УДК 631.427:574.24 DOI: 10.25680/S19948603.2026.151.18

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТКЛИК ПОЧВЕННОЙ СИСТЕМЫ МИКРОФЛОРА – ЭНХИТРЕИДЫ ПРИ СУБЛЕТАЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КАДМИЯ

А.П. Баранов, С.С. Ладан, к.б.н., Л.М. Бушина,
ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова,
e-mail: ecotox@vniia-pr.ru
127434, г. Москва, ул. Прянишникова 31а

Исследована возможность оценки токсического воздействия на организмы энхитреид (Enchytraeus albidus) по изменениям, возникающим в почве за 14 сут их жизнедеятельности. Определяли состав водной вытяжки и влагоёмкость почвенного образца после экспозиции: выявлено выраженное увеличение содержания нитратов при концентрации кадмия 50 и 100 мг/кг, в области летального воздействия. В сублетальной зоне последовательной связи содержания нитратов с концентрацией кадмия не установлено. Более устойчивой оказалась зависимость влагоёмкости: в незагрязнённых почвах присутствие энхитреид повышало её по сравнению с почвой без них, а с увеличением содержания кадмия этот эффект последовательно ослабевал. Установлены одинаковое направление реакции в супеси и суглинке и близкие коэффициенты корреляции ($r = -0,76$ и $r = -0,77$), показывающие воспроизводимость показателя в различных типах почв. Изменение влагоёмкости предложено рассматривать как самостоятельную прижизненную характеристику функционального состояния энхитреид, связанную с их двигательной активностью и биотурбацией почвы.

Ключевые слова: биотестирование, энхитреиды, микрофлора, кадмий, двигательная активность, биотурбация, влагоёмкость, сублетальная токсичность.

Для цитирования: *Баранов А.П., Ладан С.С., Бушина Л.М.* Функциональный отклик почвенной системы микрофлора – энхитреиды при сублетальном воздействии кадмия// Плодородие. – 2026. – №4. – С. 93-97.
DOI: 10.25680/S19948603.2026.151.18.

Современный подход к экологической оценке качества почвы ориентируется на биотические показатели. Биотестирование в этом случае даёт не химическое описание загрязнения, а реакцию живой системы на совокупность доступных форм загрязнителей и свойств матрицы [1].

Нормативная основа биотестирования на энхитреидах научно обоснована и разработана. В OECD 220 и ISO 16387 учитывают выживаемость взрослых особей и репродукцию, в ISO 18311 – потребление стандартной приманки почвенной фауной [2-4]. Эти показатели характеризуют прежде всего состояние организма. Изменения почвы, возникающие во время биотеста, не рассматриваются как самостоятельная конечная точка.

Оценка изменений почвы как конечной точки воздействия имеет экспериментальные аналоги. В лабораторном опыте такой подход был менее чувствительным к двум фунгицидам, чем тест по репродукции [5]. Действие другого фунгицида оценивали по минерализации органического вещества и выделению CO_2 [6]. При медном и тепловом стрессах присутствие энхитреид изменяло разложение растительных остатков, содержание водоэкстрагируемого углерода и экстрагируемого азота [7]. В данной работе проверен другой способ — по изменениям почвенной матрицы после короткой экспозиции.

Однако на величину такого отклика существенно влияет сама почва. При слабом диффузном загрязнении реакция *E. albidus* может в большей степени определяться свойствами природной почвы, чем самим загрязнителем [8]. Влажность прямо влияет на пищевую активность энхитреид [9]. Поэтому единичного выраженного тренда недостаточно для выбора универсального маркера: его нужно отделить от действия гранулометрического состава, органического вещества, pH, микрофлоры и исходного водного режима.

Визуальная оценка действия почвенной токсичности на энхитреид позволяет фиксировать изменения скорости движения организмов, окраски и размеров. Однако, при этом, в течении стандартного срока экспозиции, уровень выживаемости может оцениваться как 100%. Скопления энхитреид по краям сосудов, скученность, вялость, изменение амплитуды движений, тусклость окраски тела и другие качественные признаки бесспорно характеризуют жизнедеятельность организмов, однако практически не переводятся в количественную форму, а заметные изменения могут исчезать через несколько дней, при этом выживаемость в течение стандартного срока экспозиции может оставаться высокой. В OECD 220 двухнедельный срок отведён для диапазонно-устанавливающего этапа; окончательный тест продолжается 6 нед и оценивает репродукцию с расчётом ECx или NOEC [2]. Поэтому вопрос состоит не в том, действуют ли долетальные концентрации, а в величине воздействия и возможности определить, что живые тест-объекты уже находятся в токсической зоне.

Один из наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ) – кадмий, с коэффициентом биоаккумуляции на порядок выше других ТМ, в биотесте с энхитреидами достигает токсичности, соответствующей LD 50 (наиболее унифицированный и надежный показатель) только при содержании в почве концентрации 30-40 мг/кг, чрезвычайно редко встречающейся на практике даже в сегменте нарушенных почв. Разумеется, смертность остаётся главным нормативным показателем в токсикологии. Связь смертности и жизнедеятельности безусловна: смертность является естественным завершением биологического развития объекта и в этом смысле универсальна как конечная точка любого организма. Однако для оценки жизнедеятельности использование смертности столь же консервативно, как разрушающее исследование объекта. Она

устанавливает конечный результат, но не даёт знания о том, что происходит с живым организмом при сублетальных концентрациях, и о возможности его восстановления после прекращения воздействия. Особое значение такие концентрации приобретают при расчёте сочетанных интегральных индексов действия нескольких поллютантов.

Питание энхитреид представляет собой сложный биологический процесс и происходит постоянно. Поэтому продуктивность жизнедеятельности червей первоначально оценивали по тому, что может служить доказательством разрушения органического вещества, — по изменению содержания водорастворимых элементов. При стрессе организмы могут как усиливать, так и снижать интенсивность питания в зависимости от уровня и вида воздействия. Предполагалось, что при повышении содержания токсиканта жизнедеятельность червей в конечном итоге будет замедляться, а содержание водорастворимых элементов — снижаться.

Цель исследования – установить почвенный показатель, позволяющий оценить функциональное состояние живых энхитреид в сублетальной области токсичности.

Исходили из того, что признаки их жизнедеятельности должны проявляться в среде, где находится тест-объект. Оценивали две группы изменений почвенного образца после биотестирования: содержание водорастворимых элементов и влагоёмкость.

Методика. Применяли 14-суточную экспозицию, соответствующую диапазонно-устанавливающему этапу OECD 220 [2], с учётом положений ISO 16387 [3] и методики ФР.1.39.2014.18039. Исходную методику дополнили анализом почвы, оставшейся после экспозиции.

В опыте использовали две природные почвы, различавшиеся гранулометрическим составом, содержанием органического вещества и плотностью сложения (табл. 1). Сравнивали незагрязнённые варианты и серии искусственно загрязнённых образцов; совпадение направления изменений в двух почвах рассматривали как признак воспроизводимости отклика.

1. Некоторые параметры изучаемых почв

Почва	Гранулометрический состав	Органическое вещество, %	Насыпная плотность, г/см³	pH	ЕКО
А *	Супесь	3,1	1,30	7,1	18,6
Б **	Суглинок	1,3	1,20	7,6	22,4

* Почва А – образцы из опыта по внесению компостов осадков сточных вод Института органических удобрений и торфа (г. Владимир). ** Почва Б – образцы полевого опыта ЦОС ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (Московская обл.).

Искусственное загрязнение проводили сульфатом кадмия (Экотек, ACS, ≥99,0%) и хлорпирифосом ($C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$; O-(3,5,6-трихлорпиридил-2)-O,O-диэтилтиофосфат). В сравнительном опыте использовали 50 мг Cd/кг и 2 мг хлорпирифоса/кг. В опыте применяли следующие дозы кадмия – 0; 0,5; 1,0; 5,0; 25,0; 50,0 и 100,0 мг/кг. Загрязнённые образцы кондиционировали в течение одного месяца.

Для оценки вклада микрофлоры проводили экспозицию с энхитреидами в условно стерилизованной почве (нагрев увлажненной почвы в чашках Петри в течение 1 ч) и в почве с естественным микробным сообществом. Это сравнение позволяло оценить её вклад. Перед внесением энхитреид почву кондиционировали не менее 5 сут, необходимых для развития микрофлоры, служащей элементом их питания.

Варианты первого опыта (анализ водной вытяжки после 14 сут):

1. Почва до биотестирования.

2. Почва после 14 сут экспозиции без энхитреид – оценка изменений, связанных преимущественно с микрофлорой.

3. Условно стерилизованная почва с энхитреидами – оценка изменений при уменьшенном микробном вкладе.

4. Незагрязнённая почва с микрофлорой и энхитреидами – контроль биотеста.

5. Почва с микрофлорой, энхитреидами и кадмием, 50 мг/кг.

6. Почва с микрофлорой, энхитреидами и хлорпирифосом, 2 мг/кг.

В водной вытяжке определяли нитраты, сульфаты, аммоний, калий, кальций и магний. Отдельный опыт со шкалой концентраций кадмия проводили на почве Б. Вариант без энхитреид поставлен для незагрязнённой почвы; при каждой концентрации токсиканта парного варианта без энхитреид не было.

Анионы определяли по ПНД Ф 16.1:2:2:2:2.3.69-10, катионы – по ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.74-2012, органическое вещество – по ГОСТу 26213-2021.

Для опыта с влагоёмкостью все образцы до внесения энхитреид упаковывали с одинаковой плотностью 0,9 г/см³ – эмпирически установленной величиной, соответствующей максимальной двигательной активности энхитреид. После завершения 14-суточной экспозиции энхитреиды удаляли, образцы почвы доводили до воздушно-сухого состояния, после чего определяли влагоёмкость методом капиллярного насыщения в трубках [12].

Статистическую обработку результатов проводили с помощью MS Excel 2003 и STATISTICA 6.0. Определяли средние величины (M), стандартную ошибку среднего (m) и коэффициент корреляции Пирсона. Принятый уровень значимости p = 0,05; число повторностей n = 5.

Результаты и их обсуждение. Связь загрязнения почвы с активностью энхитреид оценивали по образцу, оставшемуся после биотестирования. В 20 г почвы находились 10 взрослых *E. albidus* общей массой 30–40 мг, а плотность тест-культуры более чем на порядок превышала естественную. В таких условиях результат жизнедеятельности энхитреид хорошо заметен, и вопрос состоял в том, можно ли выразить его численно.

При оценке водорастворимых форм необходимо учитывать трофические связи *E. albidus* с микрофлорой. Этот вид сочетает признаки первичного и вторичного деструкторов [10, 11]. Разложение органического углерода в почве происходит главным образом в результате деятельности бактерий и грибов; непосредственно с деятельностью фауны может быть связано 10–15% почвенного углеродного потока. Поэтому изменения водорастворимых элементов характеризуют совместную деятельность микрофлоры и животных, а не только активность энхитреид.

В первом опыте содержание органического вещества после экспозиции находилось в пределах 3,1–3,4% (табл. 2). Для короткого опыта и применённого метода этой разницы недостаточно, чтобы использовать содержание органического вещества как чувствительную конечную точку. Вместе с тем, структура образца визуально изменялась.

2. Изменение органического вещества и водорастворимых элементов (первый опыт)

Вариант	Биота	Загрязнение, мг/кг	Органическое вещество, %	NH_4^+	K	Ca	NO_3^-	Mg	SO_4^{2-}
				мг/кг*					
1. Почва до биотестирования	-	-	3,4 ± 0,21	2,2 ± 0,11	3,1 ± 0,33	28,4 ± 3,44	45,1 ± 6,21	10,8 ± 1,43	9,1 ± 1,43
2. Почва без энхитреид (экспозиция)	Микро-флора	-	3,4 ± 0,24	2,0 ± 0,12	6,1 ± 0,39	15,8 ± 2,52	17,7 ± 4,87	5,0 ± 1,67	5,5 ± 0,63
3. Условно стерилизованная почва с энхитреидами	Энхитреиды	-	3,2 ± 0,17	2,1 ± 0,11	41,3 ± 5,11	21,6 ± 2,25	26,5 ± 5,32	7,4 ± 1,22	7,6 ± 1,04
4. Биотест с энхитреидами	Микро-флора + энхитреиды	-	3,2 ± 0,21	1,7 ± 0,21	24,8 ± 4,01	17,3 ± 2,54	15,4 ± 2,33	5,5 ± 1,46	5,1 ± 0,54
5. Биотест + кадмий		Cd 50	3,1 ± 0,14	1,8 ± 0,18	49,8 ± 3,11	20,2 ± 1,98	49,5 ± 4,35	6,3 ± 1,87	5,7 ± 0,42
6. Биотест + хлорпирифос		хлорпирифос 2	3,2 ± 0,21	1,7 ± 0,16	22,4 ± 4,30	19,7 ± 1,76	47,4 ± 4,11	6,5 ± 0,78	5,4 ± 1,22

*M ± m; m – стандартная ошибка среднего; n = 5.

Наиболее значительными были колебания содержания нитратов (15,4–49,5 мг/кг) и калия (3,1–49,8 мг/кг). Содержание нитратов снижалось от исходных 45,1 до 17,7 мг/кг в почве без энхитреид и до 15,4 мг/кг (вар. 4). По одному конечному определению нельзя установить, каким именно процессом вызвано это снижение.

Сложность отделения деятельности энхитреид от деятельности микрофлоры состоит в том, что эти процессы не синхронны и по-разному зависят от доз. Поэтому ожидаемая общая тенденция проявилась только на высоких уровнях загрязнения; возможно, чувствительности химического анализа для сублетальной области оказалось недостаточно.

В вариантах с кадмием и хлорпирифосом концентрация нитратов увеличилась до 49,5 и 47,4 мг/кг соответственно. Результат не соответствовал первоначальному ожиданию, при котором подавление жизнедеятельности энхитреид уменьшит выход азота в раствор. В отсутствие варианта «загрязнённая почва без энхитреид» эти значения характеризуют суммарную реакцию тест-системы.

В первом опыте изменение содержания нитратов стало заметно при высокой токсической нагрузке. Поэтому эффект проверили во втором опыте со шкалой последовательных концентраций кадмия.

Более чем 10-кратное увеличение водорастворимого калия в отдельных вариантах первого опыта связано, по-видимому, не только с органическим веществом, но и с обменным калием. Различия между почвами затрудняют использование калия как универсального маркера.

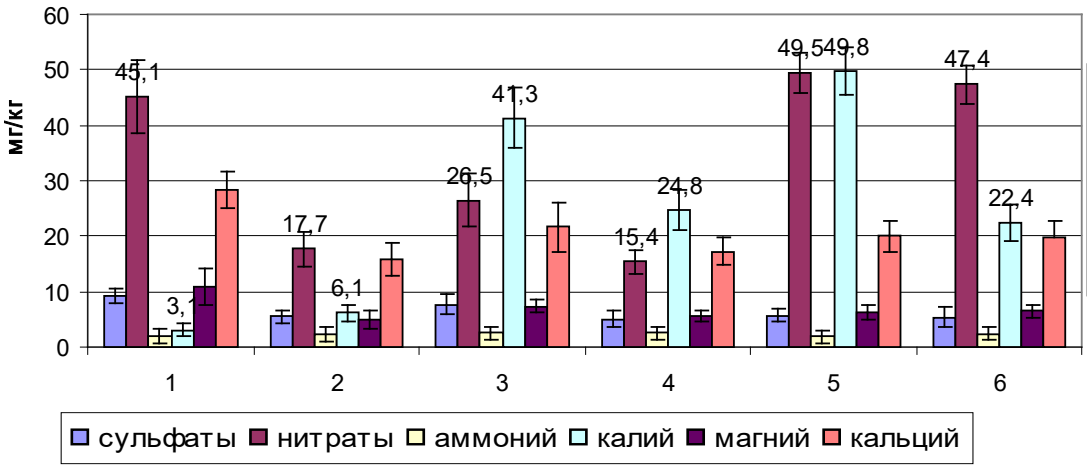


Рис. 1. Водорастворимые элементы в почве А по вариантам первого опыта.
По оси X – варианты 1-6; по оси Y – концентрация в водной вытяжке

На рисунке 1 нитраты наиболее высокие в двух загрязнённых вариантах. В вариантах 2-4 их содержание ниже исходного. Сравнение вариантов 2 и 3 показывает, что микрофлора заметно влияет на конечную концентрацию, но разная подготовка почвы не позволяет количественно свести этот вклад к одной величине.

Единой реакции всех определяемых элементов не получено (табл. 3, рис. 2). Содержание кальция и сульфатов возрастало до средней части дозового ряда, затем снижалось; концентрация калия оставалась низкой. Состав водной вытяжки отражал одновременное изменение нескольких растворимых и обменных пулов.

Содержание водорастворимого калия оказалось нестабильным в разных почвах (рис. 1, 2). В почве Б его концентрация была ниже концентраций большинства определённых ионов и не возрастала с токсической нагрузкой. Следовательно, непосредственной связи этого показателя с разрушением органического вещества не выявлено.

Для нитратов получена другая картина. Их содержание составляло 0,71; 1,43; 2,15; 1,89; 1,64; 7,45 и 8,11 мг/кг при концентрациях 0; 0,5; 1,0; 5,0; 25,0; 50,0 и 100,0 мг Cd/кг. До 1,0 мг/кг наблюдалось увеличение, затем показатель снижался. Выраженный подъём возникал только при концентрациях кадмия 50 и 100 мг/кг.

3. Содержание водорастворимых элементов в почве Б (второй опыт) на фоне шкалы концентраций кадмия

Cd, мг/кг	Выживаемость, %	Органическое вещество, %	pH	K	Na	Mg	Ca	SO_4^{2-}	NO_3^-
				мг/кг					
0	100	1,8	7,7	1,42	5,01	1,87	11,74	4,46	0,71
0,5	100	1,7	7,8	1,75	4,33	2,45	12,88	6,87	1,43
1,0	100	1,8	7,6	1,97	3,88	2,49	14,80	7,67	2,15
5,0	98,5	1,5	7,7	1,64	4,34	3,47	18,24	10,78	1,89
25,0	79,8	1,8	7,7	1,76	2,61	2,23	19,17	10,99	1,64
50,0	72,9	2,10	7,6	1,27	2,69	1,96	11,42	7,49	7,45
100,0	4,8	2,19	7,6	1,11	5,45	1,38	10,33	6,86	8,11

Средние значения; n = 5.

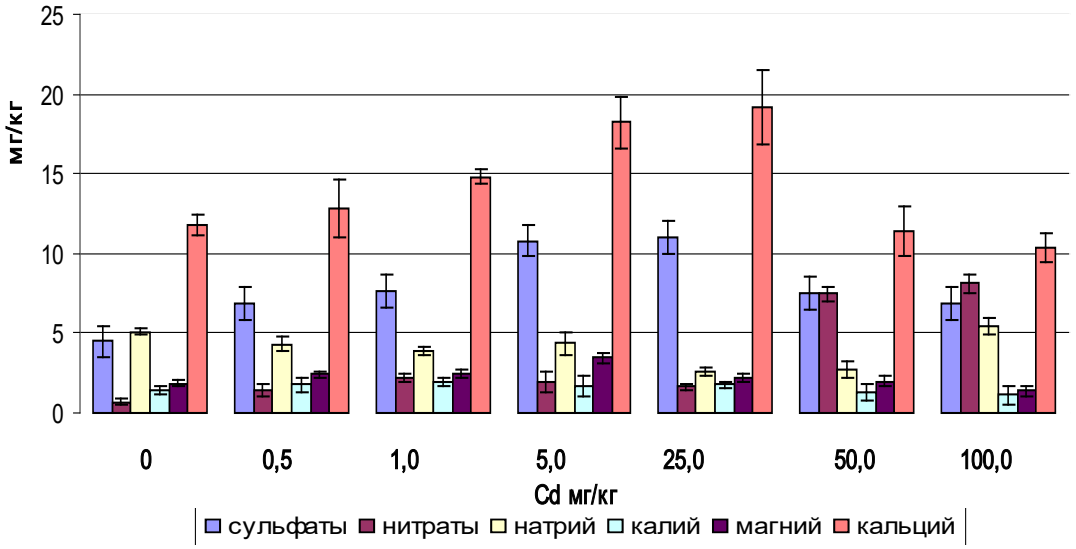


Рис. 2. Водорастворимые элементы в почве Б на фоне 0; 0,5; 1,0; 5,0; 25,0; 50,0 и 100,0 мг Cd/кг.
По оси Y – концентрация в водной вытяжке

При расчёте по всей шкале корреляция средних была высокой (r = 0,91; p = 0,004; n = 7), однако её величина определялась двумя верхними уровнями. В диапазоне 0–25 мг Cd/кг связь отсутствовала (r = 0,17; p = 0,78; n = 5). Нитраты, таким образом, не подтвердились как самостоятельный показатель сублетального токсического действия.

В процессе опытов с энхитреидами всегда хорошо заметна изменённая структура поверхности почвенного образца. Энхитреиды выделяют большое количество слизи, перемешивают почву [10], а образование копролитов увеличивает количество микрокомочков. Поэтому логичным было бы искать способ измерения именно этих изменений. Такой способ связывали с изменением влагоёмкости. Ожидалось, что усиление действия кадмия приведёт к снижению биотурбации и жизнедеятельности энхитреид, что отразится и на влагоёмкости. Вопрос о влиянии гранулометрического состава почвы на величину этой реакции оставался открытым.

Показателем функционального состояния энхитреид является их двигательная активность. Перемещение между слоями приводит к биотурбации. Усиление или снижение перемешивания напрямую влияет на количество ходов и выделяемой слизи, изменяет микроструктуру образца и его влагоёмкость. Поэтому влагоёмкость характеризует суммарный результат прижизненной деятельности энхитреид за время экспозиции.

4. Влагоёмкость почвенных образцов после 14-суточной экспозиции, %

Почва	Уровни искусственного загрязнения кадмием (с энхитреидами), мг/кг							
	0, без энхитреидов	0	0,5	1,0	5,0	25,0	50,0	100,0
А	33,4 ± 0,6	52,4 ± 0,98	49,8 ± 1,5	39,7 ± 1,9	38,0 ± 0,4	37,7 ± 0,5	37,3 ± 1,3	36,9 ± 2,0
Б	42,5 ± 2,3	66,3 ± 1,7	59,6 ± 0,8	55,8 ± 1,6	49,9 ± 0,6	47,4 ± 0,4	47,2 ± 1,0	45,2 ± 1,7

Примечание. Уровни 50 и 100 мг Cd/кг сопровождались выраженным летальным действием. M ± m; n = 5.

В незагрязнённой почве энхитреиды повышали среднюю влагоёмкость как в почве А так и в почве Б (табл. 4). По мере увеличения концентрации кадмия значения последовательно снижались. Уже при 0,5; 1,0 и 5,0 мг Cd/кг выживаемость в почве Б составляла 100; 100 и 98,5%, тогда как влагоёмкость снизилась. Таким образом, живые тест-объекты уже находились в зоне токсического воздействия, хотя выраженная смертность ещё отсутствовала.

Для обеих почв установлено последовательное снижение влагоёмкости с повышением содержания кадмия. Коэффициенты корреляции составили r = −0,76 для почвы А и r = −0,77 для почвы Б. Воспроизводимость показателя доказывает возможность его применения для разных типов почв: направление измеряемой реакции одинаково, а близость коэффициентов корреляции показывает, что влагоёмкость изменяется в достаточной мере, несмотря на разную исходную величину. Для установления вклада типа почвы необходимы отдельные опыты.

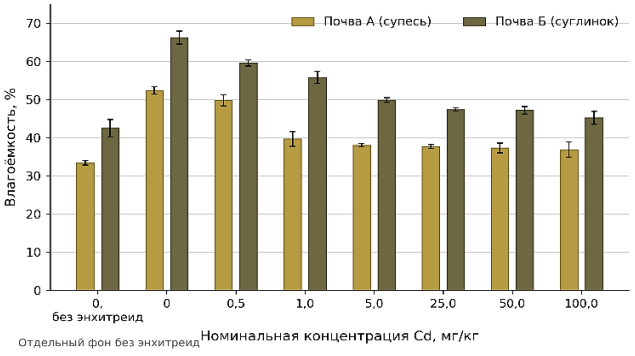


Рис. 3. Влагоёмкость почв А и Б после 14-суточной экспозиции при разных концентрациях кадмия. Отдельный фон – незагрязнённая почва без энхитреид. M ± m; n = 5

Исследование системы ходов энтихреидов возможно с помощью визуализации на специальных плёнках и компьютерной томографии. Однако результат зависит от места разреза почвенного образца, а количество ходов и площадь окрашенных ареалов требуют пересчёта с учётом размеров тест-объектов и последующего нормирования. Компьютерная томография доступна не всем лабораториям. Определение влагоёмкости является простым наглядным анализом, непосредственно характеризующим состояние исследуемых объектов.

Влагоёмкость не должна рассматриваться как дополнение к показателю смертности. Она должна изучаться самостоятельно и подробно, потому что появляется возможность характеризовать живые тест-объекты по результатам их прижизненной деятельности. В опытах с энхитреидами – это способ оценить функциональное состояние живых организмов, а не констатировать их смертность.

Выводы. 1. Сублетальные концентрации, бесспорно, действуют на организм любого тест-объекта. Вопрос состоит в величине этого воздействия и дозировке. Смертность остаётся главным нормативным и универсальным показателем, но она не позволяет получить знание о действии сублетальных концентраций и функциональном состоянии живых организмов.

2. Изменение водорастворимых элементов отражало процессы, происходящие в почве при участии энхитреид и микрофлоры, однако устойчивой дозозависимой реакции в сублетальной области не получено. Нитраты не подтвердились как самостоятельный показатель сублетального токсического действия.

3. Изменение влагоёмкости обеих почв имело одинаковое направление при повышении содержания кадмия. Показатель характеризует прижизненный результат двигательной активности и биотурбации энхитреид и должен изучаться самостоятельно для оценки их функционального состояния. Воспроизводимость реакции подтверждает возможность применения показателя для разных типов почв; вклад конкретного типа почвы в величину реакции требует специальных опытов.

Литература

1. *Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская Е.В., Кирюшина А.П.* Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2023. – № 2. – С. 35–45. https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45

2. OECD. Test No. 220: Enchytraeid Reproduction Test. Paris: OECD Publishing, 2016. 24 p. https://doi.org/10.1787/9789264264472-en

3. ISO 16387:2023. Soil quality — Effects of contaminants on Enchytraeidae (Enchytraeus sp.) — Determination of effects on reproduction. Geneva: ISO, 2023. https://www.iso.org/standard/79815.html

4. ISO 18311:2016. Soil quality — Method for testing effects of soil contaminants on the feeding activity of soil dwelling organisms — Bait-lamina test. Geneva: ISO, 2016. https://www.iso.org/standard/62102.html

5. *Bart S., Roudine S., Amossé J., Mougin C., Péry A.R.R., Pelosi C.* How to assess the feeding activity in ecotoxicological laboratory tests using enchytraeids? // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25, No. 34. P. 33844–33848. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1701-3

6. *Pelosi C., Thiel P., Bart S., Amossé J., Jean-Jacques J., Thoisy J.-C., Crouzet O.* The contributions of enchytraeids and earthworms to the soil mineralization process in soils with fungicide // Ecotoxicology. 2021. Vol. 30, No. 9. P. 1910–1921. https://doi.org/10.1007/s10646-021-02452-z

7. *Liu M., Hu Z., Yao J., Chen X., Griffiths B., Hu F.* After-life legacy effects of enchytraeids increase the functional capability of arable soil following stress // Biology and Fertility of Soils. 2022. Vol. 58, No. 6. P. 721–732. https://doi.org/10.1007/s00374-022-01657-6

8. *Chacon-Hurtado J.A., Faburé J., Sereni L., Nélieu S., Cheviron N., Delarue G., Baudry E., Lamy I.* Interpretation of ecotoxicity tests using Enchytraeus albidus: Weight of soil characteristics in conditions of diffuse pollution // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025. Vol. 292. Art. 117986. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117986

9. *Dell'Ambrogio G., Campiche S., Wong J.W.Y., Renaud M., Lüthi C., Werner I., Ferrari B.J.D.* Feeding activity of Eisenia andrei and Enchytraeus albidus under different soil moisture regimes assessed by the bait-lamina test // PLOS ONE. 2026. Vol. 21, No. 4. e0328342. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0328342

10. *Serbource C., Sammartino S., Cornu S., Papillon J., Adrien J., Pelosi C.* Enchytraeids: Small but important ecosystem engineers // Geoderma. 2025. Vol. 453. Art. 117150. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117150

11. *Gajda Ł., Daszkowska-Golec A., Świątek P.* Trophic position of the white worm (Enchytraeus albidus) in the context of digestive enzyme genes revealed by transcriptomics analysis // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, No. 9. Art. 4685. https://doi.org/10.3390/ijms25094685

12. *Сахабиев И.А., Гиниятуллин К.Г., Кадырова Р.Г.* Полевые методы исследования физических свойств почв: учебно-практическое издание. Казань: Казанский университет, 2022. – 36 с. https://kpfu.ru/staff_files/F1756210915/Polevye_metody_fiziki_pochv__metodichka_kaf_pochvovedeniya.pdf

FUNCTIONAL RESPONSE OF THE SOIL MICROFLORA–ENCHYTRAEID SYSTEM UNDER SUBLETHAL CADMIUM EXPOSURE

The study examined whether toxic effects on living Enchytraeus albidus could be assessed from changes produced in soil during 14 days of activity. Water-extractable elements and soil water-holding capacity were determined after exposure. Nitrate concentrations showed no consistent relationship with cadmium in the sublethal range; a pronounced increase was recorded only at 50 and 100 mg Cd/kg. This reflected the asynchronous and dose-dependent joint activity of soil microflora and enchytraeids. Water-holding capacity showed a more consistent relationship. In uncontaminated soils, enchytraeids increased water-holding capacity relative to soil without animals, whereas this effect progressively weakened as cadmium concentrations increased. The same direction of response in sandy loam and loam, together with similar correlation coefficients (r = −0.76 and r = −0.77), demonstrates reproducibility despite different initial water-holding capacities. The change in water-holding capacity is considered an independent, non-lethal characteristic of the functional state of enchytraeids, related to their locomotor activity and soil bioturbation.

Keywords: biotesting, enchytraeids, microflora, cadmium, locomotor activity, bioturbation, water-holding capacity, sublethal toxicity.