

6. Рекомендации по системам удаления, транспортирования, хранения и подготовки к использованию навоза для различных производственных и природно-климатических условий/ Н.М. Морозов [и др.] – М.: Росинформагротех, 2005. – 180 с.

7. РД-АПК 1.10.15.02-17 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помёта. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.docs.cntd.ru/document/495876346.htm>

8. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.edu67.ru/files/806/san-pin-1-2-3685-21.pdf>

9. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических)

мероприятий [Электронный ресурс].-режим доступа <http://www.docs.cntd.ru/document/573536177.htm>

10. СП 2.2.3670-20 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.docs.cntd.ru/document/573230583.htm>

11. Соколов М.С. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству агрохимикатов при их государственной регистрации/ М.С. Соколов, Г.А. Жариков, Л.М. Соколова// Агро XXI.- 2003.- № 1-6.- С. 138-142.

12. Тарасов С.И. Эффективный способ снижения содержания аммиака в свиарниках/ С.И.Тарасов// Вестник ВНИИМЖ. – 2019.-№2.- С.106-113.

13. Технология внутрипочвенного внесения жидких органических удобрений. – М.: Госагропром СССР,1987.-60 с.

14. Типовая технология применения жидких органических удобрений. – М.: МСХ СССР,1983.- 77 с.

15. Типовая технология производства и внесения твердых органических удобрений- М.: Госагропром СССР,1987.- 75 с.

16. Харитонова Д. Выгодная утилизация/Д. Харитонова//Агропрофи. – 2019. – №7. – С.34-39.

TOPICAL ISSUES OF ENVIRONMENTAL PROTECTION IN THE FARMS OF INDUSTRIAL ANIMAL HUSBANDRY

Communication 2. Ecological aspects of technologies for the production of liquid manure, organic fertilizers based on it

S.I. Tarasov, Head of the Department, Candidate of Biological Sciences,

All-Russian Scientific Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – a Branch of the Federal Budget Scientific Institution "Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Centre" (VNIIO – branch of FGBNU "Verkhnevolzhsky FANS») 601390 Vladimir region, Sudogodsky district, Vyatkino village, Pryanishnikova str., 2; tel.: (4922) 426035; fax: (4922) 426010, e-mail: tarasov.s.i@mail.ru

In production conditions, in order to reduce environmental loads, increase homogeneity, and reduce the humidity of liquid manure, the high efficiency of the use of preparations Bio-Algin G-40, Dr. Robik LGN 0510, is shown. Taking into account the need for disinfection of liquid manure infected with pathogenic microorganisms, parasitic organisms, the requirement to revise the norms is justified. To control the safety of soil and groundwater, the requirement for the organization of observation wells in the areas of manure storage lagoons has been updated for the first time. In the absence of reliable suppliers of machinery, equipment for the processing of liquid manure, storage, transportation and application of organic fertilizers based on it, the need for their production at domestic enterprises has been initiated.

Key words: industrial animal husbandry, liquid manure, quarantine, organic fertilizers, storage, application, environmental risks, nature protection.

УДК 628.381:632.1:631.811.7

DOI: 10.25680/S19948603.2022.128.22

ВЛИЯНИЕ СЕРЫ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А.П. Баранов, С.С. Ладан, к.б.н., ФГБНУ «ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова», e-mail: lab.ecotox@vniia-pr.ru

Проведена оценка влияния серы в почве с длительным применением осадка сточных вод (ОСВ) на фитотоксичность тяжелых металлов (ТМ) – кадмия, свинца и меди. Методом биотестирования почвы с использованием ячменя выявлено значительное снижение фитотоксичности ТМ на фоне высокого содержания ОСВ. Корреляционный анализ показал тесную взаимосвязь биомассы ячменя с величиной концентрации общей серы почвы на фоне высокой концентрации загрязнения кадмием ($K 0,9$; $P < 0,001$), свинцом ($K 0,89$; $P < 0,001$) и медью ($K 0,87$; $P < 0,001$).

Ключевые слова: осадок сточных вод, фитотоксичность, ячмень, сульфиды, тяжелые металлы.

Для цитирования: Баранов А.П., Ладан С.С. Влияние серы на фитотоксичность тяжелых металлов// Плодородие. – 2022. – №5. – С. 86-90. DOI: 10.25680/S19948603.2022.128.22.

Неизбежное увеличение объема внесения ОСВ в почву под сельскохозяйственные культуры обусловлено как проблемами накопления и утилизации отходов, так и новейшими технологиями очистки осадка, позволяющими снижать до нормативного уровня сопутствующие загрязнители. Эта тенденция увеличивает риски попадания поллютантов, в первую очередь ТМ, присутствующих в ОСВ, в систему питания человека.

Динамика основных контаминантов ОСВ, изученная в многочисленных длительных полевых опытах, демонстрирует увеличение концентрации ТМ в почве с последующей их аккумуляцией в растениях [1-4]. Показатели эффектов фитотоксичности приводятся довольно

редко, так как они достаточно хорошо изучены и служат основой утвержденных санитарных норм. Однако, в исследованиях по длительному применению ОСВ авторы указывают на положительную реакцию растений на осадок [5-7]. В экспериментах по использованию ОСВ под сельскохозяйственные культуры в дозах, превышающих 30 т/га, выявлено, что при чрезмерном накоплении ТМ продолжается интенсивное нарастание биомассы сельскохозяйственных культур без ухудшения ее питательных качеств [8].

Зафиксирован рост урожайности в опытах с длительным применением ОСВ, несмотря на накопление в растениях кадмия, свинца, цинка, меди [9-11]. Причины

отсутствия фитотоксичности на высоких аккумулярованных фонах в процессе многолетнего применения ОСВ изучали в исследовании реакций ячменя, выращенного на почве с аккумулярованной дозой ОСВ 1440 т/га [11]. Было показано снижение токсичности ТМ на фоне высоких доз ОСВ при одновременном увеличении накопления металлов в надземной части растения.

Факторами регуляции токсического действия ТМ на растения, выращенные на почве с матрицей, сформированной многократным внесением ОСВ, могут быть: pH почвы, окислительно-восстановительный потенциал, содержание фосфора и органического вещества [12].

Установлен широкий диапазон содержания серы в осадке – от 0,3 до 2,3 мас.% [13,14]. Диапазон форм серы включает: сульфаты, сульфоновую кислоту, сульфоксиды, ароматическую и алифатическую серу и неорганические сульфиды, которые составляют 18; 25; 9; 18; 22 и 8% от общего содержания серы соответственно [15].

Растворимые сульфиды используют в качестве агентов для взаимодействия с тяжелыми металлами в осадке и образования нерастворимых сульфидов. Авторы [16, 17] предлагают применение сульфида натрия для стабилизации подвижности тяжелых металлов (Zn, Cu и Cd). Выявлено, что сульфидная добавка Na_2S значительно замедляет подвижность Cu, Zn, Cd и As. Содержание обменной фракции Zn и Cd при сульфидной обработке осадка было максимально снижено до 98,8 и 98,6% соответственно [18].

В работе [19] показано, что при анаэробных процессах сбраживания, происходящих в метантенке, сера осадка переходит в сульфидные соединения, связывающие тяжелые металлы в недоступные для растений формы. Эффективность этого процесса непосредственно зависела от величины содержания серы в осадке, так как вся неорганическая сера переходила в сульфидную форму; предлагается добавлять фосфогипс для гарантированного связывания ТМ в осадке.

В нашем исследовании изучается изменение фитотоксичности ТМ под влиянием серы как элемента, существенно отличающего осадок сточных вод от широко принятых в практике земледелия органических удобрений на основе навоза и торфа.

Цель исследований – оценить влияние серы почвы при длительном применении ОСВ на фитотоксичность в условиях загрязнения ТМ.

Методика. Применен метод биотестирования, часто используемый для определения значений токсичности, вызывающей 50%-ное (LD_{50}) изменение признака жизнедеятельности (выживаемость, репродуктивность, масса и др.). При оценке влияния почвы с длительным применением ОСВ на растения использовали фитотестирование. Метод позволяет устанавливать эффекты на разных объектах и с разными загрязнителями. Экспериментальное изучение действенных приемов детоксикации, в данном случае иммобилизации, возможно только на фоне сильного загрязнения. Этим обусловлен установленный в опыте уровень высокого искусственного загрязнения ТМ, встречаемый только на нарушенных почвах.

Для оценки влияния концентраций серы, вносимой в почву с ОСВ, на фитотоксичность ТМ была выбрана почва микрополевого опыта с многолетним внесением осадков. Опыт заложен в 1984 г., а в 2006 г. занесен в Реестр Географической сети опытов с удобрениями РФ по направлению «Изучить процесс рекультивации почв,

загрязненных тяжелыми металлами с использованием растений». Аэробно стабилизированные осадки сточных вод с очистных сооружений г. Владимира вносили ежегодно. В вариантах опыта после 17 лет внесения осадков сформировались аккумулярованные дозы ОСВ: 195, 390, 780 и 1560 т/га.

С образцами почвы, отобранной в вариантах, проводили исследования по оценке влияния серы, аккумулярованной с внесенными ОСВ, на токсическое действие ТМ, кадмия и свинца и меди на ячмень. Для получения корректных результатов биотестирования все образцы почвы, имеющие разные нагрузки аккумулярованных доз ОСВ, нивелировали внесением питательных веществ N, P, K, $\text{C}_{\text{орг.}}$, Mg, Ca по варианту с максимальной нагрузкой – 1560 т/га. Таким образом все варианты почвы полевого опыта были выравнены по содержанию основных питательных элементов, исключая серу, и использовались в вегетационном опыте с ячменем.

Для получения результатов биотестирования, близких к 50%-ным изменениям изучаемого показателя жизнедеятельности растений, почву микрополевого опыта дополнительно загрязняли внесением нитратов кадмия и свинца и меди в концентрациях 50; 600 и 70 мг/кг (расчет по металлам) соответственно. Водные растворы ТМ вносили в слой воздушно-сухой почвы в виде растворов с последующим равномерным перемешиванием.

Оценку влияния влажности почвы с ОСВ осуществляли при уровнях 60; 70; 80 и 90% с предпосевным кондиционированием искусственно загрязненных вариантов. Кондиционирование проводили в выростных контейнерах с массой почвы 700 г при температуре 20°C с ежесуточным контролем влажности почвы, которую за 7 дней до посева прекращали и выравнивали до 60%.

Воздействие ТМ на молодые растения ячменя исследовали в условиях вегетационного опыта, в четырехкратной повторности. В каждый сосуд помещали 500 г почвы и четыре семени ячменя. После прорастания в каждом сосуде оставляли по два растения. Ячмень выращивали при искусственном освещении в течение 3 нед в вегетационных светоустановках, оснащенных подъемными световыми блоками с лампами ДНаЗ-400 [20]. Мощность излучения в области ФАР – 80-90 Вт/м², продолжительность светового периода 14 ч, относительная влажность воздуха 65±5 %, температура воздуха 25±2° С.

В почвенных образцах определяли агрохимические показатели: $\text{pH}_{\text{сол.}}$, подвижные формы фосфора и калия в вытяжке по Кирсанову, фосфор по Дениже методом пламенной фотометрии; содержание органического углерода – колориметрически по методу Тюрина. Для определения общего азота использовали методику по ГОСТу 26107-84, калия и магния – по ГОСТу 26428-85. Показатели используемого торфа (массовая доля, % на сухое вещество): зольность – 20,0, орг.в-во – 80,0, азот общ. – 1,90, фосфор общ. – 0,06, калий – 0,15, pH 4,6.

Содержание тяжелых металлов определяли по методике массовой доли кислоторастворимых форм металлов атомно-адсорбционным анализом-РД 52.18.191-89. Содержание серы в аэробно стабилизированных образцах ОСВ определяли по методу [21].

Статистическую обработку результатов биотестирования проводили с помощью программы MS Excel 2003 и прикладного пакета STATISTICA 6.0. Были определены общие статистические показатели: средние величины ана-

лизированных показателей (М), стандартная ошибка среднего (m) и наименьшая существенная разность (НСР). Принятый в работе уровень значимости $p = 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Основные агрохимические показатели почвы, содержание тяжелых металлов, подкорректированных в образцах почвы до уровня варианта с аккумулятивной дозой 1560 т/га и коэффициент суммарного загрязнения приведены ниже.

Показатели почвы используемой в опыте с ячменем:

$pH_{(KCl)}$ 6,55, $C_{общ.}$ 1,62%, N 0,180%, P_2O_5 180 мг/100 г, K_2O 6,8 мг/100 г, ЕКО 8,86 мг-экв/100 г, Ca+Mg 8,54 мг-экв/100 г, Cd 9,69 мг/кг, Pb 20,4, Cu 140,7, Zn 199,5, Cr 1202, Ni 24, Zs 15 мг/кг.

Количество ТМ невелико относительно применяемых доз ОСВ. Например, кларк свинца по А.П. Виноградову [22] равен 16 мг/кг. Наибольший вклад в коэффициент, определяемый как сумма превышений количеств ТМ над их соответствующими кларками, вносят Cd и Cu. Коэффициент Zc, равный 15,0, соответствует нижнему пределу в категории допустимое загрязнение [23].

Содержание серы в анаэробно стабилизированном осадке, компостированном в кучах в течение 3 лет, составляло 1,8%, органического углерода – до 14%. В течение эксперимента в варианты опыта были внесены объемы серы в составе осадка, отраженные в таблице 1.

Используемый в опыте ОСВ после 2-3-летнего мезофильного компостирования в буртах представляет собой рассыпчатую однородную массу темно-серого цве-

та. Исходя из того, что процесс минерализации/иммобилизации серы связан с соотношением C:S в почве (400:1 – иммобилизация, 200:1 – минерализация), то, с учетом внесенных 1560 т/га осадков, составляющих около 50% пахотного слоя почвы, содержание серы может достигать 0,9%. В этой ситуации соотношение C:S намного уже, чем показатель 200:1, при котором происходит минерализация серы [27]. Таким образом, в вариантах опыта должны идти активная минерализация и выравнивание содержания серы за счет улетучивания, выноса с высокими урожаями, вымывания.

1. Количество внесенной в почву серы с ОСВ

Вариант (объем ОСВ, т/га)	Количество внесенной серы	
	т/га	мг/кг почвы
Контроль (без осадка)	-	-
195	3,51	1170
234	5,21	1775
390	7,02	2340
585	10,53	3510
780	14,04	4680
1170	21,02	7021
1560	28,08	9360

Данные таблицы 2 демонстрируют влияние уровня влажности почвы и длительности экспозиции на урожай зеленой массы ячменя через 22 дня эксперимента при заданной до посева влажности почвы.

2. Влияние ТМ ОСВ на зеленую массу ячменя в зависимости от влажности почвы и длительности увлажнения

Вариант	Влажность почвы в течение кондиционирования, %														
	60			70			80			90			100		
	Длительность кондиционирования (сут)														
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Контроль	476	461	454	486	479	455	479	467	480	460	444	451	471	483	469
K + Cd*	186	203	201	223	245	261	218	285	219	254	266	257	281	277	274
K + Pb**	323	321	308	337	356	389	303	267	280	347	358	321	299	311	347
K + Cu***	222	289	275	235	345	267	311	289	306	345	356	309	311	287	302
K + (Cd, Pb, Cu)	230	203	212	265	280	207	222	214	254	212	278	209	213	246	290
OCB****	445	412	463	439	457	474	422	466	463	486	459	473	505	511	422
OCB+ Cd*	301	320	390	416	432	481	457	479	481	468	492	453	423	414	462
OCB+ Pb**	371	401	397	397	342	391	439	487	444	423	397	394	433	467	397
OCB+ Cu***	376	366	351	396	422	451	460	503	460	387	410	387	415	389	345
OCB+Cd, Pb, Cu	397	377	381	422	434	402	480	455	479	431	489	422	421	403	397
НСР ₀₅	25,1														

*Cd – 50 мг/кг. **Pb – 600 мг/кг. ***Cu – 70 мг/кг.

****ОСВ – 1560 т/га, аккумулятивная доза осадков за время проведения эксперимента.

Максимальное количество сероводорода в растворенном состоянии обнаруживается обычно через 1-3 нед после затопления почвы. Затем содержание его начинает снижаться в результате значительного расхода сульфатов или за счет того, что восстановительные условия способствуют появлению существенного количеств растворенных Fe и Mn. Последние связывают S^{2-} в практически нерастворимые FeS и MnS, производства растворимости которых равны, соответственно, $5 \cdot 10^{-18}$ и $2,5 \cdot 10^{-10}$ [24].

Основной вывод из таблицы 2 – предположение о механизме влияния серы как об альтернативе между почвенной иммобилизацией ТМ и возникающей устойчивостью растений, вызванной поступлениями серы. Последующее образование пула соединений серы, участвующих в процессах вторичного метаболизма, и определяет устойчивость растений к стрессам. Этот вывод наиболее адекватно интерпретируется в русле научного направления «sulfur-induced-resistance (SIR)», изучаю-

щего увеличение устойчивости растений к неблагоприятным факторам жизнедеятельности (включая действие ТМ) при участии таких соединений серы как глутатион, фитохелатины, металлотioneины, глюкозинолаты, транспортные белки [25].

Анаэробное кондиционирование с последующим образованием сульфидов и с соответствующим уменьшением поглощения серы в форме сульфатов, как единственного источника серы для растений, способствует поддержанию роста растительной массы на загрязненной почве. Таким образом, полученный эффект необходимо интерпретировать как почвенное действие серы, приводящее к иммобилизации ТМ. Краткосрочность эксперимента (22 сут) позволяет предположить отсутствие полноценного возврата к сульфатному питанию. На рисунке 1 отображено влияние токсичности разных ТМ ОСВ для растений ячменя.

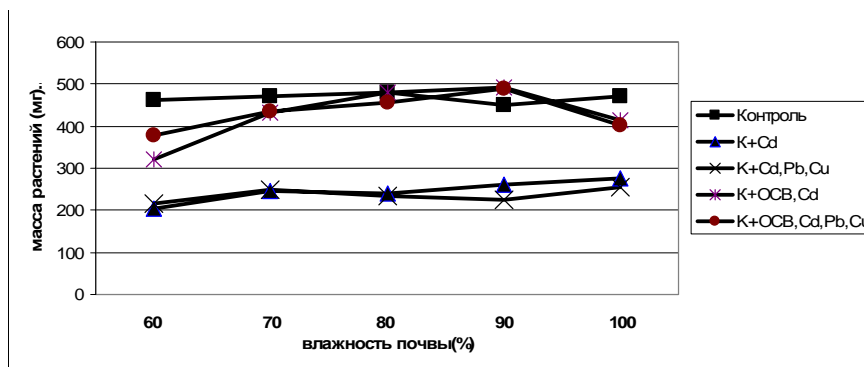


Рис. 1. Токсичность ТМ ОCB с OCB для растений ячменя в зависимости от влажности почвы

Показано как предпосевная экспозиция с высокой влажностью почвы повлияла на снижение токсичности ТМ только в вариантах с OCB; токсичность комплекса ТМ, представляющего более высокую дозу загрязнения, не отразилась на массе растений; тренд на повышение токсичности при 100%-ной влажности (K+OCB,Cd и K+OCB, Cd, Pb, Cu) может объясняться высоким содержанием сульфидов, оставшихся не связанными с ТМ и Fe.

Токсичность накапливающихся сульфидов может проявляться в отсутствии достаточного количества Fe, а также возникать, когда уровни поступления серы остаются неизменными, но высокое содержание органического вещества увеличивает скорость восстановления сульфата за счет обеспечения доноров электронов от его разложения [26]. Кроме того, почва, испытываемая в опыте с разными уровнями влажности, регулярно удобряется OCB в дозе 110 т/га, получая значительное количество органической серы.

Ниже приведены произведения растворимости некоторых ТМ [27].

Сульфаты	Сульфиды
$HgSO_4 - 6,2 \cdot 10^{-7}$	$HgS - 1,4 \cdot 10^{-45}$
$PdSO_4 - 1,7 \cdot 10^{-8}$	$PdS - 8,7 \cdot 10^{-29}$
$CdSO_4$ – растворимость- 75 г/100 мл	$CdS - 6,5 \cdot 10^{-28}$
$CuSO_4$ – растворимость- 34,9г/100 мл	$CuS - 2,3 \cdot 10^{-48}$
$ZnSO_4$ – растворимость- 22,0 г/100 мл	$ZnS(\alpha) - 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ г}$

В таблице 3 показана линейная зависимость массы растений от содержания серы OCB на 15-е сутки выращивания, демонстрирующая влияние этого показателя на токсичность ТМ.

3. Масса ячменя на разных фонах серы OCB с учетом загрязнения почвы Cd, Pb и Cu*

Вариант	Сера в OCB, мг/кг	Зеленая масса ячменя, мг
Контроль		483
OCB195 + ТМ**	3,51	342
OCB234 + ТМ	5,21	333
OCB390 + ТМ	7,02	396
OCB585 + ТМ	10,53	445
OCB780 + ТМ	14,04	429
OCB1170 + ТМ	21,02	450
OCB1560 + ТМ	28,08	489
НСП		24,1

*90%-ная влажность при экспозиции 10 сут.

**ТМ – содержание в почве $Cd_{50} + Pb_{600} + Cu_{70}$ (мг/кг).

Из таблицы 3 видно, что масса ячменя, выращенного в почве с 90%-ной влажностью при кондиционировании в течении 10 сут, находится в линейной зависимости от количества серы, внесенной с OCB. Токсическое действие выбранной дозы экспериментального загрязнения кадмием сильнее влияния свинца и меди, а действие серы на фоне загрязнения кадмием проявляется активнее.

На корреляционных трендах с фонами кадмия и свинца (рис. 2), так же очевидно защитное (протекторное) действие серы, аккумулированной длительным внесением OCB.

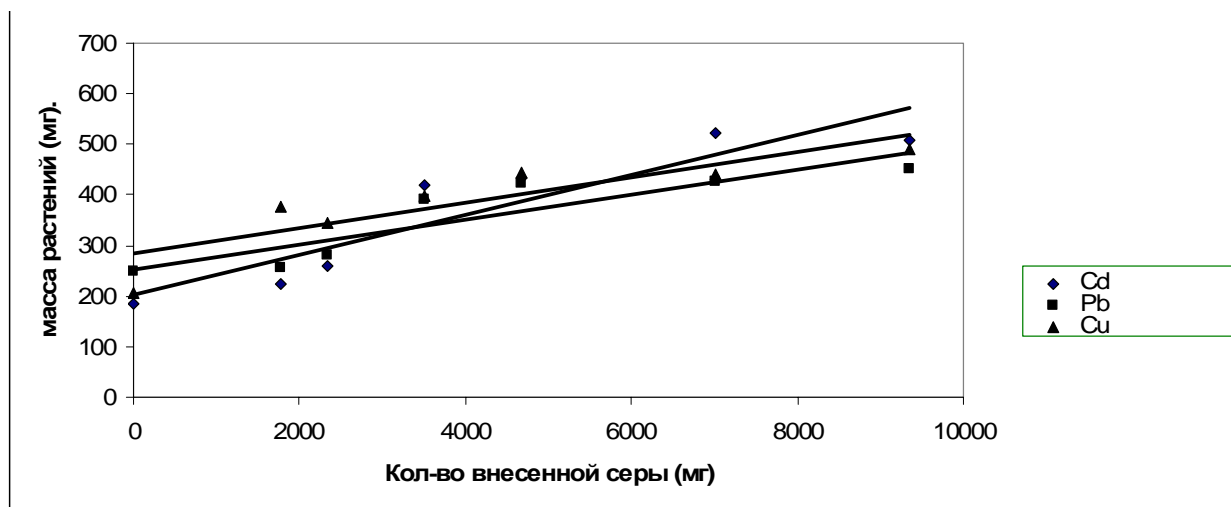


Рис. 2. Тренды корреляции между серой OCB и зеленой массой растений ячменя на почве с ТМ (Коэф. корр. Cd= 0,91; Pb= 0,89; Cu= 0,87)

С учетом результатов, полученных методом биотестирования необходимо дальнейшее исследование с количественными оценками, включающими данные химического анализа по соотношению сульфидных и сульфатных форм серы. Результаты опытов по изучению действия серы при применении ОСВ говорят о расширении возможностей ремедиации загрязненных почв при условии использования хорошо очищенных осадков.

Выводы. 1. Биотестирование почвы с длительным внесением ОСВ не выявило существенного угнетения вегетирующих растений ячменя. 2. Дополнительное экспериментальное загрязнение кадмием и свинцом почвы, с уже сформированной длительным внесением ОСВ матрицей, вызывало для растений признаки фитотоксичности, уменьшающейся по мере увеличения внесенных доз ОСВ. 3. Снижение фитотоксичности от действия ТМ тесно коррелировало с увеличением содержания в почве общей серы.

Литература

1. Peter S. Nooda, David McNulty, B.J. Alloway, Mark N Aitken. Plant Availability of Heavy Metals in Soils Previously Amended with Heavy Applications of Sewage Sludge, J. Sci. Food Agric 1997, 73, 446-454, R. P. Singh, M. Agrowal, Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants, Chemosphere, 2007;67(11):2229-40.
2. Yang Guo-hang¹, Zhu Guang-yun¹, Li He-lian¹, Han Xue-mei¹, Li Ju-mei², Ma Yi-bing². Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments, Journal of Integrative Agriculture 2018, 17(8): 1861-1870.
3. Ebrahim M Eid, Kamal H Shaltout. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by nine native plant species grown at a sewage sludge dump site, International journal phytoremediation, Volume 18, 2016-tissue 11.
4. P. Singh, M. Agrowal. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants, Chemosphere, 2007; 67(11).
5. C. Juste, M. Mench. Long-Term Application of Sewage Sludge and its Effects on Metal Uptake by Crops, 1992, Publisher: CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, In book: Biogeochemistry of trace metals (pp.159-193).
6. D. Purve. Long-term effects of application of sewage sludge to soil on composition of herbage with respect to potentially toxic elements, Environ Geochem Health 1986, Mar;8(1):11-3.
7. Д.В. Виноградов, В. М. Василева, М. П. Макарова, Б. И. Кочуров, Е. И. Лунова. Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур. // Теоретическая и прикладная экология. 2019. №3. С. 127-133.
8. Н.Т. Чеботарев, Н.Д. Найденов, А.А. Юдин. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур // «Наука. Мысль: электронный периодический журнал». Научный журнал. – 2016. № 1-2. С. 31-36.

9. Касатиков В.А. Влияние мелiorативных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность зерновых культур. // Агрохимия, 2020. № 6. С. 64-68.
10. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние систематического применения осадка городских сточных вод на агроэкологические свойства почвы, урожайность культур в длительном опыте. // Почвоведение и агрохимия. 2018; №1. С. :155-161.
11. Баранов А.П., Касатиков В.А., Ладан С.С., Береза Д.В. Оценка рисков загрязнения кадмием агроценозов с длительным применением осадка городских сточных вод. // Плодородие. 2021. №3. С.60-64.
12. Gichangi, E.M.; Mkeni, P.N.S.; Muchaonyerwa, P. Evaluation of the heavy metals immobilization potential of pine bark-based composts. J. Plant Nutr. 2012, 35, 1853-1865.
13. Raf Dewil, Joris Roels, Boudewijn Van De Steen, Jan Baeyens. The Distribution of Sulphur Compounds in Sewage Sludge Treatment, Environmental Engineering Science 2008, 25(6):879-886.
14. Dewil, J. Baeyens, J. Roels, B. Van DE Steen. Evolution of the Total Sulphur Content in Full-Scale Wastewater Sludge Treatment, 2009, Environmental Engineering Science 26(4):867-872.
15. Amelung. 2005. Sulphur speciation and biogeochemical cycling in long-term arable cropping of subtropical soils: Evidence from wet-chemical reduction and S K-edge XANES spectroscopy. Eur. J. Soil Sci. 56:621R.
16. Chen, S.L.; Tao, X.Y.; Liu, X.H.; Si, Y.B. Effect of the sulfide amendment on the speciation distribution and bioavailability of heavy metals in municipal sludge. J. Saf. Environ. 2017, 17, 283-290.
17. Sun, Y.; Xu, R.; Qian, G.R. Study on heavy metal stabilization in sludge with bentonite and sulfide. Acta Sci. Nat. Univ. Sunyatseni 2007, 46, 41-43.
18. Xuan Zhang, Xian-qing Wang and Dong-fang. Wang Immobilization of Heavy Metals in Sewage Sludge during Land Application Process in China: A Review Sustainability 2017, 9, 2020; 77-82.
19. Черныш Е. Ю. Влияние сульфидной фракции на поведение тяжелых металлов в системе «осадки сточных вод – почва-растения». // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2013. №2. 159 с.
20. Панова Г.Г., Черноусов И.Н., Удалова О.Р., Александров А.В. Карманов И.В., Аникина Л.М., Судаков В.Л. Научно-технические основы круглогодичного получения высоких урожаев качественной растительной продукции при искусственном освещении // Доклады РАХН. 2015. №4. С. 17-21.
21. Р. Х. Айдинян, М. С. Иванова, Т. Г. Соловьева. Методы извлечения и определения различных форм серы в почвах и растениях. - М., 1968. – 22 с.
22. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. - М. 2008. С. 5.
23. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. МУ (Методические указания) от 05.02.1999 N 2.1.7.730-99. Применяется с 05.04.1999.
24. Аристархов А.Н. Агрохимия серы. - М., 2007. С.61.
25. 25 Elke Bloem E., Haneklaus S., Schug E. Milestones in plant sulfur research on sulfur-induced-resistance (SIR) in Europe. Frontiers in plant Science, Plant Physiology January 2015, Volume 5, Article 779, 1-12.
26. Leon P. M. Lamers, Laura L. Govers, Inge C. J. M. Janssen, Jeroen J. M. Geurts, Marlies E. W. Van der Welle, Marieke M. Van Katwijk, Tjisse Van der Heide, Jan G. M. Roelofs, Alfons J. P. Smolders Sulfide as a soil phytotoxin—a review Frontiers in Plant Science. 2013. № 4-268.
27. Блументаль Г., Энгельс З., Фитц Н., Хабердиль В., Хекнер К.-Х., Хенрион Г., Ландсберг Р., Шмидт В., Шольц Г., Штарке П., Вильке И., Вильке К.-Т. Анораникум. Т.2, М., 1984, С. 423.

EFFECT OF SULFUR ON THE PHYTOTOXICITY OF HEAVY METALS

A.P. Baranov, S.S. Ladan Dr. Sci,

ARSRI for Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikova, e-mail: lab.ecotox@vniia-pr.ru

An assessment of the effect of sulfur on the phytotoxicity of heavy metals (HM) in soil with prolonged use of sewage sludge (SS) was carried out. The method of bioassay of soil with SS artificially contaminated with salts of cadmium lead and copper HM were used. The results revealed a significant decrease in phytotoxicity, determined by the value of the biomass of *Hordeum vulgare* against the background of a high content of SS. Correlation analysis showed a close relationship between the biomass of *Hordeum vulgare* and the concentration of total sulfur of the soil against the background of high concentrations of cadmium pollution ($K 0.92 P \leq 0.001$), lead ($K 0.90 P \leq 0.001$) and copper ($K 0.90 P \leq 0.001$).

Keywords: sewage sludge, phytotoxicity, sulfides, barley, heavy metals.