

# • ЭКОЛОГИЯ •

УДК 631.95:633.16

## АГРОХИМИЧЕСКАЯ МЕЛИОРАЦИЯ ТЕХНОГЕННО ЗАГРЯЗНЕННОГО ОПОДЗОЛЕННОГО ЧЕРНОЗЕМА

**Ю. А. Мажайский<sup>1,2</sup>**, профессор, доктор сельскохозяйственных наук

**О. В. Черникова<sup>2</sup>**, кандидат биологических наук

**В. А. Игнатенко<sup>1</sup>**, научный сотрудник

<sup>1</sup>Мещерский филиал Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова

<sup>2</sup>Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний, г. Рязань, Россия

### Аннотация

При изучении подвижности тяжелых металлов наблюдалась в основном положительная роль различных систем удобрений в снижении их содержания в ацетатно-аммонийном экстрагенте (рН 4,8). Максимальная урожайность получена на варианте с комплексным внесением извести, органики и минеральных удобрений. На повышенно загрязненной почве зерно ячменя аккумулировало 0,98 мг/кг Pb и 0,18 мг/кг Cd, что превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) данных металлов в зерне. Все применяемые системы агрохимической мелиорации способствовали снижению поступления металлов в растения. Содержание меди и цинка в зерне не превышали ПДК.

**Ключевые слова:** агрохимическая мелиорация, плодородие, чернозем оподзоленный, тяжелые металлы, ячмень.

### Abstract

**Yu. A. Mazhayskiy, O. V. Chernikova, V. A. Ignatenok**  
**AGROCHEMICAL RECLAMATION OF TECHNOLOGICALLY CONTAMINATED PODZOLIZED CHERNOZEM**

When studying the mobility of heavy metals, a mainly positive role was observed for various fertilizer systems in reducing their content in the acetate-ammonium extractant (pH 4.8). The maximum yield was obtained on the option with the integrated application of lime, organic and mineral fertilizers. On highly contaminated soil, barley grain accumulated 0.98 mg/kg Pb, and 0.18 mg/kg Cd, which exceeds the maximum allowable concentration (MAC) of these metals in the grain. All applied agrochemical reclamation systems contributed to the reduction of metal intake in plants. The content of copper and zinc in the grain did not exceed the MAC.

**Keywords:** agrochemical reclamation, fertility, podzolized chernozem, heavy metals, barley.

### Введение

При современном уровне развития сельского хозяйства в России практически нет почв, которые не нуждались бы в мероприятиях, направленных на улучшение их качеств или поддерживающих их нормальное состояние [1, 2, 3]. В результате нерационального использования сельскохозяйственных земель, а также

сокращения мероприятий по их защите стали широко развиваться процессы деградации почв (ухудшение физических свойств и химического состава), их загрязнение тяжелыми металлами (ТМ).

Наиболее сложной частью проблемы охраны окружающей среды является восстанов-

ление плодородия почв, загрязненных ТМ. Загрязнение земель ТМ происходит в основном под влиянием антропогенных факторов, однако, не сразу всей территории землепользования. На ранних стадиях выделяются отдельные поля с повышенным их содержанием [4, 5].

Интенсивный рост нефтехимической, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, энергетики и автомобильно-дорожного комплекса в Рязанской области оказывает негативное влияние на окружающую среду. ТМ по воздействию на биологические объекты и масштабам загрязнения занимают особое место среди других загрязняющих веществ. Кадмий, свинец и цинк, которые относятся к первому классу опасности, и медь, относящаяся ко второму классу опасности, являются главными загрязнителями почв среди ТМ.

Экологическое состояние земель в большинстве районов области продолжает ухудшаться. В сельском хозяйстве при современном истощительном землепользовании, интенсивном антропогенном воздействии, а также отсутствии мероприятий по улучшению почв практически все земли области подвергнуты процессам деградации. В значительной степени это относится к черноземам [6]. Они являются сильным аккумулятором ТМ, в связи с чем, актуальной становится разработка агро-мелиоративных мероприятий по санации техногенно загрязненных черноземов и получению безопасной продукции растениеводства. На территории Рязанской области черноземы оподзоленные находятся в зоне воздействия энергетического комплекса Рязанская ГРЭС. Исследования влияния выбросов данного предприятия на окружающую среду показали превышение ПДК валовых форм ТМ в почве [5].

Кислая реакция среды, ненасыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями, потеря кальция приводят к разрушению гуматов кальция и, как следствие, разрушению почвенной структуры, снижению содержания гумуса и буферной способности почвенно-поглощающего комплекса. Хорошо гумусированные почвы поглощают ТМ, переводя их в недоступные соединения в результате химических и физико-химических реакций. При сильной техногенной нагрузке и истощении почва исчерпывает свои возможности по детоксикации

загрязняющих веществ, что может привести к необратимым негативным последствиям.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния различных систем удобрений на детоксикацию оподзоленного чернозема, загрязненного тяжелыми металлами.

Для достижения поставленной цели были проведены натурные исследования в лизиметрах с черноземом оподзоленным, загрязненным тяжелыми металлами: Cd – 0,6 мг/кг, Cu – 90 мг/кг, Pb – 40 мг/кг, Zn – 110 мг/кг.

Тестовой культурой служил ячмень, т. к. он обладает высокой толерантностью к тяжелым металлам, способен накапливать их высокие концентрации в фитомассе. Ячмень широко распространен в хозяйствах Рязанской области: он используется для продовольственных и кормовых целей, а также применяется в пивоваренной промышленности.

Для достижения оптимальных условий питания растений и улучшения почв применялись минеральные и органические удобрения (табл. 1). Для тяжелосуглинистого чернозема норма навоза составляла 100 т/га, известкование проводили по полной гидролитической кислотности в пересчете на  $\text{CaCO}_3$  – 8 т/га. Ежегодные нормы удобрений применяли на основе рекомендаций для исследуемой зоны в зависимости от культуры. Известно, что севооборот является главным фактором стабильности и эффективности сельскохозяйственного производства. Он позволяет без дополнительных затрат сохранять и воспроизводить плодородие почв, создавать благоприятные фитосанитарные условия в посевах, повышать эффективность использования питательных веществ почв.

Минеральные удобрения  $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  в норме применяются ежегодно под предпосевную обработку почвы. В варианте 6, где в комплексе минеральных удобрений доза фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$  240 кг/1 га была введена под первую культуру (вико-овсяную смесь), под ячмень вносили только  $\text{N}_{60}\text{K}_{60}$ . Под предпосевную культивацию применили в варианте 5 известь  $\text{CaCO}_3$  в той же дозе 8 т / 1 га и минеральные удобрения  $\text{N}_{60}\text{P}_{240}\text{K}_{60}$ .

Таблица 1 – Схема закладки лизиметрического опыта с оподзоленным черноземом

Номер варианта	Система удобрений	Сокращенное название варианта
1	Без удобрений (контроль)	Б/у
2	Навоз КРС 100 т/га на ротацию звена севооборота (с/о) N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> – ежегодно	H100 NPK по 60
3	CaCO <sub>3</sub> 8 т/га и навоз 100 т/га на ротацию звена с/о N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> – ежегодно	Ca 8, H100 NPK по 60
4	CaCO <sub>3</sub> 8 т/га на ротацию с/о N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> – ежегодно	Ca 8 NPK по 60
5	N <sub>60</sub> P <sub>240</sub> K <sub>60</sub> CaCO <sub>3</sub> 8 т/га на ротацию с/о	P240 NK по 60 Ca 8
6	P <sub>240</sub> на ротацию с/о N <sub>60</sub> K <sub>60</sub> – ежегодно	P240 NK по 60

### Результаты опытов и их обсуждение

После закладки опыта провели отбор почвенных проб глубиной 0–25 см с каждого лизиметра. В почвенных пробах определяли агрохимические показатели, которые представлены в табл. 2.

Оподзоленный чернозем характеризуется относительно невысоким содержанием гумуса (4,3–5,0 %). Реакция почвы изменялась от слабокислой до близкой к нейтральной: рН 5,1–6,2 (в среднем 5,5).

Емкость поглощения почвенного поглощающего комплекса (ППК) оподзоленного чернозема составила по всем лизи-

метрам около 16 мг-экв./100 г. При этом гидролитическая кислотность колебалась от 1,6 до 5,0 мг-экв./100 г. Вероятно, на двух вариантах, где она составила 1,6–2,1 мг-экв./100 г, известь уже произвела нейтрализующее действие. Обеспеченность усвояемой формой азота и обменным калием низкая, а подвижным фосфором – средняя.

В начале исследований чернозем оподзоленный по своим агрохимическим свойствам характеризовался более низкими показателями по сравнению с данными литературы [7].

Таблица 2 – Результаты агрохимических исследований в начале опыта с оподзоленным черноземом

№ варианта	Варианты	Гумус, %	рН <sub>ксл</sub>	мг-экв. / 100 г почвы		V, %	мг/100 г почвы		N – NO <sub>3</sub> , мг/кг
				H <sub>г</sub>	S		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
1	Б/у	4,5	5,4	3,9	12,4	76	8,8	5,1	5,2
2	H100 NPK по 60	5,0	5,3	4,2	12,0	74	15,1	7,1	5,7
3	Ca 8, H100 NPK по 60	5,0	6,2	1,6	15,3	91	19,5	6,8	4,7
4	Ca 8 NPK по 60	4,3	6,0	2,1	13,7	82	13,6	6,2	4,4
5	P240 NK по 60 Ca 8	4,5	5,1	5,0	11,1	69	16,2	5,7	5,6
6	P240 NK по 60	4,4	5,2	3,9	12,2	76	15,2	4,7	4,1

Примечание. H<sub>г</sub> – гидролитическая кислотность; S – сумма обменных оснований; V – степень насыщенности основаниями.

Наиболее агрессивная часть металла – подвижные формы, которые могут быть усвоены непосредственно через корневую систему. Допустимыми считают те формы, которые переходят в определенные вытяжки. Наиболее распространенным экстрагентом для определения содержания подвижных форм ТМ является ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8. Считается, что эта форма тяжелых металлов поступают из почвы в растения, оказывая на последние токсическое действие. Поступление ТМ в растения и микроорганизмы осуществляется в основном через почвенный раствор. Поэтому жидкая фаза почв является непосредственным источником ТМ для почвенной биоты и высших растений.

В табл. 3 представлены результаты определения содержания подвижных форм металлов в оподзоленном черноземе (реагент ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8).

В изучаемом подтипе черноземных почв наибольшая подвижность отмечена у Cd. При содержании его в почве от 0,13 до 0,5 мг/кг она колебалась от 22 до 83 %. В начале исследований водорастворимые фосфаты суперфосфата в почвенном растворе способствовали переводу ТМ в малорастворимые (малоподвижные) формы, что привело к резкому снижению подвижности не только Cd, но и других изучаемых металлов.

Органические удобрения на фоне минеральных удобрений снизили подвижность Cu, Pb, Zn. При добавлении известняковой муки к системе

удобрений получен аналогичный эффект по сравнению с контролем (без удобрений).

Количество растений в рядах было примерно одинаковым, за исключением варианта 5, где известь была внесена в этом году (табл. 4).

При внешнем осмотре посевов отмечались токсичные признаки, особенно сильно выраженные в варианте 1 (без внесения удобрений): сильное пожелтение и подсыхание нижних листьев и пожелтение верхушек растений. В варианте 5, где наряду с ежегодным применением  $N_{60}P_{60}K_{60}$  внесли непосредственно под ячмень известь, произошло пожелтение нижних листьев и верхушек растений, а в лизиметрах, где использован навоз под предшествующую культуру (варианты 2 и 3), а в настоящий год – только минеральные удобрения, отмечается также уменьшение образования хлорофилла в листьях у отдельных растений.

Все агрохимические приемы санации загрязненной почвы оказали положительное влияние на линейный рост растений в опыте. Уже в фазу кущения ячменя в лизиметрах, где не вносили удобрения, растения отставали в росте на 28,8–46,5 %, во время колошения на 10,0–11,9 % по сравнению с вариантами, когда применялись различные агрохимические мелиоранты. Лучшие условия для роста растений были созданы на вариантах 2 и 3, где для санации загрязненного чернозема использовался комплекс удобрений, состоящий из навоза, извести и ежегодного внесения полного минерального удобрения, а также на вариантах 4 и 6.

Таблица 3 – Содержание подвижных форм ТМ в оподзоленном черноземе

№ варианта	Варианты	Cd		Cu		Pb		Zn	
		мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
1	Б/у	0,47	78	32,3	36	31,2	78	26,3	24
2	H100 NPK по 60	0,49	82	11,1	12	20,4	51	17,3	16
3	Ca 8, H100 NPK по 60	0,50	83	13,2	15	10,0	25	4,2	4
4	Ca 8 NPK по 60	0,41	68	31,1	35	12,5	31	60,0	55
5	P240 NK по 60 Ca 8	0,39	65	14,0	16	7,2	18	67,0	61
6	P240 NK по 60	0,13	22	0,7	1	2,5	3	7,8	7

Примечание. % – степень подвижности ТМ в почве.

Оптимизация питания сельскохозяйственных культур усиливает их экологические функции, обеспечивая реализацию потенциальной продуктивности растениями, формирование более качественной продукции [8]. Изучаемые системы удобрений показали, что на загрязненной почве внесение известковых, органических и минеральных удобрений улучшает условия произрастания ячменя, хотя и в разной степени (табл. 4).

Отмечено, что применение известняковой муки, органических удобрений под предшествующую культуру и ежегодное внесение  $N_{60}P_{60}K_{60}$  (вариант 3) обеспечило максимальную прибавку зерна ячменя – 21,2 ц/га по сравнению с контролем. Существенно меньшее увеличение урожайности наблюдалось на вариантах 6 и 4, где прибавка урожая зерна составила 10,8 и 8,5 ц/га соответственно (табл. 5).

Таблица 4 – Влияние загрязнения тяжелыми металлами оподзоленного чернозема на фенологические показатели ячменя

№ варианта	Варианты	Среднее количество растений на 1 ряд	Высота растений, см						Признаки ухудшения развития
			14.06			12.07			
			в среднем	изменения		в среднем	изменения		
		см ±	%	см ±	%				
1	Б/у	30	21,5	–	–	72,8	–	–	Сильное пожелтение и подсыхание листьев и верхушек растений
2	H100 NPK по 60	31	29,6	+8,1	38	80,3	+8,0	11	Пожелтение встречается редко
3	Ca 8, H100 NPK по 60	30	31,5	+10,0	47	80,6	+8,3	11	Нет изменений
4	Ca 8 NPK по 60	31	30,0	+8,5	40	79,5	+7,2	10	Нет изменений
5	P240 NK по 60 Ca 8	27	27,7	+6,2	29	80,9	+8,6	12	Пожелтение нижних листьев и верхушек растений
6	P240 NK по 60	31	30,0	+8,5	40	79,8	+7,5	10	Нет изменений

Таблица 5 – Эффективность агрохимических приемов санации загрязненного тяжелыми металлами оподзоленного чернозема

№ варианта	Варианты	Урожайность зерна ячменя, ц/га			Урожайность соломы, ц/га		
		в среднем	изменения		в среднем	изменения	
			ц/га	%		ц/га	%
1	Б/у	15,7	–	–	12,2	–	–
2	H100 NPK по 60	32,1	+16,4	104	17,3	+5,1	42
3	Ca 8, H100 NPK по 60	36,9	+21,2	135	17,7	+5,5	45
4	Ca 8 NPK по 60	24,2	+8,5	54	16,9	+4,7	39
5	P240 NK по 60 Ca 8	30,8	+15,1	96	20,9	+8,7	71
6	P240 NK по 60	26,5	+10,8	69	18,8	+6,6	54

Влияние систем удобрений на урожайность побочной продукции было примерно одинаковым, за исключением варианта 5.

Таким образом, исследования показали, что оподзоленный чернозем, искусственно загрязненный ТМ, сформировал сравнительно незначительную урожайность зерна и соломы. Изучаемые системы удобрений способствовали увеличению выхода как основной, так и побочной продукции, что особенно ощути-мо наблюдалось в варианте с комплексным внесением извести, органики и минеральных удобрений.

В первый год исследований загрязнения внутрипочвенных вод трудно сделать определенные выводы. Но однозначно наметилась тенденция положительного действия всех систем удобрений на снижение содержания кадмия в инфильтрационных водах в 3–5 раз (табл. 6).

В естественных условиях обитания растениям, как правило, приходится сталкиваться

с действием не одного, а нескольких фитотоксикантов. В наших исследованиях проведено искусственное комплексное загрязнение растворимыми солями Cd, Cu, Pb, Zn. Сельскохозяйственные культуры на загрязненных ТМ почвах могут накапливать под их действием биомассу, а полученная продукция будет иметь хороший товарный вид, однако содержание ТМ окажется высоким.

Разработанные ПДК загрязнителей позволяют оценивать уровень загрязненности продукции [9] (табл. 7).

При известковании на фоне NPK (вариант 4) и запасном внесении фосфора (P240) и NK по 60 кг/га (вариант 6) содержание кадмия в зерне не превысило ПДК, как и в других вариантах опыта. Однако следует отметить, что содержание данного поллютанта оказалось здесь наименьшим. Концентрация меди и цинка не вызывает опасений. Уровень свинца в зерне превысил ПДК только в варианте без удобрений.

Таблица 6 – Содержание загрязняющих веществ во внутрипочвенных водах

№ варианта	Варианты	Тяжелые металлы, мг/л			
		Cd	Cu	Pb	Zn
1	Б/у	0,0015	0,0012	0,0070	0,0048
2	H100 NPK по 60	0,0006	0,0021	0,0062	0,0051
3	Ca 8, H100 NPK по 60	0,0007	0,0023	0,0162	0,0208
4	Ca 8 NPK по 60	0,0005	0,0012	0,0088	0,0040
5	P240 NK по 60 Ca 8	0,0003	0,0017	0,0074	0,0041
6	P240 NK по 60	0,0008	0,016	0,0082	0,0059
	ПДК	0,001	1,0	0,03	1,0

Таблица 7 – Влияние систем удобрений на содержание тяжелых металлов в ячмене на загрязненном оподзоленном черноземе

№ варианта	Варианты	Зерно ячменя, мг/кг			
		Cd	Cu	Pb	Zn
1	Б/у	0,18	4,85	0,98	18,2
2	H100 NPK по 60	0,07	4,93	0,16	28,4
3	Ca 8, H100 NPK по 60	0,09	5,0	0,41	48,7
4	Ca 8 NPK по 60	0,1	4,97	0,48	30,0
5	P240 NK по 60 Ca 8	0,08	5,38	0,37	31,3
6	P240 NK по 60	0,1	3,86	0,46	29,3
	ПДК	0,1	10,0	0,5	50,0

### Заключение

Чернозем оподзоленный, загрязненный тяжелыми металлами, по агрохимическим свойствам характеризуется более низкими показателями (в среднем): содержание гумуса 4,6 %, реакция почвы – слабокислая (рН 5,5), емкость поглощения почвенно-поглощающего комплекса – около 16 мг-экв./100 г. Обеспеченность усвояемой формой азота и обменным калием низкая, подвижным фосфором – средняя. Гидролитическая кислотность составила 1,6–2,1 мг-экв./100 г в вариантах с внесением извести. Фенологические наблюдения показали, что все системы удобрений способствовали улучшению роста и развития растений. Однако лучше всего развивался ячмень при

известковании и совместном внесении органических и минеральных удобрений, что обеспечило максимальную прибавку зерна ячменя – 21,2 ц/га по сравнению с контрольным вариантом. Все системы удобрений способствовали снижению инфильтрации кадмия во внутрпочвенные воды в 2–5 раз. Содержание ТМ в зерне в вариантах, где проводилась санация загрязненной почвы, не превышало ПДК.

Таким образом, изучаемые системы удобрений положительно влияют на агрохимические, экологические показатели, а также повышают продуктивность загрязненного ТМ оподзоленного чернозема, накопление растениями ТМ идет неоднозначно.

### Библиографический список

1. Акчурина, О. С. Совершенствование технологий выращивания и хранения моркови в учреждениях УИС / О. С. Акчурина // Актуальные вопросы материально-технического снабжения органов и учреждений уголовно-исполнительной системы : материалы Всероссийского научно-практического круглого стола. – Рязань : Отделение полиграфии РИО Академии ФСИН России, 2017. – С. 58-62.
2. Возделывание сортов и гибридов подсолнечника в Рязанской области / Д. В. Виноградов [и др.] // Преступление, наказание, исправление : тезисы выступлений и докладов участников междунар. науч.-практ. конф. / Академия ФСИН России. – Рязань : Академия ФСИН России, 2017. – С. 204-207.
3. Терентьев, А. С. Повышение урожайности зерновых культур, возделываемых в подсобных хозяйствах учреждений уголовно-исполнительной системы / А. С. Терентьев // Актуальные вопросы материально-технического снабжения органов и учреждений уголовно-исполнительной системы : материалы Всероссийского научно-практического круглого стола. – Рязань : Отделение полиграфии РИО Академии ФСИН России, 2017. – С. 82-87.
4. Черникова, О. В. Приемы восстановления плодородия черноземных почв, загрязненных тяжелыми металлами / О. В. Черникова, А. Н. Карпов // Агрохимический вестник. – 2014. – № 2. – С. 24-25.
5. Черникова, О. В. Экологическое обоснование комплексных приемов реабилитации черноземов, загрязненных тяжелыми металлами (на примере Рязанской области) : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / О. В. Черникова ; Российский государственный аграрный университет. – Рязань, 2010. – 178 с.
6. Евтюхин, В. Ф. Влияние агрохимической мелиорации загрязненного тяжелыми металлами оподзоленного чернозема на урожайность сельскохозяйственных культур / В. Ф. Евтюхин, О. В. Черникова, А. Н. Карпов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 2 – С. 17-19.
7. Агрохимия / под ред. Б. А. Ягодина. – 2-е изд. – М. : Агропромиздат, 1989. – 639 с.
8. Минеев, В. Г. Агрохимия / В. Г. Минеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 720 с.
9. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах : СанПиН 42-123-4089-86. – 11 с.

Поступила 14.05.2019