

## ОЦЕНКА РИСКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КАДМИЕМ АГРОЦЕНОЗОВ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ПРИМЕНЕНИЕМ ОСАДКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

**А.П. Баранов, ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», В.А. Касатиков, д.с.-х.н., ВНИИОУ, С.С. Ладан, к.б.н.,  
Д.В. Береза, ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», e-mail: info@vniia-pr.ru**

Оценка биологической токсичности пахотного слоя почвы опыта по многолетнему применению высоких доз осадков сточных вод (ОСВ), проведенная методом биотестирования на чувствительных к кадмию кольчатых червях *Enchytraeus albidus* (выживаемость) и растениях *Hordeum vulgare* (урожайность), не выявила существенных токсических эффектов на организменном уровне.

Анализ растений, выращенных на почве с ОСВ (аккумулированная доза 1440 кг/га), дополнительно загрязненной солью кадмия, в лабораторных условиях показал, как существенное снижение биодоступности Cd, так и значительное уменьшение токсичности поглощенного металла для растений, по сравнению с почвой без ОСВ. Микроскопирование хромосомных aberrаций клеток овса, выращенного на загрязненной кадмием почве с ОСВ, выявило среднюю степень воздействия (10-15% aberrантных клеток) токсичности.

**Ключевые слова:** почва, осадки сточных вод, тяжелые металлы, токсичность, хроническое загрязнение, биотестирование.

Для цитирования: Баранов А.П., Касатиков В.А., Ладан С.С. Оценка рисков загрязнения кадмием агроценозов с длительным применением осадка городских сточных вод. //Плодородие. – 2021. – №2. – С.60-64. DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.16

Объемы применения ОСВ в мире растут, сопровождаясь большим количеством экспериментов по оценкам результатов длительного применения осадков под сельскохозяйственные культуры. При этом выявлено положительное влияние ОСВ и агрохимикатов на их основе на показатели почвенного плодородия [1-4]. Однако, центральным вопросом текущих исследований является оценка рисков накоплений тяжелых металлов, как контаминантов ОСВ, в растительной продукции агроценозов, в связи с потенциальным риском попадания их в пищу человека. Установленные тенденции накопления ТМ в почвах определяют задачу по прогнозу ситуаций накопления критических уровней металлов в почве, возникающих вследствие длительного и массированного применения ОСВ. В условиях постоянного внесения шламов в почву при трех-, четырехлетнем периоде разложения и минерализации внесенного органического вещества аккумуляция ТМ в почве может усиливать их вынос растениями [4, 5].

Однако существует предположение, что основным путем превращений ТМ в перспективе являются фиксация и "возвращение" металлов к более стабильным и нерастворимым формам в почве, особенно по мере разложения добавленного органического вещества [6].

Наибольшую озабоченность, связанную с передачей металлов по пищевой цепочке, вызывает Cd. В проекте регламента ЕС по загрязнителям пищевых продуктов содержание Cd в зерне злаков ограничено 0,1 мг/кг в пересчете на свежую массу [7]. Высокая подвижность кадмия, вносимого с ОСВ, выражается как в биодоступности для растений [8], так и в опасной степени аккумуляции в педобионтах [9].

Особые риски, связанные с накоплением кадмия, обусловлены выработанными растениями механизмами защиты, демонстрируемыми как так называемыми «ги-

пераккумуляторами», накапливающими кадмий до уровня 100 мг/кг, так и широкой группой растений, имеющих эти универсальные механизмы защиты [10, 11].

Цель наших исследований - оценить состояние растений и педобионтов в отдаленной перспективе в системе длительного применения ОСВ методом биотестирования.

**Методика.** Для изучения воздействия кадмия на растения, культивируемые на почве с длительным применением ОСВ, использовали образцы почвы стационарного опыта, проводимого на опытном поле ФГБНУ ВНИИОУ в 2014 - 2017 г. Опыт заложен в 1984 г. и занесен в Реестр Географической сети опытов с удобрениями РФ «Изучить процесс рекультивации почв, загрязненных тяжелыми металлами с использованием растений» в 2006 г.

Аэробно-стабилизированные осадки сточных вод с очистных сооружений г. Владимира вносили ежегодно с 1984 г. в сочетании с периодическим известкованием доломитовой мукой. Максимальная суммарная доза ОСВ - 1440 т/га (50 %-ная влажность). Почва опытного участка дерново-подзолистая. Исходная агрохимическая характеристика слоя почвы 0-20 см в 1984 г: pH солевой вытяжки - 6,0, Нг - 1,05 мг-экв/100 г почвы, S - 7,0 мг-экв/100 г почвы, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 95 мг/кг почвы, K<sub>2</sub>O - 43 мг/кг почвы, C<sub>орг.</sub> - 0,8%.

Для оценки отдаленной перспективы аккумуляции ТМ в аспекте накопления в растительной продукции, применяли прием искусственного загрязнения почвы с уже сформированной матрицей почвы в результате длительного внесения ОСВ. В качестве модельного загрязнителя использовали кадмий в дозах, которые соответствовали загрязнению металлом за 20-30 лет.

Искусственное загрязнение кадмием почвы контрольного варианта и варианта с аккумулятивной дозой ОСВ 1440 кг/га проводили сульфатом кадмия с получением шкалы концентраций кадмия в почве 15, 30 и 60 мг/кг.

В течение 30 сут осуществляли кондиционирование загрязненных образцов в контролируемых условиях, соответствующих вегетации ячменя (*Hordeum vulgare*).

Для проведения биотестирования почвы по растительной массе ячменя образцы почвы на контроле и в варианте с ОСВ выравнивали по обеспеченности основными элементами питания внесением минеральных солей NPK, Ca, Mg и торфа.

В почвенных образцах определяли агрохимические показатели согласно следующим методам исследований: pH солевой вытяжки – по методу ЦИНАО; подвижные формы фосфора и калия – в вытяжке Кирсанова, фосфор – колориметрически по Дениже, методом пламенной фотометрии; содержание органического углерода – колориметрически по методу Тюрина, общий азот – по ГОСТу 26107-84, калий и магний по ГОСТу 26428-85. Показатели используемого торфа (массовая доля, % на сухое вещество): зольность – 20,0, органическое вещество – 80,0, азот общий – 1,90, фосфор общий – 0,06, калий – 0,15, pH 4,6.

Содержание кадмия и тяжелых металлов определяли по методике измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов атомно-адсорбционным анализом – РД 52.18.191-89.

Исследование воздействия кадмия на молодые растения ячменя проводили в условиях вегетационного опыта, в четырехкратной повторности. В каждый сосуд помещали 400 г почвы и четыре семени ячменя. После прорастания в каждом сосуде оставляли по два растения. Ячмень выращивали при искусственном освещении [12] в течение 3 нед в вегетационных светостанциях, оснащенных подъемными световыми блоками с лампами ДНАЗ-400 (Россия). Мощность излучения в области ФАР (фотосинтетически активной радиации) – 80-90 Вт/м<sup>2</sup>, продолжительность светового периода – 14 ч, относительная влажность воздуха 65±5 %, температура воздуха 25±2° С.

Биотестирование на энхитреидах (*Oligochaeta*, *Enchytraeidae*; вид *Enchytraeus albidus*) проводили по тест-реакции выживаемости в течении 2 нед [13].

Определение аберраций хромосом апикулярной меристемы клеток ячменя в анафазе осуществляли по методике [14].

Статистическую обработку результатов биотестирования проводили с применением программы «MS Excel 2003» и прикладного пакета STATISTICA 6.0. Были определены общие статистические показатели: средние величины анализированных показателей (M), стандартная ошибка среднего (m) и наименьшая существенная разность (НСР). Принятый в работе уровень значимости  $p = 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** Для получения корректной оценки токсичности почвы методом биотестирования, почвы на контроле (без ОСВ) были выравнены по агрохимическим показателям с почвой варианта ОСВ 1440 т/га и после периода кондиционирования проанализированы. Данные таблицы 1 демонстрируют один из полученных наиболее близких по результатам корректировки образцов контроля, используемых в эксперименте.

Концентрации ТМ в почве длительного опыта, показанные в таблице 2 обусловлены содержанием контаминантов, вносимых с ОСВ, а также естественной миграцией, связанной с деятельностью биоты в течение многолетнего микрополевого опыта. Обратим внимание на специфическое для данного шлама низкое содержание свинца.

#### 1. Основные агрохимические показатели сравниваемых образцов почвы

Вариант	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>г</sub>	S (Ca+Mg) мг-экв/100 г	ЕКО	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N <sub>общ.</sub>	Гумус
Контроль*	6,48	0,53	7,33	7,80	490	35	0,101	1,50
Без ОСВ**	6,40	0,45	11,02	8,15	2211	45	0,171	2,95
ОСВ, 1440 т/га	6,48	0,41	11,76	8,90	2120	44	0,169	2,91

\*Почва контроля полевого опыта. \*\*Почва контроля полевого опыта, скорректированная по агрохимическим показателям для сопоставления с вариантом ОСВ 1440 т/га.

#### 2. Содержание ТМ в отобранных образцах до внесения кадмия

Вариант	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni
Контроль	2,55	63,7	60,2	154,3	18,8	4,1
ОСВ, 1440 т/га	14,42	132,4	144,1	200,6	24,7	28,7

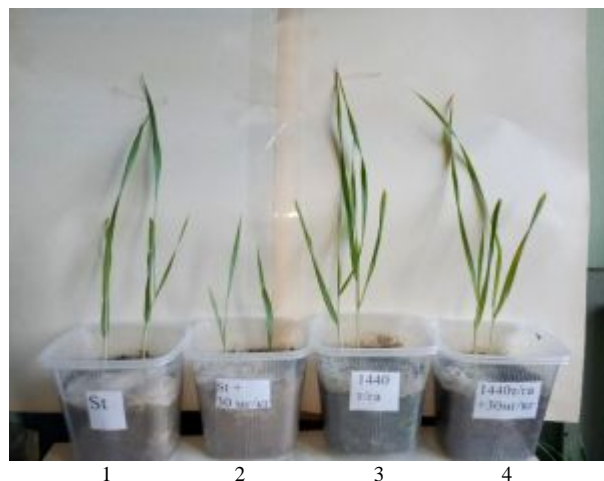


Рис.1. Растения *Hordeum vulgare*, растущие на почвах с загрязнением Cd на разных фонах: 1, 2 – без осадка, 3, 4 – с ОСВ

По визуальной оценке (рис. 1.) многолетнее внесение ОСВ с высокой аккумулятивной дозой (1440 т/га) не оказало отрицательного влияния на рост растений по сравнению с вариантом без ОСВ (см. рис. 1; 1, 2). Надземная масса в вариантах без ОСВ и с аккумулятивной дозой ОСВ 1440 т/га существенно не различается. Токсический эффект кадмия, внесенного в дозе 30 мг/кг почвы, не прослеживается на фоне почвы с многолетним внесением ОСВ (при сравнении вариантов 1440 и 1440 + 30 мг/га). В то же время на почве без ОСВ растения при той же дозе металла остановились в росте (St + 30 мг/кг). Очевидна устойчивость растений ячменя (15 дней) к токсическому действию внесенного кадмия на фоне почвы с ОСВ.

Данные по содержанию Cd (табл. 3) в почве и растительной массе ( $p < 0,05$ ) показывают аккумуляцию металла ячменем за 3 нед.

Значительные концентрации кадмия, определенные в растениях в вариантах с ОСВ, загрязненных солями кадмия (1440 т/га ОСВ + Cd 1 и 1440 т/га ОСВ + Cd 2) не оказали существенного влияния на массу растений

(см. рис.1). Сопоставление уровня концентраций кадмия в контрольных растениях (2,83мг/кг) и в вариантах с загрязнением (28,08 и 56,18 мг/кг) показывает защитное действие матрицы почвы с длительным внесением

ОСВ, которое не связано с биодоступностью металла. Наибольшая степень накопления металла отмечена в контрольном варианте с максимальной дозой кадмия.

### 3. Соотношение концентрации Cd в растениях *Hordeum vulgare* и массы растений на разных фонах с ОСВ и на контроле (без ОСВ)

Вариант опыта	Cd в почве	Cd в растении			Коэфф. аккумуляции	Масса растений мг
		общий	корни	листья		
		мг/кг сухого вещества				
Без ОСВ (контроль)	2,55±0,12	3,33±0,33	2,83	0,50	1,3	0,471/3,8
Без ОСВ + Cd 1	20,6± 1,68	35,16± 1,77	30,64	4,52	1,7	0,303/2,4
Без ОСВ + Cd 2	37,2±0,32	98,95±3,77	85,10	13,85	2,6	0,246/1,7
Без ОСВ + Cd 3	71,5± 3,36	379,53±11,6	300,12	79,41	3,9	0,201/1,4
ОСВ, 1440 т/га	14,4±0,56	28,25±1,86	10,45	17,82	1,9	0,459/3,7
ОСВ, 1440 т/га + Cd 1	38,2±2,87	65,32±3,65	28,08	37,24	1,7	0,440/3,5
ОСВ, 1440 т/га + Cd 2	53,7±3,91	119,16±10,1	56,18	62,98	2,2	0,404/3,5
ОСВ, 1440 т/га + Cd 3	80,7±4,68	241,75±8,4	84,40	157,35	2,9	0,379/3,0

Примечание. Масса растений: в числителе – воздушно-сухая, в знаменателе – сырая.

В целом можно отметить повышение уровня аккумуляции на более высоких дозах, когда защитные механизмы растения не успевают справляться с трафиком Cd. Кроме того, при сравнении вариантов с равной загрязненностью на разных фонах заметна большая биодоступность Cd на контроле. Учитывая, что более высокая степень экстрагируемости Cd, как и других тяжелых металлов, из почв, получающих неорганические удобрения или навоз, по сравнению с почвами с ОСВ, отмечена во многих исследованиях [15-17]. Факт меньших концентраций кадмия в растениях связан с лучшими условиями их жизнедеятельности в почве с ОСВ.

Распределение кадмия по растению, по-видимому, может рассматриваться как существенный признак изменения метаболизма кадмия в растениях, чувствительных к данному металлу. Известно, что растения, являющиеся гипераккумуляторами кадмия, способные накапливать кадмий до концентрации 100 мг/кг, отлич-

аются наличием транспортных белков, осуществляющих перенос кадмия в надземную часть растений [18,19].

На графике (рис. 2), построенном по величинам концентраций Cd в растениях и массе урожая ячменя, прослеживается тенденция к снижению токсичности тяжелого металла, поглощенного вегетирующими растениями на почве с ОСВ. При изначально близких показателях урожайности, показывающих примерно равное плодородие почв, затем, по мере увеличения объема поглощенного Cd, они начинают снижаться в большей степени в контрольном варианте без ОСВ. Таким образом, при близких показателях содержания кадмия в растениях, токсичность металла (в данном случае, оцениваемая по урожайности сырой массы) значительно ниже. Влияние матрицы почвы с ОСВ проявилось на устойчивости растения к токсическому действию.

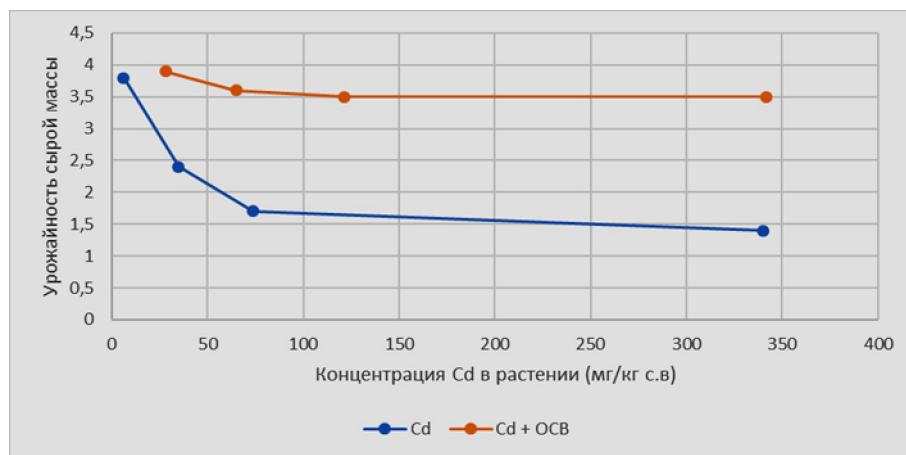


Рис. 2. Зависимость роста *Hordeum vulgare* от поглощенной дозы Cd на почве с многолетним внесением ОСВ и на контроле (без ОСВ)

На рисунке 3 приведены результаты биотестирования почвы вариантов полевого опыта с разными аккумулярованными дозами ОСВ, а также реакции энхитреид на почвах этих же вариантов, загрязненных кадмием в дозе 20 мг/кг почвы. Данные показывают, что токсическое действие почвы с ОСВ не отразилось на выживаемости (количестве взрослых энхитреид) *Enchytraeus albidus* в двухнедельном тесте. Более того, в результате многолетнего применения ОСВ токсический эффект от дополнительно внесенного в ходе био-

тестирования кадмия, очевидно, ниже по сравнению с контролем.

Проявляющаяся тенденция к снижению токсичности от действия Cd в энхитреидах, как и в растениях ячменя на фоне длительного применения ОСВ, по-видимому, может объясняться протекторными свойствами почвы с длительным применением ОСВ.

Особое значение сопоставления реакций энхитреид и растений состоит в том, что данные педобионты поглощают поллютанты с почвой непосредственно через

ротовую полость. Эти данные могут говорить о механизме инактивирования ТМ уже в почве с ОСВ. В то же время растения, ведущие «прикрепленный» образ жизни, развили различные механизмы снижения токсично-

сти металлов. Такое смягчение происходит за счет иммобилизации ионов тяжелых металлов, их исключения и хелатирования.

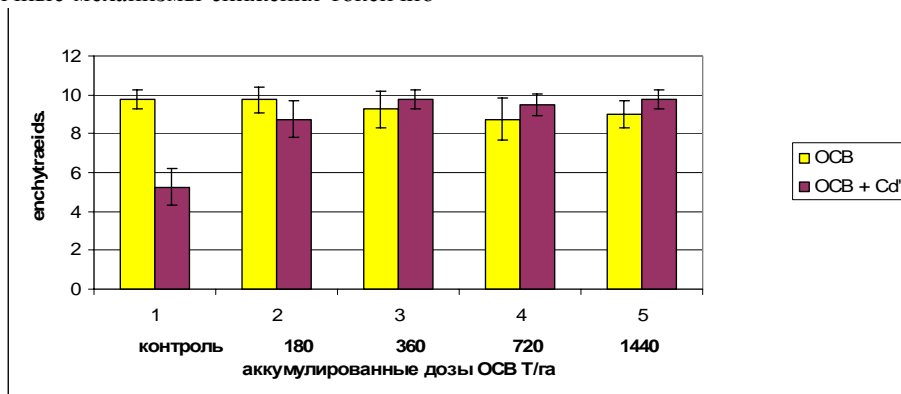


Рис. 3. Выживаемость энхитреид *Enchytraeus albidus* в почве вариантов опыта с ОСВ

Прежде всего, в адаптивном ответе на Cd растения активно продуцируют богатые серой (сульфгидрильными группами) молекулы, фитохелатины, металлотионеины, которые хорошо известны как посредники разнообразных стрессов в растениях, вызванных Cd [20].

Дефицит серы повышает восприимчивость растений к Cd-генерируемому окислительному повреждению. Богатые серой соединения имеют решающее значение для воздействия на токсичность Cd, позволяющее растениям усиливать свою клеточную защиту и / или сек-

вестрировать Cd в вакуоли с помощью фитохелатинов [21].

Пул серных соединений необходим для синтеза глутатиона, небелковых тиолов и фитохелатинов, а также имеет важное значение для активности защитных механизмов, которая может быть дефицитной в условиях сильного загрязнения ТМ.

Общеизвестна глобальная проблема утилизации ОСВ в связи с содержанием значительных концентраций серы (0,3-2,3 мас. %), препятствующих сжиганию из-за образования и выброса газообразного SO<sub>2</sub> и связанной с этим проблемой кислотных дождей [22].

#### 4. Виды хромосомных aberrаций клеток апикальной меристемы ячменя, выращенного на почве, загрязненной кадмием на разных фонах

Вариант	Число исследованных клеток	Всего aberrантных клеток, %	Частота встречаемости нарушений (доля клеток с aberrациями) %		
			Мосты	Двойные мосты	Дезориентированные хромосомы
Без ОСВ	856	4,21±0,79	2,66±0,55	0,58±0,44	0,97±0,83
Без ОСВ + Cd 1	655	7,35± 1,77	5,33±1,8	1,37±0,97	0,65±0,27
Без ОСВ + Cd 2	743	13,95±3,77	11,17±0,29	1,35±0,88	1,43±0,04
Без ОСВ + Cd 3	765	19,75±1,66	13,86±1,3	4,78±1,04	1,11± 0,12
ОСВ, 1440 т/га	805	6,44±0,53	3,86±0,77	1,70±0,44	0,88±0,38
ОСВ, 1440 т/га + Cd 1	776	6, 65±3,65	4,7±0,31	0,96±0,65	0,97±0,41
ОСВ, 1440 т/га + Cd 2	804	11,16±0,81	8,7±1,05	1,23±0,98	1,23±0,11
ОСВ, 1440, т/га+ Cd 3	764	12,75±1,45	9,78±0,97	1,88±,87	1,09±0,23

В таблице 4 представлены хромосомные aberrации, включающие мосты, двойные мосты и дезориентированные хромосомы. Рост числа хромосомных aberrаций показывает процесс, инициированный кадмием на клеточном уровне. Значения aberrаций по фонам (с осадком и без осадка) отражают положительную зависимость от уровня концентраций кадмия в почве. Протекторное влияние ОСВ так же проявляется в данном анализе, снижая число aberrаций. Однако данный анализ, в отличие от определения растительной массы, выявляет токсический эффект на фоне внесения ОСВ.

Данные хромосомных aberrаций в таблице показывают инициированные кадмием процессы на клеточном уровне, которые в меньшей степени связаны с матрицей почвы, удобренной ОСВ, чем другие показатели на организменном и популяционном уровне. Разница в показателях растений, выращенных на разных фонах, нивелируется. Таким образом, можно заключить, что картина хромосомных aberrаций является более непосред-

ственным отражением токсического эффекта и диагностически может считаться более точной оценкой концентрации токсиканта.

Полученные результаты с реакциями разных организмов, свидетельствующие о протекторном действии матрицы, образовавшейся в течении многолетнего применения ОСВ, показаны на примере только одного металла.

Накопление кадмия в почве и растениях, в условиях многолетнего применения ОСВ на фоне снижения токсичности тяжелого металла, свидетельствует о специфике метода биотестирования как инструмента оценки токсичности и необходимости комплексного подхода к определению рисков загрязнения, сочетания биотестов разных организационных уровней и химического анализа.

Ввиду вероятности аналогичных взаимосвязей для других тяжелых металлов, дальнейшее изучение протекторного действия ОСВ представляет практический



интерес с точки зрения использования данного механизма устойчивости организмов на почвах с высокой концентрацией тяжелых металлов.

**Выводы.** 1. Биотестирование почвы с многолетним внесением осадков сточных вод не выявило существенных токсических эффектов на организменном уровне.

2. Биотестирование искусственно загрязненной кадомом почвы с измененной многолетним внесением осадков сточных вод матрицей показало как существенное снижение биодоступности Cd, так и значительное уменьшение токсичности поглощенного металла для растений и педобионтов, по сравнению с почвой без ОСВ.

#### Литература

1. Касатиков В. А., Шабардина Н. П. Влияние систематического применения осадка сточных вод на агроэкологические свойства почвы, урожайность культур в длительном опыте // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – 1(60). – С 155-161.
2. Дунсин Ч., Еськов А.И., Касатиков В.А. Шабардина. Влияние осадка сточных вод и органо-растительного компоста на агрохимические свойства почвы и содержание в ней тяжелых металлов // Известия ТСХА. – 2005. – Вып. 1. – С.15-21.
3. Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А. Агроэкологическая эффективность осадков сточных вод г. Москвы // Агрохимический вестник. – 2001. – №5. – С. 25.
4. Berrow, M.L. and Burridge J.C. (1980). Trace element levels in soils: effects of sewage sludge. Inorganic Pollution and Agriculture. London, MAFF Reference Book No. 326. HMSO, pp. 159-183.
5. McBride, M.B. (1995) Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? Journal of Environmental Quality 24, 5-18.
6. Lewin, V.H. and Beckett P.H.T. (1980) Monitoring heavy metal accumulation in agricultural soils treated with sewage sludge. Effluent and Water Treatment Journal 20, 217-221.
7. EU (2000) Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Amending Commission regulation (EC) No 194/97 of 31 January 1997. Draft Commission Regulation on Contaminants in Foodstuffs. January 2000.
8. P.Begkvist, N. Jarvis, D. Bergen, K. Carlgren Long-term effects of sewage sludge applications on soil properties, cadmium availability and distribution in arable soil. Agriculture, Ecosystems & Environment, V.97, Issues 1-3, 2003, 167-179.
9. Wilfried Werner and Janos Warnusz. Ecological evaluation of long-term application of sewage sludges according to the legislative permissions Soil Sci. Plant Nutr., 43, 1047-1049, 1997.
10. Riffat John, K. Gadgil, Satyawati Sharma. Resistance mechanism of plants against cadmium Asian Journal of Chemistry 17(3):1363-1370.

#### ASSESSMENT OF RISKS OF CADMIUM CONTAMINATION IN AGROCENOSSES WITH LONG-TERM USE OF URBAN WASTEWATER SLUDGE

A.P.Baranov, B.A. Kasatkov, S.S.Ladan Dr. Sci, D.V.Bereza

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

The assessment of biological toxicity of the arable soil layer of the experience of long-term use of high doses of sewage sludge (SS), carried out by the method of bioassay on cadmium-sensitive annelids *Enchytraeus albidus* (survival) and plants of *Hordeum vulgare* (yield), did not reveal significant toxic effects at the organism level.

Analysis of plants grown on soil with Ss (accumulated dose of 1440 kg / ha), additionally contaminated with cadmium salt in laboratory conditions showed both a significant decrease in the bioavailability of Cd, and a significant decrease in the toxicity of the absorbed metal to plants, compared with soil without SS. Microscopy of chromosomal aberrations of oat cells in cadmium-contaminated soil with SS revealed an average degree of exposure (10-15% of aberrant cells) to toxicity.

Keywords: soil, sewage sludge, heavy metals, toxicity, chronic pollution, bioassay

11. Malik Tahir Hayat, Muhammad Nauman, Nazneen Bangash Environmental Hazards of Cadmium: Past, Present, and Future, Pages 163-183// book Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation, 2019 Edited by: Mirza Hasanuzzaman, Majeti Narasimha Vara Prasad and Masayuki Fujita.

12. Панова Г.Г., Черноусов И.Н., Удалова О.Р. и др. Научно-технические основы круглогодичного получения высоких урожаев качественной растительной продукции при искусственном освещении// Доклады РАСХН. - 2015. - № 4. - С 17-21.

13. Горикова И. А., Гонзальский К. Б., Терехова В. А. Методика измерения токсичности почв по реакциям энхитреид. ФР.1.39.2014.18039. М., MDMprint, 2014. - С. 24.

14. Прохорова И. М., Фомичёва П. Н., Ковалёва М. И. Оценка митотоксического и мутагенного действия факторов окружающей среды // ЯрГУ: Методические указания. - Ярославль: ЯрГУ, 2003. - С. 23,26.

15. McGrath S.P., Zhao F.J., Dunham S.J., Crosland A.R., and Coleman K. (2000). Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. Journal of Environmental Quality, in press

16. Sanders, J.R., S.P. McGrath, and Adams T. McM. (1987). Zinc, copper and nickel concentrations in soil extracts and crops grown on four soils treated with metal-loaded sewage sludges. Environmental Pollution 44, 193-210

17. Sloan, J.J., Dowdy R.H., Dolan M.S., and Linden D.R. (1997). Long-term effects of biosolids applications on heavy metal bioavailability in agricultural soils. Journal of Environmental Quality 26, 966-974.

18. Verbruggen, N., Hermans, C., and Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. New Phytol. 181, 759-776.

19. S. Singh, P. Parihal, R.Singh, S.M.Prasad, V.P.Singh, Heavy Metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and Ionomics. Front. Plant Sci., 08 February 2016, 6, FEB2016, 1143 p.

20. Malik Tahir Hayat, Muhammad Nauman, Nazneen Bangash Environmental Hazards of Cadmium: Past, Present, and Future, Pages 163-183// book Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation, 2019 Edited by: Mirza Hasanuzzaman, Majeti Narasimha Vara Prasad and Masayuki Fujita.

21. H. Bashir, M. M. Ibrahim, R. Bagheri, J. Ahmad, I. A. Arif, M. Affan Baig, M. Irfan Qureshi Influence of sulfur and cadmium on antioxidants, phytochelatin and growth in Indian mustard *AoB PLANTS*, www.aobplants.oxfordjournals.org, 2015, 13 P.

22. Raf Dewil, Jan Baeyens, Joris Roels, and Boudewijn Van De Steene Distribution of Sulphur Compounds in Sewage Sludge Treatment Environmental Engineering Science Vol. 2008 25, No. 6 879-886.