

ОЦЕНКА СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЙ

Манджиева С.С., Барахов А.В., Минкина Т.М., Чаплыгин В.А., Сушкова С.Н.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Совместное поступление тяжелых металлов (ТМ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в окружающую среду зачастую обусловлено воздействием сложных источников промышленных и сельскохозяйственных видов деятельности. Целью работы является оценка сочетанного воздействия CuO и бенз(а)пирена (БаП) на состояние растений ячменя ярового (*Hordeum sativum distichum*). Установлено, что совместное внесение CuO и БаП в почву оказывает негативное воздействие на все морфобиометрические параметры ячменя. Наиболее чувствительными показателями сочетанного загрязнения является длина корней, масса 1000 зерен и урожайность ячменя.

Ключевые слова. Почва, ячмень яровой, медь, бенз(а)пирен, морфобиометрические параметры.

ASSESSMENT OF THE COMBINED EFFECT OF HEAVY METALS AND POLYAROMATIC HYDROCARBONS ON THE CULTURAL PLANTS

Mandzhieva S.S., Barakhov A.V., Minkina T.M., Chaplygin V.A., Sushkova S.N.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The environmental contamination by heavy metals (HM) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) is often due to exposure to complex sources of industrial and agricultural activities. The aim of the work is to evaluate the combined effect of CuO and benzo(a)pyrene (BaP) on the state of spring barley plants. It was established that the soil combined pollution by CuO and BaP has a negative effect on all morphobiometric parameters of barley. The most sensitive indicators of combined contamination are the length of the roots, the mass of 1000 grains and the yield of barley.

Keywords. Soil, spring barley, copper, benzo(a)pyrene, morphobiometric parameters.

Сочетанное или комбинированное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) и бенз(а)пиреном (БаП) в большинстве случаев характерно при техногенном воздействии. БаП – наиболее распространённый представитель полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), который подлежит обязательному контролю во всех странах мира и является индикатором загрязнения данными соединения. Совместное поступление ТМ и ПАУ в окружающую среду зачастую обусловлено воздействием сложных источников промышленных и сельскохозяйственных видов деятельности, обеспечивающих поступление целого комплекса загрязняющих веществ [1]. Присутствие гидрофобных органических загрязняющих веществ, таких как ПАУ, часто сопутствует загрязнению ТМ в почвах промышленных территорий: хвостохранилища, тепловые электростанции, нефтеперерабатывающие комбинаты и т.п. [2, 3, 4]. Необходимость изучения механизма трансформации и деградации гидрофобных органических соединений в почвах, загрязненных ТМ, обусловлена особенностями поглощения ТМ почвами при сочетанном загрязнении с органическими поллютантами, которые основаны на межмолекулярных взаимодействиях токсикантов.

Сочетанное загрязнение почв ТМ и ПАУ представляет особый риск для окружающей среды и здоровья человека: усугубляет и угнетает экологическое состояние почв, увеличивает обоюдную токсичность органических и неорганических поллютантов, может способствовать усилению их биологической доступности. Однако работ, посвященных сочетанному загрязнению ТМ и ПАУ не много [1, 5, 6]. Вопрос о трансформации соединений ТМ в почве в присутствии органических поллютантов в настоящее время недостаточно изучен. Имеющиеся результаты зачастую противоречивы и требуют проведения дальнейших исследований. При сочетанном загрязнении поллютанты могут влиять на взаимное поглощение их растениями, оказывать прямое воздействие на микроорганизмы и широкий спектр микробиологических процессов, а также вызывать прямой и косвенный эффект на деградацию органических загрязнителей [4, 7, 8, 9, 10]. В сильно загрязненной почве необходимо учитывать

отрицательное влияние ТМ, в частности Си, на разрушение органических загрязнителей [11]. Присутствие ПАУ, как правило, увеличивало концентрацию Си в водных экстрактах, поэтому больше внимания следует уделять потенциальному риску накопления ТМ и для почвенной экосистемы. Установлено сопутствующее влияние увеличения концентрации ТМ на сорбцию фенантрена, конденсированным на поверхностных частицах почвы и сорбированным органическим углеродом, который имел большее сорбционное сродство по отношению к ПАУ [8, 9, 10].

Для оценки сочетанного воздействия ТМ и ПАУ на состояние растений (*Hordeum sativum distichum*) заложен модельный опыт. Использован верхний слой (0-20 см) чернозема обыкновенного мощного карбонатного среднегумусного тяжелосуглинистого на лессовидных суглинках ООПТ «Персиановская заповедная степь», находящемся вдали от возможных источников загрязнения. Свойства почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физические и химические свойства чернозема обыкновенного тяжелосуглинистого

Горизонт, глубина в см	рН	Физическая глина	Ил	Сорг	CaCO ₃	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	ЕКО
		%				сМ(+) \cdot кг ⁻¹	
А, 0-20	7.3	48.1	28.6	3.7	0.1	35.0	36.0

Были использованы сосуды объемом 2 л с закрытой дренажной системой. В подготовленные сосуды вносили по 2 кг почвы, просеянной через сито с диаметром ячеек 2 мм. Почвенные образцы чернозема обыкновенного карбонатного насыщали водным раствором СиО в дозах 300 и 2000 мг/кг. Доза внесения металлов 300 мг/кг почвы соответствует встречающемуся уровню загрязнению почв Ростовской области [2]. Высокий уровень загрязнения (до 2000-10000 мг/кг и более) почв встречается вблизи химических предприятий, предприятий по добыче и переработке руд цветных металлов [12]. В тоже время доза 2000 мг/кг Си по данным исследователей является критической для сельскохозяйственных культур. Применение такой дозы металла позволяет выявить механизмы воздействия на растения. На вариантах с совместным внесением металла с БаП, в дозе 10 ПДК [13], на поверхность почвы вносили раствор БаП в ацетонитриле (219-222 \cdot 10⁻⁶ мг/кг). В качестве тест-культуры использовался ячмень яровой двурядный (*Hordeum sativum distichum*) сорта Ратник (рисунок 1). Опыт заложен в трехкратной повторности.

Растения ярового ячменя отбирали в фазу полной зрелости. Проанализированы морфобиометрические параметры растений по методике В.В. Церлинг [14]: высоту растений, длину стебля, длину колоса, длину корней, массу тысячи зерен и урожайность. Пределы токсичности ТМ обычно устанавливаются по действию их на растение: если растение снижает урожайность или высоту на 5-10%, то уровень содержания его в почве считается токсичным [15].

Морфолого-анатомические изменения тест-растений являются наиболее заметными при ухудшении экологических условий на территории произрастания. Угнетение роста и развития растений, не только культурных, но и дикорастущих, при сочетанном загрязнении отмечается многими исследователями [16].

В условиях модельного опыта при сочетанном загрязнении морфобиометрические показатели ячменя ярового ухудшились не только по сравнению с контролем, но и по сравнению с отдельным внесением СиО (рисунок 2). Одной из самых чувствительных характеристик является длина корней тест-растения, которая уменьшилась при сочетанном загрязнении на 22% на варианте с 300 мг/кг металла и 32% на варианте с 2000 мг/кг металла по сравнению с контролем и на 15% и 27%, соответственно, по сравнению с отдельным внесением СиО. Высота растений уменьшилась на 10% и 27% по сравнению с контролем и на 6% и 12% по сравнению с отдельным внесением СиО за счет снижения высоты стеблей. Сочетанное загрязнение способствовало уменьшению длины листа, высоты колоса с остями и высоты колоса без остей, однако эти изменения не столь выражены, как другие параметры (рисунок 2).

Выявлено значительное снижение массы 1000 зерен на варианте сочетанного загрязнения БаП с дозой СиО 10 000 мг/кг на 39% по сравнению с контролем и на 25% по сравнению с отдельным внесением СиО (рисунок 2). Одним из последствий снижения массы 1000 зерен является значительное уменьшение урожайности: на 31% и 56% по сравнению с контролем и на 14% и 22% по сравнению с отдельным внесением СиО на вариантах с внесением 300 и 2 000 мг/кг СиО, соответственно.

Таким образом, совместное внесение СиО и БаП в почву оказывает негативное воздействие на все морфобиометрические параметры ячменя. Наиболее чувствительными показателями сочетанного загрязнения является длина корней, масса 1000 зерен и урожайность ячменя.



Рисунок 1 – Яровой ячмень (*Hordeum sativum distichum*) через 28 дней после всходов на вариантах с сочетанным загрязнением разными дозами CuO и 10 ПДК бенз(а)пирена

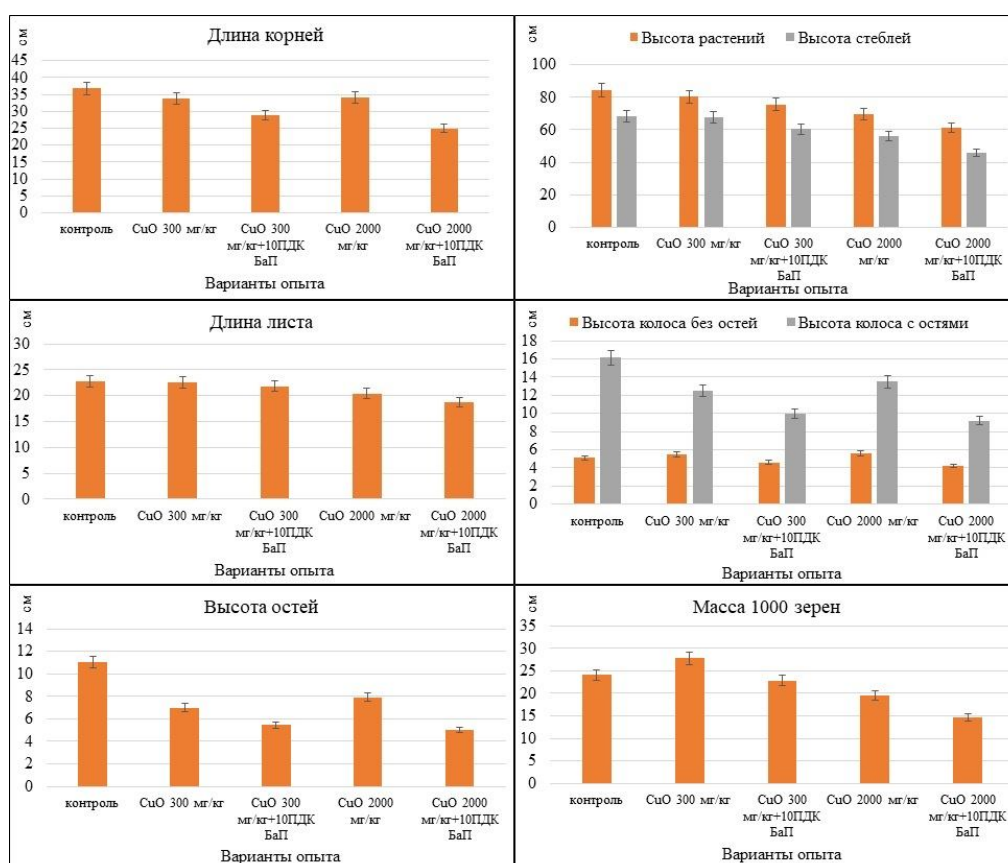


Рисунок 2 – Морфобиометрические показатели ярового ячменя двурядного (*Hordeum sativum distichum*) в фазу полной зрелости

Список использованных источников

1. Fantozzi F., Colantoni S., Bartocci P., Desideri U. Rotary kiln slow pyrolysis for syngas and char production from biomass and waste—Part I: Working envelope of the reactor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2007. – Vol. 129. – P. 901–907.

2. Minkina T. M., Fedorov Yu. A., Nevidomskaya D. G., Pol'shina T. N., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A. Heavy Metals in Soils and Plants of the Don River Estuary and the Taganrog Bay Coast // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – Vol. 50. – P. 1033–1047.
3. Sun Y., Zhou Q., Xu Y., Wang L., Liang X. Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene (B[a]P) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula* // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Vol. 186. – P. 2075–2082.
4. Abel S., Nehls T., Mekiffer B., Wessolek G. Heavy metals and benzo[a]pyrene in soils from construction and demolition rubble // *Journal of Soils and Sediments*. – 2015. – Vol. 15. – P. 1771–1780.
5. Vácha R., Skála J., Čechmánková J., Horváthová V., Hladík J. Toxic elements and persistent organic pollutants derived from industrial emissions in agricultural soils of the Northern Czech Republic // *Journal of Soils and Sediments*. – 2015. – Vol. 15. – P. 1813–1824.
6. Zhang W., Wu Y., Simonnot M. O. Soil Contamination due to E-Waste Disposal and Recycling Activities: A Review with Special Focus on China // *Pedosphere*. – 2012. – Vol. 22. – P. 434–455.
7. Rogers J. E., Li S. W. Effect of metals and other inorganic ions on soil microbial activity: soil dehydrogenase assay as a simple toxicity test // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 1985. – Vol. 34. – P. 858–865.
8. Knight B. P., McGrath S. P., Chaudri A. M. Biomass carbon measurements and substrate utilization patterns of microbial populations from soils amended with cadmium, copper, or zinc // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1997. – Vol. 63. – P. 39–43.
9. Perronnet K., Schwartz C., Morel J. L. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil // *Plant and Soil*. – 2003. – Vol. 249. – P. 19–25.
10. Lin Q., Shen K.-L., Zhao H.-M., Li W.-H. Growth response of *Zea mays* L. in pyrene–copper co-contaminated soil and the fate of pollutants // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 150. – P. 515–521.
11. Gao Y., Xiong W., Ling W., Xu J. Sorption of phenanthrene by soils contaminated with heavy metals // *Chemosphere*. – 2006. – Vol. 65. – P. 1355–1361.
12. Minkina T. M., Linnik V. G., Nevidomskaya D. G., Bauer T. V., Mandzhieva S. S., Khoroshavin V. Y. Forms of Cu (II), Zn (II), and Pb (II) compounds in technogenically transformed soils adjacent to the Karabashmed copper smelter // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18. – P. 2217–2228.
13. ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. – Введ. 2006–01–19. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. – 15 с.
14. Церлинг В. В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник – М.: Агропромиздат, 1990. – 235 с.
15. Минеев В. Г., Алексеев А. А., Тришина Т. А. Цинк в окружающей среде // *Агрохимия*. – 1984. – № 3. – С. 94–104.
16. Gutiérrez-Ginés M. J., Hernández A. J., Pérez-Leblic M. I., Pastor J., Vangronsveld J. Phytoremediation of soils co-contaminated by organic compounds and heavy metals: Bioassays with *Lupinus luteus* L. and associated endophytic bacteria // *Journal of Environmental Management*. – 2014. – Vol. 143. – P. 197–207.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (в рамках научного проекта № 19-34-90185 и 19-05-50097) и Гранта Президента (в рамках научного проекта № МК-2973.2019.4).