

УДК 631.4:504.5

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ И ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ ГОРОДСКИХ ЛАНДШАФТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА СУДОГДА)

Чеснокова С.М., Савельев О.В., Губская С.В.

ГОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
Владимир, e-mail: olegator86@bk.ru

Приведены результаты оценки валового содержания тяжелых металлов (ТМ) в почвах г. Судогда Владимирской области рентгенофлуоресцентным методом, установлены приоритетные загрязнители почв (Zn, Cr, Pb, V, Ni, Cu). Уровень загрязнения почв ТМ оценивался по суммарному показателю загрязнения почв (Zc). По величине Zc проведена градация почв города по уровню загрязнения, категории загрязнения и оценка экологической обстановки в городе. По значениям Zc уровень загрязнения почв во всех исследованных районах города низкий, а экологическая обстановка в городе относительно удовлетворительная. Нами проведена оценка актуальной и гидролитической кислотности почв. Актуальная кислотность почв города изменяется от 6,5 до 7,1 единиц pH, гидролитическая кислотность – от 2,82 до 5,50 мг-экв/100 г почвы, что свидетельствует о достаточно высокой подвижности ТМ в почвах и их токсичности для педабиотов. Фитотоксичность почв определяли по ингибированию прорастания семян кресс-салата и горчицы белой по величине коэффициента ингибирования (K_{ing}). По величине коэффициента ингибирования проведена градация уровня деградации почв. Большая часть проб почв города относится к слабодegradированным, почвы в центре города – среднедеградированным, а в зоне влияния завода «Красный химик» – сильнодеградированным. Изучены целлюлолитическая, каталазная и уреазная активности почв, а также зависимости между биологическими показателями почв и уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами. Обнаружена хорошая корреляционная зависимость между фитотоксичностью, целлюлолитической активностью и Zc (коэффициенты корреляции соответственно равны 0,86 (горчица белая), 0,80 (кресс-салат) и –0,70.

Ключевые слова: тяжелые металлы, фитотоксичность, кислотность, ферментативная активность, корреляционные зависимости

PHYTOTOXICITY ASSESSMENT AND ENZYMATIC ACTIVITY OF SOILS URBAN LANDSCAPE POLLUTED BY HEAVY METALS (ON THE EXAMPLE OF SUDOGDA)

Chesnokova S.M., Savelev O.V., Gubskaya S.V.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, e-mail: olegator86@bk.ru.

The results of the evaluation of the total content of heavy metals (HM) in the soils of the Vladimir region Sudogda rengenofluorescentnym method set priority pollutants soils (Zn, Cr, Pb, V, Ni, Cu). The level of soil contamination TM estimated the total index of soil pollution (Zc). The magnitude Zc held graduation city in terms of soil contamination, pollution category and assessment of the environmental situation in the city. As values of Zc pollution level of soil in all investigated areas of the city is low and the environmental situation in the city is relatively satisfactory. We assess current and hydrolytic soil acidity. Current soil acidity city varies from 6,5 to 7,1 units of pH, hydrolytic acidity – from 2,82 to 5,50 mgekv/100 g soil, which indicates relatively high mobility in soils and TM of their toxicity pedabiontov. Phytotoxicity of soil was determined by the inhibition of seed germination of cress and mustard white-largest factor inhibiting (K_{ing}). Largest factor inhibiting held gradation level of soil degradation. The majority of soil samples are slabodegradirovannym city, the soil in the city center – srednedegradirovannym, and in the zone of the plant «Red Chemist» – severely degraded. Studied cellulolytic, catalase and urease activity of soils, as well as the relationship between the biological indicators of soil and the level of soil contamination with heavy metals. It showed good correlation between phytotoxicity, cellulolytic activity and Zc (correlation coefficients are, respectively, 0,86 (white mustard), 0,80 (watercress) and –0,70).

Keywords: heavy metals, phytotoxicity, acidity, enzymatic activity, correlations

В последние десятилетия одной из острейших проблем промышленных городов стало загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ), что приводит к снижению продуктивности городских насаждений и вторичному загрязнению воздуха, особенно в зоне дыхания человека, вследствие ветровой эрозии почв, а также к деградации микробиоценоза почв [2] и токсификации почв [10]. В отличие от органических за-

грязнителей ТМ не разрушаются микроорганизмами, а аккумулируются в верхних горизонтах почвы и длительно сохраняются в ней. Периоды полувыведения ТМ сильно варьируют для различных элементов достаточно продолжительны: для Zn – от 70 до 510 лет; для Cd – от 13 до 110 лет; для Cu – от 310 до 1500 лет; для Pb – от 740 до 3900 лет [5]. При таком длительном воздействии ТМ происходят нарушения

в структуре комплекса почвенных микроорганизмов и в их функционировании, что находит свое отражение в изменении уровня ферментативной активности почвы [3]. Под ферментативной активностью почвы понимают способность почвы проявлять каталитическое воздействие на процессы превращения экзогенных и эндогенных органических и минеральных соединений благодаря имеющимся в ней ферментам.

Цель работы – оценка уровня загрязнения почв г. Судогда тяжелыми металлами, их фитотоксичности и ферментативной активности, а также выявление корреляционных зависимостей между интегральными показателями загрязнения почв ТМ и биологическими параметрами почв (фитотоксичность и ферментативная активность).

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – почвы г. Судогда – административного центра Судогодского района Владимирской области. Пробы почв отбирали в районах с различной антропогенной нагрузкой согласно общепринятой методике отбора проб для проведения почвенного мониторинга в течение августа-сентября 2015 года на глубине 0–20 см методом «конверта» в пяти повторностях [4]. Измерение валового содержания ТМ в пробах почв проводили рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре серии «Спектроскан Макс G» [6].

Для оценки ферментативной активности почв определяли: каталазную активность перманганатометрическим методом Джонсона и Темпле [7]; целлюлозолитическую активность по степени разложения хлопчатобумажного полотна, экспонированного в почвенных образцах в чашках Петри в течение 30 дней при 30 °C [8]; уреазную активность – по Т.В. Аристовской и М.В. Чугуновой [1].

Фитотоксичность почв устанавливали по ингибированию прорастания семян кресс-салата (*Lepidium sativum*) и горчицы белой (*Sinapis alba*) по величине коэффициента ингибирования (K_{ing}) [10]. Коэффициент ингибирования определяли по соотношению числа проросших семян в контроле (Nk) к числу проросших семян в опыте (No): $K_{ing} = Nk/No$.

Обработка полученных результатов проведения с применением пакета прикладных программ Microsoft Exel и Statistica 8,0.

Результаты исследования и их обсуждение

Пробы почв для анализа отбирались в 54 точках города с различной антропогенной нагрузкой. Установлено, что приоритетными загрязнителями почв города являются Zn, Sr, Cr, Pb, Ni, Cu, что обусловлено характером промышленного производства и влиянием автотранспорта. В табл. 1 представлены данные по содержанию приоритетных ТМ в почвах г. Судогда.

Таблица 1
Содержание ТМ в почвах г. Судогда

Металл	Концентрация металлов, мг/кг		
	Минимальная	Максимальная	Средняя
Zn	44,64	180,11	120,87
Sr	84,84	122,29	107,21
Cr	61,35	128,49	86,24
Pb	39,3	178,01	75,29
V	32,24	91,14	59,32
Ni	21,63	88,69	40,58
Cu	1,54	80,48	39,29
Co	0,97	14,77	6,37

В городе обнаружены три полиметалльные геохимические аномалии: центр города, районы железнодорожного и автовокзала и зона влияния завода «Красный химик».

Для характеристики аддитивного превышения фонового уровня группой ассоциирующих элементов и уровня техногенного загрязнения использовали суммарный показатель загрязнения (Z_c) (Саэт, 1990).

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_i - (n-1),$$

где K_i – коэффициент концентрирования, равный C_i/C_{ϕ} ; n – число учитываемых металлов с $K_i > 1,5$.

Величина Z_c в почвах города изменяется от 5,94 до 10,06. В табл. 2 представлены результаты оценки уровня и категории загрязнения почв в городе по величине суммарного показателя загрязнения. По этому показателю все почвы города характеризуются низким уровнем загрязнения, а экологическая обстановка в городе относительно удовлетворительная.

Так как подвижность и токсичность ТМ зависит от кислотно-щелочного режима почв, в то же время они изменяют ее кислотность, для выявления влияния ТМ на кислотность почв нами определены актуальная и гидролитическая кислотности (рис. 1 и 2) и фитотоксичность почв (табл. 3).

Установлено, что незначительное увеличение кислотности по сравнению с контролем ($pH = 6,7$, $H_r = 3,88$ мг-экв/100 г) произошло в местах с наиболее высокой концентрацией тяжелых металлов.

Для характеристики влияния ТМ на продуктивность и микробиоценоз почв нами определялись фитотоксичность, целлюлозолитическая, каталазная и уреазная активности почв.

Таблица 2

Характеристика уровня и категории загрязнения почв г. Судогда по величине суммарного показателя загрязнения

Район города	Z _c	Уровень загрязнения	Категория загрязнения	Оценка экологической обстановки
Трасса Р-72 (Пункт № 1)	6,73	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Трасса Р-72 (Пункт № 13)	6,51	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Трасса Р-72 (Пункт № 24)	8,95	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Трасса Р-72 (Пункт № 32)	9,41	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Трасса Р-72 (Пункт № 39)	6,18	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Зона влияния завода «Красный химик»	10,06	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Зона влияния автовокзала	9,96	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Судогодская средняя школа № 1	5,74	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Детский сад № 4	6,5	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Детский сад № 7	6,7	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Судогодская ЦРБ	8,52	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Ул. Северная	7,73	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Молокозавод	5,94	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Центр города (сквер)	9,32	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Садик № 1	8,36	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Садик № 2	8,51	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная
Садик № 3	7,72	Низкий	Допустимая	Относительно удовлетворительная

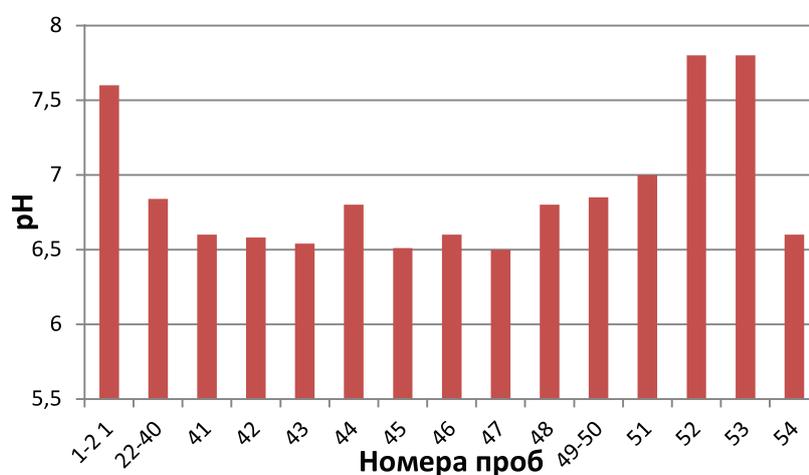


Рис. 1. Уровень актуальной кислотности (pH) почв

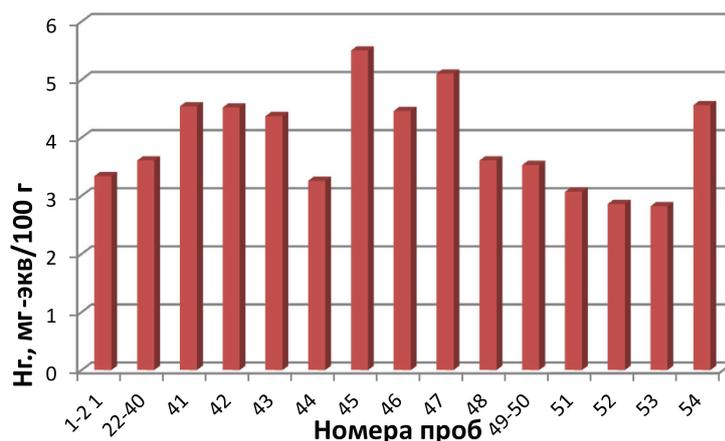


Рис. 2. Уровень гидролитической кислотности почв

Таблица 3

Коэффициенты ингибирования прорастания семян в пробах почв г. Судогда

№ п/п	Места отбора проб почвы	Коэффициент ингибирования	
		Горчица белая (<i>Sinapis alba</i>)	Кресс-салат (<i>Lepidium sativum</i>)
1–21	Трасса Р-72 выезд из Судогды (ул. Ошмарина)	1,31	1,12
22–40	Трасса Р-72 Владимир – Муром	1,42	1,42
41	Молочный завод	1,12	1,12
42	Садик № 4	1,13	1,15
43	Садик № 7	1,15	1,18
44	Зона влияния завода «Красный химик»	1,76	1,70
45	Центр города, сквер «Поляна сказок»	1,39	1,34
46	Садик № 1	1,30	1,26
47	Садик № 2	1,32	1,34
48	Садик № 3	1,29	1,12
49–50	Зона влияния автовокзала	1,55	1,30
51	Судогдская средняя школа № 1	1,11	1,12
52	ЦРБ	1,32	1,31
53	Ул. Северная	1,27	1,23
54	Ул. Механизаторов	1,31	1,10

Фитотоксичность и уровень деградации оценивали по величине коэффициента ингибирования (K_{ing}) прорастания семян кресс-салата (*Lepidium sativum*) и горчицы белой (*Sinapis alba*) (табл. 3).

Чем больше коэффициент ингибирования, тем токсичнее почва для растений и выше уровень ее деградации. Коэффициент ингибирования в пробах варьировал от 1,10 до 1,76. В большей части исследованных проб почвы коэффициент ингибирования изменялся в пределах 1,10–1,3, что характерно для слабодеградированных почв, а в пробах № 22–40 (зона влияния автотранспорта) $K_{ing} = 1,42$, что соответствует среднедеградированным почвам [10]. Наиболее высокий уровень деградации обнаружен у почв с наиболее высокой антропогенной нагрузкой (зона влияния завода «Красный

химик»), где $K_{ing} = 1,70–1,76$. Из табл. 3 также следует, что горчица белая является более чувствительным тест-организмом для оценки токсичности исследованных почв, чем кресс-салат.

В табл. 4 представлены результаты определения каталазной и уреазной активности проб почв. Как следует из таблицы, каталазная активность почв находится практически на одном уровне (0,23–0,27 см³ 0,1 М KMnO₄ на 1 г почвы за 20 мин). В зонах с наибольшим уровнем загрязнения почв ТМ наблюдается незначительная стимуляция каталазной активности. Уреазная активность варьируется в более широких пределах от 0,052 до 1,54 мг NH₃ на 10 г почвы в сутки. Наиболее высокие значения уреазной активности характерны также для зон с наибольшим уровнем загрязнения почв ТМ.

Таблица 4

Уровень каталазной и уреазной активности почв г. Судогда

№ п/п	Места отбора проб почвы	Каталазная активность, см ³ , 0,1 М КМnO ₄ на 1 г почвы за 20 мин	Уреазная активность, мг, NH ₃ на 10 г почвы в сутки
1–21	Трасса Р-72 выезд из Судогды (ул. Ошмарина)	0,23	0,082
22–40	Трасса Р-72 Владимир – Муром	0,27	0,118
41	Молочный завод	0,23	0,052
42	Садик № 4	0,24	0,058
43	Садик № 7	0,24	0,057
44	Зона влияния завода «Красный химик»	0,26	0,154
45	Центр города, сквер «Поляна сказок»	0,27	0,148
46	Садик № 1	0,25	0,148
47	Садик № 2	0,25	0,150
48	Садик № 3	0,27	0,149
49–50	Зона влияния автовокзала	0,25	0,120
51	Судогодская средняя школа № 1	0,24	0,110
52	ЦРБ	0,26	0,112
53	Ул. Северная	0,25	0,115
54	Ул. Механизаторов	0,25	0,116

Целлюлозолитическая активность исследованных почв низкая и изменяется от 7 до 30%, что может быть обусловлено снижением содержания и ослаблением активности пула целлюлозолитических микроорганизмов в почвах под влиянием ТМ (табл. 5). Полученные значения целлюлозолитической активности исследованных проб свидетельствуют о сильной степени подавления жизнедеятельности целлюлозолитических микроорганизмов под влиянием содержащихся в ней ТМ. Только 5% исследованных проб почвы имеют среднюю степень деградации, 4% – очень сильную, остальные – сильную. Почвы с очень сильной степенью деградации расположены

в местах с наиболее высоким уровнем загрязнения ТМ.

Таким образом, наиболее чувствительным показателем деградации изученных почв явились фитотоксичность и целлюлозолитическая активность.

Изучение корреляционных зависимостей между уровнем загрязнения почв ТМ (по величине Z_c) и биологическими показателями показало, что наиболее тесная связь (хорошая корреляция) обнаружена между уровнем загрязнения почв ТМ и фитотоксичностью ($r = 0,80$ и $0,86$), а также целлюлозолитической активностью ($r = -0,70$). Зависимость каталазной активности от Z_c слабая ($r = 0,22$), а уреазной активности – удовлетворительная ($r = 0,45$).

Таблица 5

Уровень целлюлозолитической активности г. Судогда

№ п/п	Места отбора проб почвы	Целлюлозолитическая активность, %	Степень деградации почв
1–21	Трасса Р-72 выезд из Судогды (ул. Ошмарина)	25	сильная
22–40	Трасса Р-72 Владимир – Муром	26	сильная
41	Молочный завод	30	средняя
42	Садик № 4	30	средняя
43	Садик № 7	28	сильная
44	Зона влияния завода «Красный химик»	7	очень сильная
45	Центр города, сквер «Поляна сказок»	9	очень сильная
46	Садик № 1	21	сильная
47	Садик № 2	23	сильная
48	Садик № 3	20	сильная
49–50	Зона влияния автовокзала	10	сильная
51	Судогодская средняя школа № 1	29	сильная
52	ЦРБ	10	сильная
53	Ул. Северная	30	средняя
54	Ул. Механизаторов	18	сильная

Заключение

Приоритетными загрязнителями почв г. Судогда являются Zn, Sr, Cr, Pb, Ni, Cu. Проведена оценка уровня загрязнения почв ТМ и экологической обстановки в городе по суммарному показателю загрязнения (Z_c). По значениям Z_c уровень загрязнения почв во всех исследованных районах города низкий, а экологическая обстановка в городе относительно удовлетворительная. Изучены корреляционные зависимости между биологическими параметрами почв и суммарному показателю загрязнения почв ТМ. Обнаружены хорошие корреляционные зависимости между фитотоксичностью и Z_c ($r = 0,86$ (горчица белая), $r = 0,80$ (кресс-салат)) и между Z_c и целлюлозолитической активностью ($r = -0,70$). Наиболее чувствительным индикатором загрязнения почв ТМ для исследованных почв является фитотоксичность, определенная с использованием горчицы белой, и целлюлозолитическая активность.

Список литературы

1. Аристовская Т.В., Чугунова М.В. Экспресс-метод определения биологической активности почв // Почвоведение. – 1989. – № 1. – С. 142–147.
2. Бармин А.Н., Синцов А.В. Современные проблемы городских почв // Геология, география и глобальная энергия. – 2007. – № 2. – С. 26–29.
3. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Ферментативная индикация загрязнения почв тяжелыми металлами // Агрохимия. – 2006. – № 11. – С. 84–95.
4. ГОСТ 17.4.3.01-83 СГ СЭВ 3347-82: Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – М., 1983.
5. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях (пер. с англ.). – М.: Мир, 1989. – 439 с.
6. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа (Свидетельство Госстандарта РФ № 2420/53-2004).
7. Практикум по агрохимии: учебное пособие / под ред. академика РАСХН В.Н. Минеева. – 2-е изд. пер. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 69.
8. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Ин-т биологии Уфим. НЦ. – М.: Наука, 2005. – С. 100–101.
9. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. – М.: Наука, 1982. – 204 с.
10. Чеснокова С.М., Трифонова Т.А., Дюков В.В. Интегральная оценка состояния окружающей среды в г. Владимире методами биоиндикации и биотестирования // Сборник материалов юбилейной науч.-практической конференции. – Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2001. – С. 65–70.