержания обменного Mg^{2+} и незначительном снижении степени насыщенности основаниями, а также изменении величины pH_{KCl} . Наибольшую буферность почвы в области слабокислых величин обеспечивало применение N45P45K45 + навоз 25 т/га, сильнокислых – N45P45K45 + навоз 50 т/га. Для содержания гумуса и подвижных форм NPK в почве не выявлено сильной зависимости от величины показателей состояния почвенного поглощающего комплекса. Высокие дозы минеральных удобрений в сочетании с навозом 25–50 т/га обеспечивали максимальную продуктивность сахарной свеклы, почвенная кислотность не лимитировала ее урожайность.

Ключевые слова: удобрения, навоз, физико-химические свойства, элементы питания, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188121020095

ВВЕДЕНИЕ

Сахарная свекла – высокопродуктивная культура, широко возделываемая в Российской Федерации. По своим биологическим особенностям она требовательна к реакции почвенной среды, оптимальная реакция почвенного раствора для нее – 7.0 ед. pH, допустимая – 6.0–8.0 ед., более высокие показатели наиболее благоприятны для почв с высоким содержанием илстых частиц, более низкие – для песчаных легких почв [1, 2]. Основные отрицательные последствия повышенной кислотности: снижение доступности основных элементов питания (особенно P_2O_5), кальция и микроэлементов, изменение состава микробного ценоза почвы [2, 3].

В настоящее время отмечено повсеместное подкисление пахотных земель. В Российской Федерации кислые почвы ($pH_{KCl} < 5.5$) занимают 34.8 млн га, в лесостепной зоне кислые почвы составляют 49.8% [4–7]. В ЦЧР доля кислых почв равна 48.5% [8]. Масштабное подкисление пахотных почв отмечается и для черноземов [9–11].

Физиологическая кислотность высоких доз минеральных удобрений [2, 12], выпадение кис-

лотных дождей ($pH = 3.0–4.0$) [13], низкий уровень внесения органических удобрений (в 2019 г. в РФ навозом удобряли только 9.4% пашни, под сахарную свеклу вносили 2.2 т/га) [14], ризодепозиты сахарной свеклы (корневые экссудаты, слизи, ферменты, а также корневой опад) изменяют кислотность почв [15, 16].

Высокие урожаи сахарной свеклы обеспечиваются внесением значительных доз удобрений, т.к. культура требовательна к уровню обеспеченности элементами питания. Научно рекомендованными дозами в ЦЧР являются N90–150P120–150K90–150 [17], уровень применения минеральных удобрений на сахарной свекле в РФ достаточно высок (в отличие от большинства сельскохозяйственных культур). Например, в 2018 г. применяли 305 кг д.в./га посевов сахарной свеклы [18], из них 43.6% составляли азотные удобрения [19]. В условиях стационарных опытов доказано, что длительное применение повышенных доз минеральных удобрений изменяло физико-химические свойства почвы [20–23]. Внесение органических удобрений, известкование, применение научно обоснованных доз удобрений сдерживают нарастание

Таблица 1. Урожайность сахарной свеклы в паровом звене в 9-й ротации севооборота (2009–2017 гг.), т/га

Без удобрений	N45P45K45 + + навоз 25 т/га	N90P90K90 + + навоз 25 т/га	N135P135K135 + навоз 25 т/га	
26.3	37.9	37.0	40.3	
N45P45K45 + + навоз 50 т/га	N120P120K120 + + навоз 50 т/га	N190P190K190	<i>HCP</i> ₀₅ фактора <i>A</i>	<i>HCP</i> ₀₅ фактора <i>B</i>
39.4	40.6	40.0	2.00	5.67

Примечание. Фактор *A* – навоз КРС, фактор *B* – минеральные удобрения. То же в табл. 2, 3.

кислотности, а зачастую и оптимизируют ее [5, 20, 24].

Цель работы – изучение изменения кислотных свойств чернозема выщелоченного лесостепной зоны ЦЧР в стационарном опыте, заложенном в 1936 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в стационарном опыте по изучению влияния применения удобрений на почвенное плодородие и урожайность культур в севообороте с сахарной свеклой (год закладки – 1936 г., продолжается по настоящее время). Годы проведения исследования – 2009–2017 гг. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый на тяжелом карбонатном суглинке. Опыт заложен в трехкратной повторности в 9-польном зернопаропропашном севообороте со следующим чередованием культур: черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень с подсевом клевера – клевер 1-го года использования – озимая пшеница – сахарная свекла – травосмесь горох + овес – овес. Изучали почву и продукцию в следующих вариантах опыта: контроль (без удобрений), N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N190P190K190. Удобрения вносили только под сахарную свеклу с осени под зяблевую вспашку, навоз КРС – в черном пару. Минеральные удобрения применяли в основном в виде НАФК. Агротехника возделывания культур была общепринятой для зоны. В почвенных образцах определяли следующие показатели: pH_{KCl} (ГОСТ 26483-85), содержание гумуса по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), содержание обменного Ca^{2+} (ГОСТ 26487-85), обменного Mg^{2+} (ГОСТ 26428-85), величину гидролитической кислотности по Каппену (ГОСТ 26212-91), степень насыщенности основаниями – расчетным методом, содержание N-NO₃ (ГОСТ 26951-86),

P₂O₅ и K₂O (ГОСТ 26204-91). В посевах сахарной свеклы проводили учет урожайности весовым методом (учетных делянок) с пересчетом по методике ВНИС [25]. Статистическую обработку данных и корреляционный анализ производили по [26].

Установлено, что черноземы выщелоченные во всех изученных вариантах полевого опыта имели благоприятные основные показатели плодородия (содержание гумуса, физические свойства почвы) [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность корнеплодов сахарной свеклы в паровом звене в 9-й ротации севооборота после более чем 80 лет применения удобрений была наиболее высокой в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га и N190P190K190 (39.4–40.6 т/га) (табл. 1). Эти системы удобрения повышали урожайность культуры на 49.8–54.4% (на 13.7–14.3 т/га), т.е. обеспечивали более интенсивное выделение в почву ионов H⁺ относительно контроля, где урожайность составила 26.3 т/га. Низкие прибавки были отмечены в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га (11.6 и 10.7 т/га соответственно), увеличение относительно контроля – на 40.7–44.1%, что возможно, было связано с недостатком доступных форм НРК для такой высокопродуктивной культуры как сахарная свекла.

Оценивая действие удобрений на содержание НРК в почве, следует отметить, что более всего оно проявилось для содержания N-NO₃ (увеличение в удобренных вариантах относительно контроля в слое 0–20 см составило 20.4–98.6%, в слое 20–40 см – 26.8–103%) (табл. 2), несколько меньше – P₂O₅ (22.6–77.3% и 18.1–74.3% соответственно), менее всего – K₂O (11.1–28.6% и 18.9–35.6% соответственно). Наиболее высокое содержание N-NO₃ было отмечено в варианте N190P190K190, при этом внесение минеральных

удобрений совместно с навозом 50 т/га не обеспечивало его значительного повышения. Максимальное содержание P_2O_5 обеспечивало применение $N135P135K135$ + навоз 25 т/га, а системы $N90P90K90$ + навоз 25 т/га навоза, $N120P120K120$ + навоз 50 т/га, $N45P45K45$ + навоз 50 т/га навоза и $N190P190K190$ также способствовали значительному росту содержания данного элемента относительно контроля. Наибольшее содержание K_2O отмечено при применении $N90P90K90$ + навоз 25 т/га и $N45P45K45$ + навоз 25 т/га, внесение навоза 50 т/га не способствовало повышению содержания элемента относительно минеральной системы ($N190P190K190$).

Длительно применяемые удобрения повышали градицию обеспеченности $N-NO_3$ с низкой в контроле до средней и повышенной в вариантах с удобрениями, P_2O_5 и K_2O – с повышенной до высокой (кроме вариантов $N45P45K45$ + навоз 25 т/га для P_2O_5 и $N135P135K135$ + навоз 25 т/га, $N45P45K45$ + навоз 50 т/га и $N190P190K190$ для K_2O). Повышение содержания NPK обеспечивало увеличение урожайности сахарной свеклы (как и других сельскохозяйственных культур в подобных исследованиях [29]) и, соответственно, способствовало дополнительному выделению ионов H^+ в почву, проявившегося вследствие обмена на ионы K^+ [28].

Изученный чернозем характеризовался относительно невысоким содержанием гумуса (в слое 0–20 см – от 4.83 до 5.27%, в слое 20–40 см – 5.00–5.65%, в целинном аналоге – 6.10 и 5.60% соответственно) (табл. 3). Снижение гумусности в контроле относительно целинного участка (расположенного в непосредственной близости от опыта) составило 1.27 абс.% в слое 0–20 см и 0.60 абс.% в слое 20–40 см, в удобренных вариантах – 0.83–1.40 и 0.24–0.77% соответственно, наименьшее снижение в слое 0–20 см было отмечено в вариантах $N45P45K45$ + навоз 50 т/га и $N120P120K120$ + навоз 50 т/га вследствие поступления органического вещества повышенных доз навоза (50 т/га). Системы удобрения с навозом 25 и 50 т/га не обеспечивали повышение содержания гумуса относительно $N190P190K190$ в слое 0–20 см, но в слое 20–40 см было отмечено достоверное увеличение его содержания на 0.52% при внесении $N135P135K135$ + навоз 25 т/га и на 0.23% – при применении $N45P45K45$ + навоз 50 т/га. В целом применение удобрений сдерживало уменьшение содержания гумуса как за счет поступления органического вещества с навозом, так и дополнительного объема растительных остатков, образуемого прибавкой урожая культур

Таблица 2. Содержание NPK в почве стационарного опыта, 9-я ротация

Глубина, см	Содержание, мг/кг почвы		
	$N-NO_3^-$	P_2O_5	K_2O
Контроль			
0–20	14.2	106	153
20–40	13.8	105	132
$N45P45K45$ + навоз 25 т/га			
0–20	17.1	130	197
20–40	17.5	124	177
$N90P90K90$ + навоз 25 т/га			
0–20	25.2	180	191
20–40	25.3	163	179
$N135P135K135$ + навоз 25 т/га			
0–20	24.8	188	141
20–40	23.9	183	169
$N45P45K45$ + навоз 50 т/га			
0–20	22.8	162	170
20–40	23.5	144	176
$N120P120K120$ + навоз 50 т/га			
0–20	24.4	152	181
20–40	27.6	148	158
$N190P190K190$			
0–20	28.2	157	172
20–40	28.0	145	157
HCP_{05} фактора А			
0–20	3.5	20	–
20–40	3.1	–	14
HCP_{05} фактора Б			
0–20	4.2	16	11
20–40	7.6	14	5.5

при внесении минеральных удобрений. Значительное снижение содержания гумуса в верхнем слое почвы было связано с его распадом в аэробных условиях, складывавшихся при постоянной отвальной вспашке и обработке междурядий культуры.

Сопоставление содержания гумуса в почве вариантов с удобрениями и в контроле выявило, что его повышение в слое 0–20 см составило 0.19–0.44%, в слое 20–40 см – 0.13–0.65%: в верхнем

Таблица 3. Физико-химические свойства и содержание гумуса в почве стационарного опыта

Глубина, см	Гумус, %	H_T , ммоль/100 г почвы	pH_{KCl}		Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	V, %
			май (1-й период)	июль (2-й период)				
Без удобрений								
0–20	4.83	2.98	5.42	5.32	20.7	3.57	24.3	89
20–40	5.00	2.71	5.36	5.30	19.9	3.60	23.5	90
N45P45K45 + навоз 25 т/га								
0–20	4.70	3.41	5.32	5.30	20.4	3.83	24.2	88
20–40	4.87	3.68	5.37	5.35	21.0	3.97	25.0	87
N90P90K90 + навоз 25 т/га								
0–20	5.02	2.63	5.31	5.24	21.2	3.57	24.8	87
20–40	5.17	3.33	5.40	5.16	21.4	3.40	24.8	88
N135P135K135 + навоз 25 т/га								
0–20	5.20	3.41	5.37	5.00	21.3	3.83	25.1	88
20–40	5.65	3.50	5.30	5.13	20.6	3.87	24.5	87
N45P45K45 + навоз 50 т/га								
0–20	5.27	2.89	5.42	5.32	21.0	3.88	24.9	90
20–40	5.36	2.89	5.33	5.37	21.6	3.60	25.2	91
N120P120K120 + навоз 50 т/га								
0–20	5.22	3.59	5.23	5.22	21.2	4.05	25.2	87
20–40	5.17	3.24	5.31	5.32	20.6	3.75	24.3	88
N190P190K190								
0–20	5.17	3.94	5.18	5.01	20.7	3.82	24.5	86
20–40	5.13	3.76	5.22	5.04	20.0	3.75	23.7	86
HCP_{05} фактора А								
0–20	0.08	0.20	0.05	–	–	0.04	–	–
20–40	–	0.29	–	–	–	–	–	1.0
HCP_{05} фактора Б								
0–20	0.06	0.60	0.03	–	–	0.06	0.3	2.2
20–40	0.16	0.55	–	–	–	–	0.8	0.8

Примечание: фактор А – навоз КРС, фактор Б – минеральные удобрения, ЕКО – емкость катионного обмена, V – степень насыщенности основаниями

слое наиболее значительно влияло внесение N45P45K45 + навоз 50 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N190P190K190, в нижележащем – N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. В относительном выражении это составило 3.93–9.11% в слое 0–20 см и 2.60–13.0% в слое 20–40 см.

Гидролитическая кислотность почвы вариантов с внесением удобрений в слое 0–20 см составила 2.63–3.94 ммоль/100 г почвы в слое 0–20 см

и 2.71–3.76 ммоль/100 г почвы в слое 20–40 см (в контроле – 2.98 и 2.71 ммоль/100 г почвы соответственно). Во всех вариантах с удобрениями она возрастала относительно контроля как в верхнем, так и нижнем слое, наибольшее увеличение (на 0.61–0.96 ммоль/100 г почвы) было отмечено при применении N190P190K190 и N120P120K120 + навоз 50 т/га в слое 0–20 см и на 0.97–1.05 ммоль/100 г почвы при N45P45K45 + навоз 25 т/га и N190P190K190 в слое 20–40 см. Наиболее

низкая H_r в слое 0–20 см (2.63 и 2.89 ммоль/100 г почвы) отмечена в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га, наиболее высокая (3.41–3.94 ммоль/100 г почвы) – в вариантах N190P190K190, N135P135K135 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га, что, очевидно, свидетельствовало об определяющем влиянии минеральных удобрений на повышение этого показателя и подтверждено данными дисперсионного анализа. Системы с навозом в дозе 25 т/га уменьшали данный показатель относительно системы только с минеральными удобрениями на 0.53–1.31 ммоль/100 г почвы в слое 0–20 см, на 0.26–0.43 – в слое 20–40 см, а системы с навозом в дозе 50 т/га – на 0.35–1.05 и 0.52–0.87 ммоль/100 г почвы соответственно, возможно, вследствие подщелачивающего действия навоза, что подтверждено данными дисперсионного анализа (HCP_{05} навоза = 0.05, HCP_{05} минеральных удобрений = 0.03).

Изучение динамики pH_{KCl} почвы под сахарной свеклой в начале вегетации выявило, что данный показатель менялся в слое 0–20 см от 5.18 до 5.42, в слое 20–40 см – от 5.22 до 5.40, в почве вариантов с применением удобрений отмечено его снижение на 0.05–0.24 в слое 0–20 см и 0.04–0.18 в слое 20–40 см относительно контроля. Наибольшие показатели pH_{KCl} были отмечены в слое 0–20 см – в контроле и в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га, в слое 20–40 см – также и при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га, наименьшие – при применении N190P190K190, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га соответственно. Разница в величине pH_{KCl} систем с применением навоза 50 т/га и систем с навозом 25 т/га составила 0.04–0.14 в слое 0–20 см и 0.03–0.09 в слое 20–40 см, системы N190P190K190 и вариантов с навозом 25 т/га – 0.13–0.19 и 0.08–0.18 соответственно. Наибольшее различие показателей pH_{KCl} в слое 0–20 см было отмечено между вариантами с применением навоза 50 т/га и N190P190K190 – 0.05–0.24, что свидетельствовало о наибольшем подкисляющем влиянии дозы N190P190K190 относительно варианта с высокой дозой навоза КРС, имевшего щелочную реакцию. Разница в величинах pH_{KCl} вариантов с применением навоза 50 т/га и N190P190K190 в слое 20–40 см была несколько меньше и составила 0.09–0.11.

Величина pH_{KCl} в почве под сахарной свеклой в период активного роста (июль) менялась от 5.00 до 5.32 в слое 0–20 см и от 5.04 до 5.37 в слое 20–40 см, применение минеральных удобрений и навоза вызвало тенденцию к снижению ее относительно контроля на 0.02–0.32 и 0.14–0.34 соответственно.

Наибольшие величины pH_{KCl} были отмечены в обоих слоях при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, а в слое 0–20 см – также и в контроле. Наиболее низкими величинами pH_{KCl} были при применении N190P190K190 и N135P135K135 + навоз 25 т/га как в слое 0–20, так и 20–40 см, в слое 0–20 см также в варианте N120P120K120 + навоз 50 т/га, в слое 20–40 см – в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га. В этот период отмечена тенденция к увеличению разницы показателей pH_{KCl} между вариантом N190P190K190 и вариантами применения навоза 50 т/га, что составило 0.21–0.31 ед. в слое 0–20 см и 0.28–0.32 ед. – в слое 20–40 см, относительно вариантов с навозом 25 т/га отмечена также тенденция к снижению показателей pH на 0.23–0.29 и 0.09–0.31 ед. соответственно. В слое 20–40 см при действии N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га выявили тенденцию к снижению pH_{KCl} на 0.16–0.19 ед. относительно варианта N120P120K120 + навоз 50 т/га.

Сезонная динамика показателя pH_{KCl} показала снижение на 0.02–0.37 ед. в слое 0–20 см и на 0.02–0.24 ед. в слое 20–40 см, что видимо было следствием поглощения сахарной свеклой кальция и других ионов щелочной природы из почвы и удобрений (или проявлением физиологической кислотности удобрений [2, 11]), а также увеличения корневых выделений культуры, имеющих кислую природу [16], и вследствие поглощения культурой K^+ путем обмена его ионов на ионы H^+ , что также подкисляло почву [29]. С увеличением доз минеральных удобрений как на навозном, так и безнавозном фонах, выявлено повышение разницы между показателями pH_{KCl} в мае и июле, в слое 0–20 см оно проявилось в наибольшей степени, что было связано с большим влиянием корневой системы культуры и ее агротехники, заключавшейся в многократных рыхлениях верхнего слоя и создании постоянных аэробных условий.

Содержание обменного Ca^{2+} в почве опытного участка как в слое 0–20 см, так и 20–40 см, имело тенденцию к повышению, но достоверно не изменялось. В вариантах применения N90P90K90 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га в слое 0–20 см и N90P90K90 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га в слое 20–40 см обнаружили наибольшее содержание данного элемента.

Влияние длительно вносимых удобрений на увеличение содержания обменного Mg^{2+} (на 0.26–4.80 ммоль/100 г почвы или на 7.00–13.4% относительно контроля) достоверно проявилось

Таблица 4. Буферность почвы стационарного опыта

Добавлено 0.1 щелочи/кислоты, мл	Контроль	N90P90K90 + + навоз 25 т/га	N135P135K135 + + навоз 25 т/га	N45P45K45 + + навоз 50 т/га	N190P190K190	Песок
10	9.07	9.62	9.02	9.08	8.75	11.2
8	8.32	8.58	8.70	9.20	8.99	11.3
6	8.22	8.35	8.32	8.74	8.05	11.3
4	7.60	8.08	7.64	7.63	7.26	11.0
2	6.84	7.64	7.17	6.96	6.75	10.3
0	6.92	6.81	6.22	6.67	6.18	8.3
2	5.70	6.00	5.60	5.50	5.40	2.7
4	4.53	4.73	4.59	4.40	4.02	2.6
6	3.84	3.91	4.11	3.85	3.57	2.1
8	3.39	3.53	3.53	3.80	3.20	1.8
10	2.99	3.13	3.06	2.77	2.84	1.7

в слое 0–20 см в наибольшей степени в вариантах N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, минеральные удобрения в большей степени способствовали изменению данного показателя. В слое 20–40 см не было отмечено достоверных изменений, выявлена только тенденция к увеличению содержания этой формы элемента в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Было показано достоверное влияние минеральных удобрений на величину содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве стационарного опыта: в слое 0–20 см увеличение на 0.5–0.9 ммоль/100 г почвы отмечено в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, в других вариантах этот показатель оставался на уровне контроля, не проявляя тенденцию к снижению. В слое 20–40 см также было выявлено увеличение этого показателя на 0.8–1.7 ммоль/100 г почвы, в наибольшей степени в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га, а система N190P190K190 не способствовала изменению содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$.

В слое 0–20 см отмечена высокая – 86–90% – степень насыщенности основаниями, что не требовало известкования почвы. В слое 0–20 см было отмечено снижение степени насыщенности основаниями (V) на 2–3%, минеральные удобрения в составе систем N90P90K90 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, а также минеральная система N190P190K190 оказывали влияние

на этот показатель. Данный показатель достоверно снизился относительно контроля в слое 20–40 см на 2–4%. При внесении N190P190K190 разница между этими вариантами была максимальной и составила 4%, а минимальной она была между вариантами с применением навоза 50 т/га и контролем (1%). Под влиянием N45P45K45 + навоз 50 т/га отмечена тенденция к повышению V как в слое 0–20, так и в слое 20–40 см почвы.

Сравнение буферности почвы разных вариантов выявило, что при добавлении щелочи разной концентрации наиболее низкий рН почвенной вытяжки отмечен в варианте N190P190K190, что свидетельствовало о дополнительном выделении ионов кислой природы в раствор из почвенного поглощающего комплекса. Наиболее высокий рН в области щелочных величин был отмечен при действии систем удобрения N45P45K45 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га, что свидетельствовало о самом малом выделении подобных ионов из почвы этих вариантов. Разница в кислотности почвы разных вариантов в щелочной области составила 0.69–0.88, ее сокращение отмечено при добавлении 4 и 6 мл щелочи (табл. 4).

При добавлении кислоты в почвенную вытяжку разница в величине рН в вариантах опыта составила 0.36–0.71, при приливании большего количества кислоты разница сокращалась, меньшего – расширялась. Наиболее высокий рН был отмечен в основном в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, и в меньшей степени – в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + на-

Таблица 5. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) параметров физико-химического состояния и содержания гумуса (слой 0–20 см) для почвы стационарного опыта

Показатель физико-химического состояния почв	Уравнение (коэффициент парной корреляции)	Показатель физико-химического состояния почв	Уравнение (коэффициент парной корреляции)
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	$y = 1.486x + 17.1 (0.833)$	V	–
Ca ²⁺	$y = 1.111x + 15.3 (0.723)$	pH _{KCl} в 1-й срок отбора	–
Mg ²⁺	$y = 0.401x + 1.765(0.510)$	pH _{KCl} во 2-й срок отбора	$y = -0.300x + 6.72 (0.469)$
ЕКО	–	H_T	–

Примечание. В уравнениях Ca²⁺ + Mg²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, pH_{KCl} соответствуют переменной y , содержание гумуса – переменной x , прочерк – связь отсутствует.

Таблица 6. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) pH_{KCl} и содержания NPK в почве стационарного опыта

Содержание основных элементов питания	Уравнение (коэффициент парной корреляции), слой 0–20 см	Уравнение (коэффициент парной корреляции), слой 20–40 см
N-NO ₃	$y = -2.049x + 13.1 (0.420)$	$y = -3.78x + 22.3 (0.483)$
P ₂ O ₅	–	–
K ₂ O	$y = -13.5x + 89.3 (0.580)$	–

Примечание. В уравнениях N-NO₃, P₂O₅, K₂O соответствуют переменной y , pH_{KCl} – переменной x , прочерк – связь отсутствует.

Таблица 7. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) параметров pH_{KCl}, H_T и урожайности сахарной свеклы в 9-й ротации

Слой	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует H_T	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует pH _{KCl} , 1-й срок	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует pH _{KCl} , 2-й срок
0–20 см	$y = 4.85x + 21.5 (0.434)$	$y = -28.1x + 187 (-0.509)$	$y = -17.7x + 129 (-0.489)$
20–40 см	$y = 8.17x + 10.4 (0.632)$	$y = -37.5x + 277 (-0.437)$	–

Примечание. y – урожайность корнеплодов сахарной свеклы, т/га.

воз 25 т/га, наиболее низкий – в варианте N190P190K190.

В ходе исследования выявлена сильная связь ($r \sim 0.4–0.8$) содержания суммы Ca²⁺ + Mg²⁺, а также содержания Ca²⁺ с содержанием гумуса в слое 0–20 см (табл. 5). Зависимость этих показателей была прямой, наиболее тесной она была для суммы Ca²⁺ + Mg²⁺. Зависимость величины pH_{KCl} во 2-й срок отбора (июль), а также содержания обменного Mg²⁺ с содержанием гумуса была средней степени, прямая – для Mg²⁺ и обратная – для

pH_{KCl}, в первом случае она была более выражена. Эти зависимости проявились только в слое 0–20 см, в слое 20–40 см их не выявили. Такие показатели, как pH_{KCl} в начале вегетации, емкость катионного обмена и сумма обменных оснований не зависели от содержания гумуса ни в слое 0–20, ни в слое 20–40 см.

В ходе исследования выявлена связь ($r \sim 0.4–0.6$) содержания основных элементов питания (N-NO₃ – в обоих слоях и K₂O – в слое 0–20 см) с величиной обменной кислотности (табл. 6). Зави-

симось была отрицательная, с повышением кислотности снижалось содержание НРК, в наибольшей степени — K_2O в слое 0–20 см, в наименьшей — $N-NO_3$ в том же слое. Обменная кислотность не оказывала влияние на содержание подвижных форм P_2O_5 как в слое 0–20, так и 20–40 см, а K_2O — только в слое 20–40 см.

Отрицательная зависимость содержания НРК и pH_{KCl} в опыте, при том, что в литературе имеются противоположные данные [2, 4], объясняется изменением кислотности в небольшом интервале, в котором НРК почвы в значительной степени доступны растениям, тогда как с ростом доз удобрений содержание НРК изменялось гораздо более значительно. Установлено, что урожайность корнеплодов сахарной свеклы имела отрицательную зависимость от pH_{KCl} и положительную — от гидролитической кислотности. Наиболее тесная связь урожайности отмечена с величиной H_T в слое почвы 20–40 см, наименее — H_T в слое 0–20 см (табл. 7). В целом урожайность в средней степени зависела от pH_{KCl} и H_T , что свидетельствовало о том, что обменная и потенциальная кислотность в незначительной степени определяли уровень урожайности основной культуры севооборота, возможно, вследствие невысоких их величин, не оказывавших негативного влияния на развитие сахарной свеклы.

ВЫВОДЫ

1. Внесение минеральных удобрений совместно с навозом 50 т/га в пару, а также $N190P190K190$ и $N135P135K135$ + навоз 25 т/га обеспечивало наиболее высокую урожайность корнеплодов сахарной свеклы и способствовало дополнительному выделению H^+ в почву корнями растений. Различные формы почвенной кислотности не оказывали значительного влияния на величину урожая культуры.

2. Удобрения в большей степени влияли на содержание НРК в почве, чем на кислотные свойства почвы. Более всего действие удобрений проявилось на содержании $N-NO_3$ (увеличение в удобренных вариантах относительно контроля в слое 0–20 см составило 20.4–98.6, в слое 20–40 см — 26.8–103%), несколько меньше — P_2O_5 (22.6–77.3% и 18.1–74.3% соответственно), менее всего — K_2O (11.1–28.6% и 18.9–35.6% соответственно).

3. Длительное применение удобрений изменяло физико-химические свойства чернозема выщелоченного относительно варианта без удобрений: повышало гидролитическую кислотность в слое 0–20 см на 0.61–0.96 ммоль/100 г почвы, в

слое 20–40 см — на 0.97–1.05 ммоль/100 г почвы, содержание обменного Mg^{2+} в слое 0–20 см — на 0.26–4.80 ммоль/100 г почвы, сумма Ca^{2+} и Mg^{2+} в слоях увеличивалась на 0.5–0.9 и 0.8–1.7 ммоль/100 г почвы соответственно, но снижало степень насыщенности основаниями в слое 0–20 см на 2–3 и в слое 20–40 см — на 2–4%, pH_{KCl} в начале вегетации — на 0.05–0.24 ед. в слое 0–20 см.

4. Удобрения оказывали наибольшее воздействие на величину pH_{KCl} в слое 0–20 см в начальный период развития культуры, на этот показатель в большей степени влияло внесение навоза в пару, чем минеральных удобрений под сахарную свеклу. В течение вегетации отмечено снижение величины pH_{KCl} на 0.10–0.37 ед., как в слое 0–20 (в меньшей степени), так и 20–40 см (в большей степени) вследствие увеличения корневых выделений культуры (при внесении удобрений динамика показателя была более выражена вследствие увеличения обменного поглощения ионов K^+ и H^+).

5. Оптимальные показатели физико-химических свойств чернозема выщелоченного обеспечивала применяемая в севообороте более 80 лет система $N45P45K45$ + навоз 50 т/га.

6. Оценка буферности чернозема выщелоченного позволила установить, что наибольшее содержание оснований, препятствующих подкислению, отмечено в почве варианта $N90P90K90$ + навоз 25 т/га, в области сильнокислых величин — также и при действии систем $N45P45K45$ + навоз 50 т/га и $N135P135K135$ + навоз 25 т/га.

7. Содержание гумуса в почве удобренных вариантов увеличивалось относительно контроля и проявляло значительную зависимость от содержания обменного кальция, а также суммы Ca^{2+} и Mg^{2+} .

8. Не отмечено тесной математической связи величины pH_{KCl} и содержания НРК в почве вследствие небольшой степени снижения кислотности и значительного повышения содержания элементов питания. Изменения кислотности при внесении удобрений происходили в области слабокислых величин, при которых НРК почвы были наиболее подвижны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шнаар Д., Сушков М.* Выращивание сахарной свеклы. М.: ИК “Родник”, 1996. 144 с.
2. *Минеев В.Г.* Агрохимия: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, Колос, 2004. 720 с.
3. *Девятова Т.А.* Ферментативная активность чернозема выщелоченного при длительном системати-

- ческом применении удобрений // *Агрохимия*. 2006. № 1. С. 12–15.
4. Агрохимическая характеристика пахотных почв природных сельскохозяйственных зон и провинций России (по данным агрохимического обследования). Бюл. Географ. сети опытов с удобрениями. Вып. 9. М.: ВНИИА, 2010. 33 с.
 5. Сычев В.Г. Инновационные аспекты совершенствования агрохимического обслуживания сельскохозяйственного производства // *Инновационно-технологические основы развития земледелия. Сб. докл. Всерос. научн.-практ. конф. Курск: ВНИИЗи ЗПЭ, 2006. С. 15–19.*
 6. Сычев В.Г., Кузнецов А.В., Павлихина А.В., Лобас Н.В. Содержание гумуса, подвижного фосфора, обменного калия и степень кислотности пахотных почв Российской Федерации // *Плодородие*. 2008. № 3 (42). С. 1–3.
 7. Шильников И.А., Аканова Н.И. Вопросы известкования почв в современных условиях // *Плодородие*. 2011. № 3. С. 22–24.
 8. Сычев В.Г., Аристархов А.И., Державин Л.М. Плодородие почв сельскохозяйственных земель и эффективность применения удобрений на черноземах центральной России // *Черноземы центральной России: генезис, география, эволюция. Матлы Международ. конф., посвящ. 100-летию П.Г. Адерихина*. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. С. 501–506.
 9. Зезюков Н.И., Дедов А.В., Девятова Т.А. Снижение почвенной кислотности черноземных почв // *Проблемы экологии в сельском хозяйстве. Тез. докл. научн. конф. Пенза: Приволж. дом научн.-техн. пропаганды, 1993. С. 74–75.*
 10. Макеева Т.Ф., Наконечный А.Г., Казьмин В.М. Мониторинг уровня кислотности в пахотных почвах Орловской области // *Rus. Agricult. Sci. Rev.* 2015. Т. 6. № 6–1. С. 166–172.
 11. Мацнев И.Н., Арзыбов Н.А. Изменение уровня гумусированности и кислотности почв Тамбовской области // *Вестн. МичуринскГАУ*. 2006. № 1. С. 79–81.
 12. Макаров В.И. К физиологической кислотности азотных удобрений // *Вестн. АлтайГАУ*. 2013. № 8 (106). С. 027–030.
 13. Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почв. Пер. с румынского. М.: Агропромиздат, 1986. 220 с.
 14. Россия в цифрах. 2019: Крат. стат. сборник. М.: Росстат, 2019. 549 с.
 15. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Академия, 2004. 248 с.
 16. Стахурлова Л.Д., Свистова И.Д., Щеглов Д.И. Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах // *Почвоведение*. 2007. № 6. С. 769–774.
 17. Система ведения агропромышленного производства Воронежской области до 2010 года / Под ред. Хицкова И.Ф. Воронеж: Центр духовного возрождения Черноземного края, 2005. 464 с.
 18. Рынок минеральных удобрений – 2019 год. [Электр. ресурс] // *dcenter.hse.ru* URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2019/12/26/1524652323/Рынок%20минеральных%20удобрений.2019.pdf>. (дата обращения: 29.02.2019).
 19. Основные направления исследований по агрохимии азота в современном земледелии. Бюл. Географ. сети опытов с удобрениями. Вып. 6. М.: ВНИИА, 2009. 76 с.
 20. Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г. Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*. 2016. № 10. С. 1244–1250.
 21. Матвеева К.Н. Оптимизация повышенной кислотности почвы путем использования органических удобрений // *Актуал. научн. исслед-я в совр. мире*. 2016. № 8–1(16). С. 31–34.
 22. Жеряков Е.В. Регулирование физико-химических свойств черноземных почв // *Агрохимические приемы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтном земледелии. Мат-лы научн. конф. М.: ВНИИА, 2006. С. 33–35.*
 23. Ореховская А.А., Навольнева Е.В., Соловichenko В.Д., Ступаков А.Г., Ореховская Т.А., Куликова М.А., Беспаленко А.С. Влияние доз удобрений на кислотные свойства чернозема типичного // *Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия. Сб. докл. научн.-практ. конф. с международ. участием Курского отделения МОО “Общество почвоведов им. В.В. Докучаева”*. Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2016. С. 226–229.
 24. Волюнкин В.И., Копылов А.Н., Волюнкина О.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность культур и агрохимические свойства выщелоченного чернозема // *Плодородие*. № 6. 2014. С. 14–16.
 25. Барнштейн Л.А., Гизбуллин Н.Г. Методика исследований по сахарной свекле. Киев: ВНИС, 1986. 262 с.
 26. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
 27. Королев В.А., Громовик А.И., Боронтов О.К. Изменение основных показателей плодородия чернозема выщелоченного при разных способах основной обработки // *Почвоведение*. 2016. № 1. С. 107–114.
 28. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Влияние запасов минеральных форм азота на продуктивность севооборота // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 17–26.
 29. Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А. Изменение физико-химических свойств серых лесных почв Ополья при длительном применении удобрений // *Докл. РАСХН*. 2015. № 3. С. 34–38.

Change of Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem and Productivity of Grain-Beet Crop Rotation under Long-Term Application of Fertilizers in the Central Black-Earth Region

O. A. Minakova^{a,#}, L. V. Alexandrova^a, and T. N. Podvigina^a

^aA.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
VNIISS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia

[#]E-mail: olalmin2@rambler.ru

When using the different doses of mineral fertilizers in combination with manure 25–50 t/hectare, change of the soil physical and chemical characteristics was expressed as increase of hydrolytic acidity and exchange Mg^{2+} content, but decrease base saturation degree and pH_{KCl} in comparison with the variant without fertilizers. As for low acidity values, using N45P45K45 + manure 25 t/hectare, provided the greatest soil buffering. In terms of high acidity values, application of N45P45K45 + manure 50 t/hectare had the same effect. In general, humus soil state and NPK content did not show a strong dependence on values of soil absorbing complex state indices. High doses of mineral fertilizers in combination with manure 25–50 t/hectare ensured maximum productivity of sugar beet. Soil acidity did not limit its yield.

Key words: fertilizers, manure, physical and chemical characteristics, nutrient elements, yield.