УДК 582.284: 577.151.52 DOI: 10.5281/zenodo.17200095 EDN: KYADEW

ВЛИЯНИЕ КУЛЬТУРАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ ГРИБА *T. HIRSUTA* TH-11 НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОРОСТКОВ *BRASSICA JUNCEA* L. В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ИОНАМИ КАДМИЯ

© **2025.** ***О. В. Фрунзе***

Исследовали влияние прикорневой подкормки органическим удобрением, полученным в результате биоконверсии лигноуглеводного компонента пшеничной соломы, на морфометрические показатели роста проростков *Brassica juncea* L., произрастающих в почве, загрязненной ионами кадмия. Проведена оценка ростстимулирующего и протекторного влияния внесения в почву культуральной жидкости гриба *Trametes hirsuta* Th-11 в качестве органического удобрения на длину корня и стебля, а также на накопление сухой биомассы проростков *Brassica juncea* L. Был определен защитный эффект культуральной жидкости *Trametes hirsuta hirsuta* Th-11 на ростовые показатели растений в условиях загрязнения почвы ионами кадмия. Установлено, что возможность использования биоудобрений, которые получены с помощью биоконверсии растительных отходов, повышает продуктивность и плодородие почв техногенных территорий, загрязненных ионами кадмия.

Ключевые слова: *Trametes hirsuta* Th-11, морфометрические показатели; биоконверсия; культуральная жидкость.

Введение. Загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) стало глобальной проблемой XXI века, затрагивающей практически все компоненты биосферы – почву, воду, атмосферу, а через них и биоту, включая растения, животных и человека. Тяжёлые металлы, в отличие от органических загрязнителей, не подвержены биологическому разложению и могут сохраняться в экосистемах в течение десятилетий, накапливаясь и распространяясь по трофическим цепям. Их воздействие на растительные организмы представляет собой особый интерес, так как именно растения выступают первыми индикаторами загрязнения [1].

Основными антропогенными источниками поступления кадмия и других ТМ в окружающую среду являются: выбросы металлургических заводов и шахт по добыче рудных минералов; сточные воды предприятий гальваники, кожевенной и текстильной промышленности; использование пестицидов, удобрений, осадков сточных вод в сельском хозяйстве; сжигание углеводородного топлива, в том числе в автомобильном транспорте; неправильное управление промышленными и бытовыми отходами [2, 3].

Кадмий является для растений одним из наиболее токсичных тяжелых металлов. Возрастание его содержания в почве, связанное с хозяйственной деятельностью человека, сопровождается значительным увеличением количества токсичных ионов в растениях, что оказывает отрицательное воздействие на многие стороны их жизнедеятельности. Не случайно исследованию влияния кадмия на растения посвящено довольно большое число работ [4].

Токсичность кадмия для растений проявляется в нарушении активности ферментов, торможении фотосинтеза, нарушении транспирации, а также ингибировании восстановления NO_2 до NO. Кроме того, в метаболизме растений он является антагонистом ряда элементов питания (Zn, Cu, Mn, Ni, Se, Ca, Mg, P). При токсичном воздействии металла у растений наблюдаются задержка роста, повреждение корневой системы и хлороз листьев. Ионы кадмия беспрепятственно поступают из почвы и атмосферы в растения. По фитотоксичности и способности накапливаться в растениях в ряду ТМ он занимает первое место (Cd>Cu>Zn>Pb) [4].

Одним из методов повышения продуктивности и биологической активности деградированных почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, является применение биоудобрений, полученных в результате твердофазного культивирования некоторых штаммов ксилотрофных базидиомицетов [5, 6]. Внедрение «зеленой» технологии минимизирует воздействие на почву антропогенных факторов и повышает качество пищевой продукции. Выделение экономически выходных и экологически безопасных стимуляторов роста для растений является приоритетной задачей, решением которой занимаются ученые всего мира [7]. Известно, что регуляторы роста растений, которые получены при культивировании базидиомицетов, в значительной степени повышают устойчивость растений к различным патогенам, они способны нарушать жизнедеятельность вредных микроорганизмов [8–10]. Биологически активные вещества базидиомицетов могут включать в свой состав ферменты, гормоны, аминокислоты, липиды, олигосахариды, органические кислоты и другие вещества, которые оказывают стимулирующий эффект на рост и развитие растений, повышают их иммунитет и устойчивость к токсичному влиянию ионов тяжелых металлов [11, 12].

Цель работы – оценка протекторного влияния внесения в почву культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 в качестве органического удобрения на морфометрические показатели проростков некоторых видов сельскохозяйственных технических культур в условиях загрязнения почвы ионами кадмия.

Материал и методика исследования. В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы проростки *Brassica juncea* L. В работе использовали штамм *T. hirsuta* Th-11, который был выделен в чистую культуру из плодовых тел, собранных в 2011 г. на пне лиственного дерева (вероятно, рода Populus) на территории г. Донецка и депонирован в Коллекции культур шляпочных грибов (IBK) под номером 2429. Штамм культивировали на жидкой среде Чапека следующего состава (г/л): $NaNO_3$ – 2, K_2HPO_4 – 1, $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 0,5, KCl – 0,5, $FeSO_4 \times 7H_2O$ – 0,01 [13]. Кислотность питательной среды доводили до значений pH 4,8 с помощью 10 %-го раствора HCl. Питательную среду разливали по 50 мл в колбы Эрленмейера объемом 100 мл, вносили 1,5 г воздушно-сухой пшеничной соломы, предварительно измельченной до конечного размера частиц 0,5–0,7 см, и стерилизовали в автоклаве при 0,8 атм в течение 40 минут. Штаммы *T. hirsuta* Th-11 культивировали в течение 30 суток при температуре 32 ºС в статических условиях. По окончании культивирования гриба отделяли культуральную жидкость от субстратно-мицелиальной смеси путем фильтрования [14].

Для изучения влияния прикорневой подкормки исследованного органического удобрения на морфометрические показатели роста сельскохозяйственных технических растений использовали метод почвенных культур. Семена рапса проращивали, учитывая их биологические особенности. Растения выращивали на протяжении 30 дней при следующих условиях: продолжительность светового – дня 14 часов, температура выращивания – 20–22 ºС, влажность почвы – 70 % от полной влагоёмкости. В каждый сосуд вносили по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм.

Исследования проводили по схеме полного двухфакторного трехуровневого эксперимента (табл. 1).

В качестве загрязнителя использовали нитрат кадмия по стехиометрическому отношению. Концентрации кадмия составляли 0, 1 ПДК, 2 ПДК.

Таблица 1

Схема эксперимента

Вариант	$Cd(NO_3)_2 \times 4H_2O$, мг/кг (в перерасчете на Cd^{2+})	Ростактивирующие вещества, %
1	0 (контроль)	0 (контроль)
2	0,5 (1 ПДК)	–
3	1 (2 ПДК)	–
4	0,5 (1 ПДК)	15 % КЖ (культуральная жидкость)
5	1 (2 ПДК)	15 % КЖ (культуральная жидкость)
6	0,5 (1 ПДК)	15 % ГН (гумат натрия)
7	1 (2 ПДК)	15 % ГН (гумат натрия)

На 5-е сут. выращивания растений (при появлении 1-го листа) проводили прикорневое внесение культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 и гумата натрия (номер государственной регистрации 247-18-669-1 изготовитель ООО «Биофит») в концентрации 15 %. В качестве контрольных показателей использовали растения, произрастающие в почве без добавления ионов кадмия и ростактивирующих веществ. На 30-е сутки роста у проростков проводили измерения длины корней и стеблей, а также определяли их сухую массу гравиметрическим методом. Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специальных компьютерных программ по методу Даннета.

Анализ результатов. Исследования показали, что при внесении в почву 1 ПДК ионов кадмия длина корня проростков *Brassica juncea* L. уменьшилась на 20 %, при увеличении концентрации ионов кадмия до 2 ПДК, длина корня проростков уменьшилась практически в три раза (вариант 2, 3). Это объяснимо, что кадмий обладает высокой токсичностью по отношению к растительным организмам, а физиологическая роль данного металла для растений еще не изучена. В условиях внесения в почву 15 %-го раствора гумата натрия загрязнение почвы 1 ПДК и 2 ПДК кадмия практически не оказывало ингибирующего влияния на рост корней, данный показатель был ниже контрольного на 4-5%, однако эти изменения были статистически недостоверными (таблица 2). При прикорневой подкормке проростков 15 %-ным раствором культуральной жидкости, в условиях загрязнения почвы 1 ПДК кадмия была отмечена активация роста корней проростков на 9 %, однако, при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК дли корня уменьшилась до уровня контроля. Таким образом, прикорневое внесение 15 %-го раствора культуральной жидкости оказывает благоприятное действие на рост корней проростков, что лежит в основе реализации их защитного эффекта в отношении стрессовых факторов, к числу которых относится токсическое воздействие ионов тяжелых металлов.

Таблица 2

Влияние внесения в почву ростстимулирующих веществ на морфометрические показатели проростков (*Brassica juncea* L.)

№ варианта	Длина проростка, см					
	Корень			Стебель		
	M ± m	D	$D^{\%}$	M ± m	D	$D^{\%}$
1	4,58±0,82	–	–	5,00±0,82	–	–
2	3,67±0,08	-0,91	80	2,45±0,05	-4,55	49
3	1,50±0,46	-3,08	33	4,25±0,63	-2,75	85
4	4,33±0,33	-0,25	95	5,63±0,7	0,63	113
5	4,38±0,80	-0,21	96	5,95±1,13	0,95	119
6	5,00±0,35	0,42	109	5,38±0,43	0,38	108
7	4,25±0,32	-0,33	97	4,00±1,05	-1,00	80

Примечание: D – разница между средними; $D^{\%}$ – процентное соотношение

При внесении в почву 1 ПДК кадмия длина стебля проростков уменьшилась практически в два раза (вариант 2). При увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК длина стебля проростков уменьшилась на 25 % в сравнении с растениями, произрастающими в незагрязненной почве. Визуально токсичное влияние ионов кадмия на растения выражалось в торможении развития проростков и некрозах (рис. 1).

Рис. 1. Проростки *Brassica juncea* L. В условиях внесения в почву ионов кадмия и ростстимулирующих веществ

При внесении в почву 15 %-го раствора гумата натрия в условиях загрязнения почвы 1 ПДК кадмия (вариант 6) длина стебля проростков увеличилась на 8 %, в сравнении с контролем, а при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК мы наблюдали достоверное снижение роста надземной части на 20 %, что подтверждает высокую токсичность кадмия. В условиях прикорневой подкормки проростков 15 %-ным раствором культуральной жидкости при загрязнении почвы 1 ПДК кадмия длина стебля проростков увеличилась на 13 % в сравнении с контролем, а при увеличении концентрации ионов кадмия до 2 ПДК длина стебля проростков увеличилась на 19 %. Визуально так же была отмечена активация роста надземной части растений, даже при высоких концентрациях поллютанта, повреждений листовых пластинок, хлорозов отмечено не было (см. рис. 1).

Одним из показателей биологической эффективности ростстимулирующих веществ является их влияние на накопление биомассы проростками (рис. 2).

Исследования показали, что при загрязнении почвы 1 ПДК кадмия биомасса проростков *Brassica juncea* L. уменьшилась на 21 %, а при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК накопление сухой массы проростками уменьшилось практически в 4 раза. При прикорневом внесении в почву 15 %-го раствора гумата натрия в условиях загрязнения 1 ПДК кадмия биомасса проростков снизилась на 6,5 % в сравнении с контролем. При увеличении концентрации поллютанта до 2 ПДК показатель биомассы проростков уменьшился на 7,8 % в сравнении с контролем, но данные изменения не были статистически достоверными. При внесении в почву 15 %-го раствора культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 в условиях загрязнения 1 ПДК кадмия биомасса проростков была меньше контрольного показателя на 5,3 %, при увеличении концентрации ионов кадмия до 2ПДК биомасса проростков снизилась на 6,3 %, в сравнении с растениями, произрастающими на незагрязненной почве без внесения ростстимулирующих веществ.

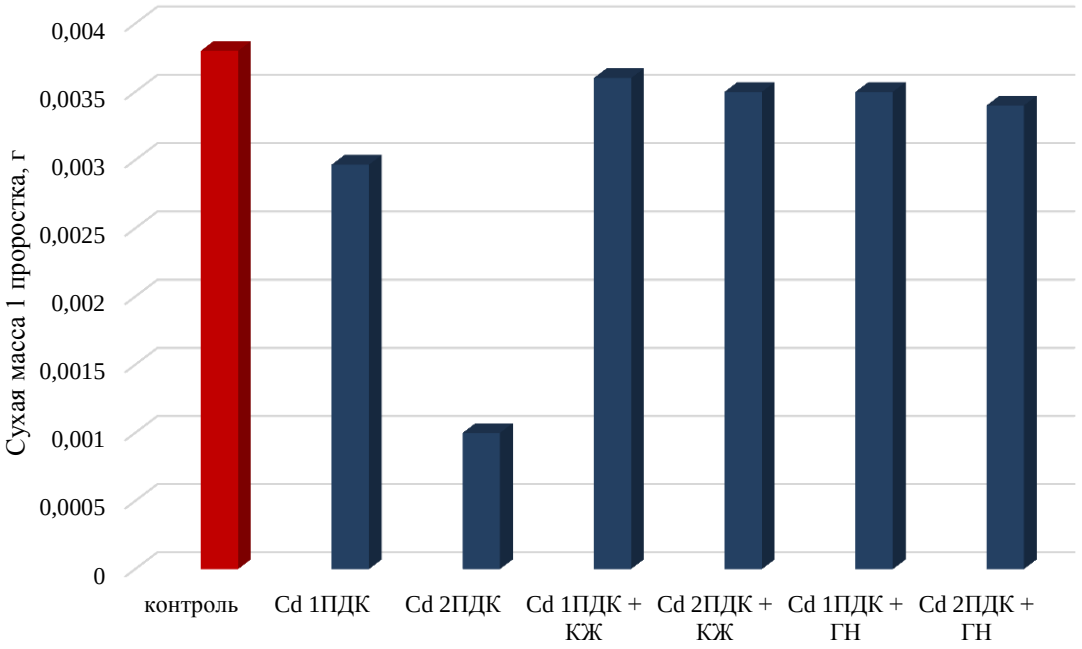

Рис. 2. Влияние внесения в почву ростстимулирующих веществ на биомассу проростков *Brassica juncea* L.

Выводы. Таким образом, внесение в почву 15 %-го раствора культуральной жидкости гриба *Trametes hirsuta* Th-11 стимулирует ростовые показатели длины корня и стебля проростков *Brassica juncea* L., подобная тенденция прослеживается и в накоплении биомассы проростками. Положительный эффект культуральной жидкости *T. hirsuta* Th-11 на ростовые показатели растений статистически сравним с ростостимулирующим влиянием гумата натрия сходной концентрации, что нам позволяет рекомендовать использование культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 для повышения устойчивости растений, произрастающих в почвах техногенных территорий, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Биологические способы переработки растительных отходов агропромышленного комплекса» (№ госрегистрации 124012400346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасова, А. С. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса / А. С. Алемасова, А. И. Сафонов, А. С. Сергеева // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Материалы международной научной конференции, Киров, 16-18 апреля 2019 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 60-65.
2. Сафонов А.И. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса / А.И. Сафонов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 96–100.
3. Фрунзе О.В. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений / О.В. Фрунзе // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26. – № 6. – С. 92–98. – DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98.
4. Фрунзе О.В. Сорбционная способность некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами кобальта и кадмия / О.В. Фрунзе, О.С. Горецкий // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 58-64.

5. Ферментативная активность ксилотрофных базидиомицетов при твердофазном культивировании / Д. Ю. Ильин, Г. В. Ильина, Ю. С. Лыков, М. И. Морозова // Агрономия: Нива Поволжья. – № 2 (23). – 2012. – С. 27-31
6. Концепция обращения с отходами производства и потребления в Донецкой Народной Республике. – Донецк, 2021. – 149 с.
7. Тенденции в развитии о способах утилизации коры и прутково-древесных отходов длительного хранения (обзорная статья) / В.В. Володин, А.А. Шубаков, С.О. Володина и др. // Аграрная наука Европы-Северо-Востока. – 2022. – №23(5). – С. 611-632. – DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632.
8. Линник П.Н. Методические особенности исследования гумусовых веществ в природных поверхностных водах / П.Н. Линник, Я.С. Иванечко, Р.П. Линник, В.А. Жежеря // Химия и технология воды – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 533-550.
9. Wendiro D. Identifying indigenous practices for cultivation of wild saprophytic mushrooms: responding to the need for sustainable utilization of natural resources / D. Wendiro, A.P. Wacoo, G. Wise // Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine. – 2019. – P. 15-64. – DOI: DOI: 10.1186/s13002-019-0342-z.
10. Сафонов М.А. Комплексы дереворазрушающих базидиомицетов пойменных лесов Южного Предуралья (Оренбургская область) / М.А. Сафонов // Успехи современного естествознания. – 2015. – № (8). – С. 62-65.
11. Мухин В.А. Биота ксилотрофных базидиомицетов Западно-Сибирской равнины. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 232 с.
12. Миколиз древесины, его продукты и их использование. Экологические аспекты микологического разрушения древесины. / Г.Н. Кононов, А.Н. Веревкин, Ю.В. Сердюкова, В.Д. Зайцев // Лесной вестник. – 2020. – №24(2). – С. 81-87. – DOI: DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-81-87.
13. Билай В.И. Методы экспериментальной микологии. – К.: Наук. думка, 1973. – 243 с.
14. Богородская А.В Использование продуктов биоконверсии отходов деревообработки в качестве биоудобрений для ремедиации деградированных почв / А.В. Богородская, О.В. Киселева // Агрохимия. – 2021. – №2. – С. 86-93. – DOI: 10.31857/S0002188121020046.

Поступила в редакцию 10.09.2025 г.

THE EFFECT OF THE CULTURE FLUID OF THE *T. HIRSUTA* TH-11 FUNGUS ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF *BRASSICA JUNCEA* L. SEEDLINGS IN CONDITIONS OF SOIL CONTAMINATION WITH CADMIUM IONS

O. V. Frunze

The effect of basal top dressing with an organic fertilizer obtained as a result of the bioconversion of the lignocarbon component of wheat straw on the morphometric growth parameters of *Brassica juncea* L. seedlings growing in soil contaminated with cadmium ions was studied. The growth-stimulating and protective effect of applying the culture fluid of *T. hirsuta* Th-11 fungus to the soil as an organic fertilizer on the length of the root and stem, as well as on the accumulation of dry biomass of *Brassica juncea* L. seedlings, was evaluated. The protective effect of culture fluid of *T. hirsuta* Th-11 fungus was determined on plant growth in conditions of soil contamination with cadmium ions. It was found that the possibility of using biofertilizers obtained by bioconversion of plant waste increases the productivity and fertility of soils in man-made territories contaminated with cadmium ions.

Keywords: *Trametes hirsuta* Th-11; morphometric parameters; bioconversion; culture fluid

Фрунзе Оксана Валентиновна
Кандидат технических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: hromyh82@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1082-7012
AuthorID: 1053340

Frunze Oksana V.
Candidate of Technical Sciences, Docent;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.