

# ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМОВ ВЫЩЕЛОЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

**Стахурлова Л.Д.**, кандидат биологических наук  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»  
**Стулин А.Ф.**, кандидат сельскохозяйственных наук  
Воронежский филиал ФГБНУ ВНИИ кукурузы  
e-mail: stakhurlova@rambler.ru, opytnoe@vmail.ru

***Аннотация.** Проведены исследования в условиях стационарных полевых опытов, позволившие выявить экологическое состояние черноземов выщелоченных при систематическом внесении минеральных удобрений. Их длительное применение сдерживало процессы минерализации гумуса, но наметилась тенденция деградации почвенного поглощающего комплекса за счет снижения степени насыщенности почв основаниями. Показано, что минеральные удобрения не являются источником тяжелых металлов – Cr, Pb, Ni, As – их количество не превышало ПДК.*

***Ключевые слова:** стационарные опыты, черноземы выщелоченные, удобрения, гумус, сумма обменных оснований, кислотность, тяжелые металлы, монокультура, севооборот, кукуруза.*

**Введение.** Сохранение и воспроизводство плодородия почв является важнейшей задачей при решении проблемы продовольственной безопасности страны. Черноземы представляют собой эталонный образец устойчивого и длительно самовоспроизводимого плодородия. Однако оценка экологического качества показала приближение основных параметров к пороговому состоянию ускоренного падения их сельскохозяйственной продуктивности и санитарно-экологической буферности [7]. Сложившаяся ситуация требует информативного обеспечения текущего состояния черноземов, краткосрочного и долгосрочного прогнозов их развития, организации действенной системы комплексного агроэкологического мониторинга земель. Исследования, проведенные в условиях стационарных опытов, позволяют проследить эволюцию плодородия черноземов под воздействием естественных и особенно антропогенных факторов.

**Методика эксперимента.** Стационарные полевые опыты Воронежского филиала ФГБНУ «ВНИИ кукурузы» заложены в 1960 г. по восьмерной диагностической схеме Ж. Вилля, наложенной на десятипольный севооборот, развернутый на трех полях во времени (прошло 5 ротаций), и монокультуру кукурузы. Площадь каждого поля – 1,1 га. Минеральные удобрения: аммиачная селитра ( $N_{aa}$ ), гранулированный

двойной суперфосфат ( $P_{cr}$ ) и калийная соль ( $K_x$ ) вносятся ежегодно осенью, начиная с 1965 г., по 60 кг д.в. на 1 га. Расположение вариантов в повторениях – последовательное. Повторность – трехкратная. Посевная площадь делянок – 269,5 м<sup>2</sup> (4,9 x 55 м), учетная – не менее 100 м<sup>2</sup>. Чередование культур в севообороте: викоовсяная смесь на сено – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза на силос – озимая пшеница – кукуруза на зерно – викоовсяная смесь на сено – озимая пшеница – подсолнечник – ячмень. Кукуруза в монокультуре пространственно размещена на расстоянии 12 м от делянок севооборота, площадь между этими полями занимает бессменный чистый пар. Районированные гибриды кукурузы высевают согласно агротехническим требованиям, принятым в зоне. Урожай учитывают методом сплошного взвешивания. Географические координаты опыта: 51°36'480"СШ и 38°58'159"ВД.

Почва – чернозем выщелоченный среднемощный малогумусный тяжелосуглинистый на карбонатном суглинке. Согласно классификации 2004 г. – агрочернозем глинисто-иллювиальный [2]. Использовались следующие варианты: длительно парующая почва, монокультура и севооборот с кукурузой без удобрений, на фоне  $N_{60}P_{60}K_{60}$  и  $N_{120}P_{60}K_{60}$ . Экологическое состояние почв агроценозов сравнивали с естественным биоценозом (лесополоса). Всего – 8 вариантов.

Для исследования химических свойств почвы образцы отбирали с глубин 0–20 и 20–40 см в III декаде мая, согласно ГОСТ Р58595-2019. Базовые показатели плодородия почв оценивали по общепринятым методам. Валовые формы металлов определяли на приборе S8 TIGER.

**Обсуждение результатов.** При современной системе ведения сельского хозяйства удобрения являются одним из наиболее важных факторов, определяющих не только уровень и стабильность урожайности сельхозкультур, но и их качество при одновременном сохранении и расширенном воспроизводстве плодородия почв. Почвы района проведения исследований оцениваются как малогумусные. Длительное систематическое в течение 65 лет использование различных агротехнических приемов отразилось в первую очередь на химических свойствах почв (табл. 1). Наибольшие потери органического вещества отмечены под бессменным паром по сравнению с естественным биоценозом (лесополоса) и составили в абсолютных единицах 1,33 %. В вариантах без удобрений лучшие условия складываются на фоне севооборотного фактора, что

объясняется большим количеством поступающих растительных остатков в верхние слои почвы. Внесение полного минерального удобрения ( $N_{60}P_{60}K_{60}$ ) под кукурузу как в монокультуре, так и в севообороте сдерживает потери органического вещества по сравнению с парующей почвой в среднем на 14 %, по сравнению с неудобренными вариантами – в среднем на 6 %. Повышение дозы азотного компонента в 2 раза (вариант  $N_{120}P_{60}K_{60}$ ) увеличивает количество органического вещества на 19 % по сравнению с паром. Ранее было показано, что во всех изучаемых вариантах коэффициент гумификации ( $K_{гум}$ ), определяемый как соотношение показателей активности почвенных ферментов полифенолоксидазы и пероксидазы, составлял 1,1–1,8, в отличие от парующей почвы – < 1, что указывает на процессы деструкции молекул гумуса [5]. Нами выявлен низкий коэффициент природной изменчивости гумуса в черноземах выщелоченных. В среднем по вариантам опыта он составлял около 6 %, за исключением подпахотных горизонтов неудобренных почв. Таким образом, основной причиной потерь почвенного органического вещества является усиление минерализационных процессов в результате интенсивной распашки почв в отсутствие растительных остатков. Органическое вещество и состояние почвенного поглощающего комплекса (ППК) определяют степень устойчивости почв к неблагоприятным факторам среды. В условиях ненарушенного биоценоза сумма кальция и магния составляет около 39 ммоль/100 г почвы. В сравнении с музейными образцами за 65 лет с начала эксперимента этот показатель практически не изменился. Длительное парование способствует снижению суммы кальция и магния не только в пахотном, но и

в нижележащем слое, что легко объясняется отсутствием растительных остатков и активной минерализацией органического вещества. По сравнению с почвой лесополосы в слое 0–40 см количество обменных оснований сокращается на 12 %. Вносимые удобрения не оказали влияния на сумму обменных оснований, наметилась тенденция их снижения примерно на 6 %.

Реакция среды почвенного раствора изменялась от слабокислой до кислой. В верхнем 0–20 см слое в вариантах с систематическим внесением удобрений гидролитическая кислотность увеличилась в среднем на 1,5 ммоль/100 г почвы. Существенные изменения выявлены в вариантах  $N_{60}P_{60}K_{60}$  и  $N_{120}P_{60}K_{60}$  на фоне бессменного выращивания кукурузы. Таким образом, наметилась тенденция деградации почвенного поглощающего комплекса за счет снижения степени насыщенности почв основаниями (V).

Существует мнение о том, что длительное применение удобрений приводит к изменению химических свойств почвы за счет увеличения доли металлов. Наиболее загрязненными считают фосфорные удобрения. Так, двойной суперфосфат содержит до 15 мг/кг хрома, 32 мг/кг свинца, 0,5 мг/кг кадмия. Кроме того, фосфорные удобрения могут содержать другие токсичные элементы, такие как фтор, мышьяк, радионуклеиды. При использовании нитратных и сульфатных удобрений, а также мочевины в почву на 1 га попадает от 1 до 10 г мышьяка; с двойным суперфосфатом это количество может достигать 30–300 г [6].

По результатам наблюдений Г.В. Мотузовой (2007), на профильное распределение металлов в почвах оказывает значительное влияние органическое вещество, гидрооксиды железа и алюминия, которые образуют

пленки на глинистых частицах. Возникают многочисленные минеральные образования, по химическому составу представляющие собой гидрооксиды железа, карбонаты, сульфаты, реже фосфаты. Наименее растворимые в воде соединения с металлами образуют фосфат-ионы [3].

Настоящими исследованиями дана оценка степени накопления тяжелых металлов (Cr, Pb, Ni, As) в черноземах выщелоченных после длительного систематического внесения минеральных удобрений (табл. 2). Все соединения хрома (а.м. 51,9961), особенно в высокой степени окисления, сильно токсичны. Кларк хрома в земной коре – 92 мг/кг. ПДК с учетом фона – 100 мг/кг. По данным Н.А. Протасовой (2003), содержание Cr в гумусовом горизонте (A) черноземов слабо коррелирует с его количеством в почвообразующей породе ( $r = 0,3$ ). В выщелоченных черноземах отмечается небольшой вынос Cr из гумусового горизонта ( $K = 0,8–0,9$ ). Распределение Cr по профилю черноземов слабо связано с распределением физиче-

Таблица 1. Показатели плодородия черноземов выщелоченных опытных участков

Вариант	Глубина, см	Гумус, %	Коэффициент вариации, %	pH	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Hr+	V, %
					ммоль/100 г почвы		
Лесополоса	0 – 20	5,96 ± 0,27	6,4	6,33	38,8 ± 0,9	4,3	90,0
	20 – 40	4,80 ± 0,39	11,4	6,60	34,8 ± 1,7	3,8	90,2
Бессменный пар	0 – 20	4,63 ± 0,21	5,4	6,16	33,7 ± 1,3	4,8	87,5
	20 – 40	3,95 ± 0,33	10,0	6,44	32,0 ± 2,3	4,1	88,6
Монокультура кукурузы							
Контроль б/у	0 – 20	4,81 ± 0,12	3,0	6,06	35,0 ± 1,7	5,1	87,3
	20 – 40	4,32 ± 0,41	11,3	6,40	33,9 ± 1,1	4,4	88,5
$N_{60}P_{60}K_{60}$	0 – 20	5,20 ± 0,23	5,1	5,90	36,0 ± 3,2	6,3	85,1
	20 – 40	4,60 ± 0,26	6,5	6,77	34,3 ± 1,8	4,9	87,7
$N_{120}P_{60}K_{60}$	0 – 20	5,50 ± 0,17	3,5	5,89	36,8 ± 3,8	6,5	85,0
	20 – 40	4,54 ± 0,34	8,2	6,69	34,3 ± 1,8	4,6	88,2
Севооборот кукурузы							
Контроль б/у	0 – 20	5,02 ± 0,13	3,3	6,43	36,2 ± 2,0	4,8	88,3
	20 – 40	4,58 ± 0,22	6,3	6,40	34,2 ± 1,9	4,1	89,3
$N_{60}P_{60}K_{60}$	0 – 20	5,38 ± 0,14	3,5	5,61	36,7 ± 2,2	5,8	86,4
	20 – 40	4,73 ± 0,11	3,0	6,30	34,7 ± 1,4	4,1	89,4
$N_{120}P_{60}K_{60}$	0 – 20	5,48 ± 0,27	6,0	5,75	36,4 ± 3,5	6,4	85,0
	20 – 40	4,53 ± 0,28	7,5	6,37	33,8 ± 2,7	4,4	88,5

ской глины ( $r = 0,55$ ) и гумуса ( $r = 0,49$ ), хотя данные В.А. Ковды (1973) и И.Н. Любимова (1979) указывают на возможность накопления Сг в илистой фракции черноземов – до 56,7 % [4]. В почвах опытных вариантов содержание валового хрома изменялось от 74 до 84 мг/кг и было заметно ниже кларка и ПДК.

Свинец (Pb) а.м. 207,2 – индикатор стресса окружающей среды, большинство его соединений сильно токсичны – это потенциальные канцерогены. ПДК свинца в почвах – 32 мг/кг, ОДК для черноземных почв – 130 мг/кг. В черноземах выщелоченных количество свинца в пахотном и частично подпахотном горизонтах изменялось от 19 до 28 мг/кг и было ниже допустимой концентрации. Нашими исследованиями не выявлено зависимости в содержании свинца от длительности внесения минеральных компонентов, что противоречит распространенному мнению о негативной роли удобрений в агроценозах.

Уровень содержания Ni (а.м. 58,7) в черноземах региона близок к кларку почв ( $K = 1$ ), но ниже кларка литосферы ( $K = 1.4$ ). Предельно допустимая концентрация валового никеля в почвах составляет 35 мг/кг, ориентировочно допустимая концентрация Ni для почв, имеющих  $pH_{КСИ} > 5,5$ , составляет 80 мг/кг. Содержание элемента в гумусово-аккумулятивном слое слабо коррелирует с его количеством в почвообразующей породе. Статистическая обработка результатов анализа, проведенная Н.А. Протасовой, показала, что распределение Ni в пахотном горизонте черноземов региона не подчиняется нормальной функции, так как модальное число и среднее арифметическое имеют одинаковое значение [4]. Несоответствие распределения элемента нормальной функции объясняется его концентрированием в небольшом числе минералов. Результаты исследований, полученные на черноземах выщелоченных, не противоречат литературным данным. Количество никеля в пахотном и подпахотном слоях различных вариантов изменялось от 29 до 39 мг/кг (табл. 2). Зависимости в его накоплении от различных агротехнических приемов не выявлено, хотя в некоторых вариантах, в том числе и неудобренных, его количество незначительно превышало ПДК.

Мышьяк (As) – один из известных токсичных металлов, кларк – 14 мг/кг (а.м. 74,9). В пахотные почвы может поступать с удобрениями и пестицидами. В тканях и клетках растений легко транспортируется. Арсенат является аналогом фосфата и его поглощение идет активно в плохо дренируемых почвах. В черноземах тяжелого гранулометрического состава ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) составляет 10 мг/кг [1]. В условиях выщелоченных черноземов в гумусово-аккумулятивных слоях содержание мышьяка варьировало от 4 до 9 мг/кг, при ПДК 2 мг/кг и ОДК 10 мг/кг, и не было связано с особенностями землепользования (табл. 2). Длительная распашка и внесение минеральных удобрений не оказали влияния

Таблица 2. Влияние длительного систематического внесения минеральных удобрений на содержание некоторых тяжелых металлов и стронция в черноземах

Вариант опыта	Глубина, см	Cr	Pb	Ni	As	Sr
		мг/кг				
Лесополоса	0 – 20	74	26	34	4	79
	20 – 40	80	28	36	7	78
Бессменный пар	0 – 20	80	27	39	7	75
	20 – 40	77	26	37	7	79
Монокультура кукуруза						
Контроль б/у	0 – 20	74	27	34	4	78
	20 – 40	83	26	33	7	82
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0 – 20	76	20	34	7	97
	20 – 40	80	20	32	8	92
N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0 – 20	77	19	32	7	89
	20 – 40	76	20	29	9	76
Севооборот кукурузы						
Контроль б/у	0 – 20	83	21	36	5	82
	20 – 40	75	24	38	6	76
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0 – 20	81	24	31	7	97
	20 – 40	84	22	36	5	86
N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0 – 20	82	26	35	8	93
	20 – 40	84	19	39	7	85
ПДК	-	90	32	4	2	10
ОДК	-		130	80	10	
Кларк	-	92	30	50	5,6	270

на накопление мышьяка, а изменяющиеся показатели, вероятно, объясняются природным варьированием элемента в почвах.

Стронций (Sr) – щелочноземельный металл с а.м. 87,62, кларк – 0,034 %, является аналогом кальция и откладывается в костной ткани. В кислой среде он проявляет высокую подвижность, в ходе миграции захватывается глинистыми и органическими коллоидами и относится к элементам сильного биологического накопления.

В условиях Среднерусской возвышенности содержание стронция в выщелоченных черноземах тяжелого гранулометрического состава может составлять от 37 до 110 мг/кг [4]. В почвах опытного участка количество стронция изменялось от 75 до 97 мг/кг (табл. 2), что не противоречит литературным данным и опровергает мнение о возможности накопления стронция после длительного применения минеральных удобрений.

Результирующим показателем любого агротехнического приема является его влияние на продуктивность сельхозкультур. Показано, что на неудобренном фоне урожайность зеленой массы кукурузы составила 21,3 т/га, с колебаниями по годам от 18,0 т/га в 2024 г. до 24,2 т/га в 2022 г. (табл. 3).

Внесение полного минерального удобрения в дозе N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> в среднем за три года обеспечило прибавку зеленой массы на 9,2 т/га, или 43,2 % к неудобренному фону. Размер прибавки урожайности в этом варианте колебался по годам от 7,1 т/га в 2024 г. до 10,9 т/га

Таблица 3. Урожайность зеленой массы кукурузы в монокультуре, т/га

Вариант	Урожайность зеленой массы по годам			Среднее за 3 года	Прибавка		Диапазон изменчивости уровня урожайности
	2022	2023	2024		т/га	%	
Без удобрений	24,2	21,6	18,0	21,3	0	0	18,0–24,2
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	33,9	32,5	25,1	30,5	9,2	43,2	25,1–33,9
N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	38,7	37,8	27,7	34,7	13,4	62,9	27,7–38,7
HCP <sub>0,05</sub>	1,9	0,9	1,5	1,5			

в 2023 г. Увеличение дозы азотного компонента в 2 раза дает максимальный прирост урожайности зеленой массы – 13,4 т/га (по годам 9,7–16,2 т/га), или 62,9 % к фону без удобрений, а по сравнению с вариантом N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> прирост составил 4,2 т/га, или 13,8 %.

Одинаковая схема внесения удобрений и агротехника при выращивании одного и того же гибрида кукурузы в севообороте и монокультуре позволили за период 2022–2024 гг. и за все годы исследований (шесть ротаций десятипольного севооборота) выяснить роль севооборотного фактора в продуктивности кукурузы (табл. 3, 4).

Увеличение урожайности зеленой массы за счет севооборотного фактора на неудобренном фоне составило 4,9 т/га, с колебаниями по годам от 4,3 т/га в 2022 г. до 5,6 т/га в 2024 г. В среднем за VI ротаций севооборота прирост зеленой массы кукурузы составил 4,2 т/га; за период с 2022–2024 гг. по всем вариантам опыта – в пределах 3,6–6,2 т/га, а за все годы исследований – 2,6–5,5 т/га. Преимущество севооборотного фактора наблюдалось даже в том случае, когда в сравниваемых вариантах вносили полное минеральное удобрение.

**Заключение.** Стационарные методы исследования являются основными в оценке агрогенной эволюции почв и их экологического состояния. На черноземах выщелоченных основной причиной потерь органического вещества является усиление минерализационных процессов в результате интенсивной распашки почв в отсутствие растительных остатков.

Таблица 4. Урожайность зеленой массы кукурузы в монокультуре и севообороте при длительном систематическом внесении удобрений, т/га

Вариант	Ротация						Среднее	Прибавка		Прирост за счет севооборота
	I	II	III	IV	V	VI		т/га	%	
	Годы									
	1971	1981	1991	2001	2011	2021				
	1973	1983	1993	2003	2013	2023				
	1974	1984	1994	2004	2014	2024				
Без удобрений	28,4	25,8	20,5	31,5	25,0	26,2	26,2	0	0	4,2
	24,9	22,3	18,0	25,4	19,9	21,3	22,0			
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	34,5	33,7	28,9	44,3	33,7	35,6	35,1	8,9	34,0	3,1
	34,6	29,1	27,8	40,8	28,9	30,5	32,0	10,0	45,5	
N <sub>120</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	39,2	35,7	30,6	46,2	36,6	39,1	37,9	11,7	44,7	2,7
	35,9	31,6	28,6	45,9	34,6	34,7	35,2	13,2	60,0	
HCP <sub>0,05</sub>	1,7	1,8	2,6	5,2	2,4	1,3		2,8		
	1,6	2,3	1,3	3,2	2,9	1,5		2,3		

Примечание: севооборот – числитель, монокультура – знаменатель

Минеральные удобрения и севооборотный фактор сдерживают потери гумуса и усиливают процесс гумификации, особенно на фоне двойной дозы минерального компонента. Выявлена слабо выраженная тенденция снижения суммы обменных оснований в составе ППК за счет их замещения катионами водорода гидролитической кислотности.

Нашими исследованиями опровергнуто распространенное мнение о негативной роли удобрений как источника тяжелых металлов в агроценозах.

Содержание хрома, свинца, никеля, мышьяка было на уровне санитарно- допустимых норм и не зависело от условий землепользования. Кроме того, минеральные удобрения – это залог не только воспроизводимого плодородия почв, но и продовольственной безопасности. Так, при дозе N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> урожайность зеленой массы кукурузы в среднем за 3 года наблюдений повысилась на 9,2 т/га. Культура кукурузы показала высокую устойчивость к монокультуре.

**Список использованной литературы**

1. Горбунова, Н.С. Загрязнение почв. Способы контроля и нормирования / Н.С. Горбунова, А.И. Громовик и др. - Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2022. - 81 с.
2. Громовик, А.И. Агрочернозем глинисто-иллювиальный сильнотумусированный среднепахотный тяжелосуглинистый / А.И. Громовик, Л.Д. Стахурлова, Ю.Ю. Терентьева и др. В кн.: Красная книга почв Воронежской области. - Воронеж, 2022. - С. 269-270.
3. Мотузова, Г.В. Экологический мониторинг почв / Г.В. Мотузова, О.С. Безуглова. - М.: Гаудеамус, 2007. - 239 с.
4. Протасова, Н.А. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, T, Zr, Ga, Be, Sr, Ba, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья / Н.А. Протасова, А.П. Щербаков. - Воронеж: ВГУ, 2003. - 368 с.
5. Stakhurlova, L.D. Biodynamics of black soils leached under different agrotechnical practices in long-term field experiments / L.D. Stakhurlova, A.F. Stulin // Russian Agricultural Sciences. - 2017. - V. 43. - № 1. - P. 35-39.
6. Шепелев, М.А. Агроэкология / М.А. Шепелев. - Костанай, 2016. - 46 с.
7. Щербаков, А.П. Основные условия и закономерности современного антропогенеза черноземов России / А.П. Щербаков, Ф.И. Козловский, И.И. Васенев // Антропогенная эволюция черноземов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. - С. 391-412.

**Ecological state of leached black soils under conditions of systematic application of mineral fertilizers**

Stakhurlova L.D., Stulin A.F.

**Summary.** Studies have been conducted in stationary field experiments, which made it possible to identify the ecological state of leached black soils with the systematic application of mineral fertilizers. Their long-term use hindered the processes of humus mineralization, however, there has been a tendency for the degradation of the soil absorbing complex due to a decrease in the degree of soil saturation with bases. It was shown that mineral fertilizers were not a source of heavy metals – Cr, Pb, Ni, As – and their concentrations did not exceed the maximum permissible concentrations.

**Keywords:** stationary experiments, leached black soil, fertilizers, humus, sum of exchangeable bases, acidity, heavy metals, monoculture, crop rotation, corn.