

УДК 504.064
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-215-221

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ

Ч.Б. Айдыралиева

Аннотация. Для оценки техногенной нагрузки на почвы города Бишкека было проведено сравнительное фитотестирование методом проращивания семян белой горчицы (*Sinapis alba*) на почвенных образцах, отобранных в районе ТЭЦ на разном расстоянии от автотрассы (50, 100 и 500 м). Оценка проводилась двумя способами – элюатным (на водной вытяжке) и аппликатным (на почвенном субстрате). Установлено, что аппликатный метод более чувствителен к совокупному загрязнению, включая малорастворимые токсиканты, и выявляет более выраженный фитотоксический эффект (до 40,14 %). Элюатный метод отражал слабые биологические отклики, демонстрируя фитотоксичность не выше 11,28 %. Полученные результаты подчеркивают необходимость применения методов биотестирования для объективной оценки экологического состояния урбанизированных почв.

Ключевые слова: фитотестирование; урбанизированные почвы; аппликатный метод; элюатный метод; фитотоксичность; белая горчица.

ТОПУРАКТЫН УУЛУУЛУГУН ФИТОТЕСТИРЛӨӨ МЕНЕН МЕЙКИНДИКДИК БААЛОО

Ч. Б. Айдыралиева

Аннотация. Бишкек шаарынын топурагына техногендик жүктү баалоо үчүн ЖЭБ районунда автотрассада ар кандай аралыкта (50, 100 жана 500 м) алынган топурак үлгүлөрүндө ак кычынын (сол) үрөнүн өстүрүү ыкмасы менен салыштырма фитотестирлөө жүргүзүлгөн. Баалоо эки жол менен жүргүзүлдү – элюаттык (топурактын суу экстрактысы менен) жана аппликаттык (топурактын субстратынын өзүндө). Изилдөөнүн жыйынтыгында аппликаттык ыкма биргелешкен, анын ичинде аз эрүүчү токсиканттар менен булганууну аныктоодо көбүрөөк сезимтал экени жана фитотоксикалык таасирдин (40,14 %ке чейин) ачык байкалганы аныкталды. Элюаттык ыкма биологиялык жоопторду азыраак көрсөткөн - фитотоксикалуулук 11,28 %тен ашкан жок. Алынган натыйжалар урбанизацияланган топурактардын экологиялык абалын объективдүү баалоодо фитотестирлөө ыкмаларын колдонуу зарылдыгын баса белгилейт.

Түйүндүү сөздөр: фитотестирлөө; урбанизацияланган топурак; аппликация ыкмасы; элюат ыкмасы; фитотоксикалык; ак кычы.

SPATIAL ASSESSMENT OF SOIL TOXICITY USING PHYTOTESTING

Ch.B. Aidyrallyeva

Abstract. To assess the technogenic impact on the soils of Bishkek city, a comparative phytotest was conducted using germination of white mustard seeds (*Sinapis alba*) on soil samples taken at different distances (50, 100, and 500 m) from a highway near the CHP area. The assessment was carried out using two approaches – eluate-based (on water extracts) and applicate-based (on soil substrate). It was found that the applicate method is more sensitive to total contamination, including poorly soluble toxicants, and reveals a more pronounced phytotoxic effect (up to 40.14%). The eluate method showed weaker biological responses, with phytotoxicity not exceeding 11.28%. The results emphasize the need to apply biotesting methods for an objective evaluation of the ecological state of urban soils.

Keywords: phytotesting; urban soils; applicate method; eluate method; phytotoxicity; white mustard.

Введение. При современных условиях урбанизации и индустриального развития страны особое внимание следует уделять проблемам экологической оценки состояния почв, особенно в пределах городских агломераций. Одним из ключевых направлений в этом контексте является оценка токсичности почв, загрязненных тяжелыми металлами, продуктами сгорания, техногенными аэрозолями и другими компонентами. Наиболее наглядным, биологически обоснованным и сравнительно доступным инструментом оценки считается фитотестирование – это метод, основанный на реакции растений на влияние загрязненной среды. Методика широко применяется как в академических исследованиях, так и в рамках мониторинга почв и промышленно-экологических обследований [1, 2].

Фитотесты позволяют оценить не только наличие потенциально опасных загрязнителей, но и их биодоступность, что делает этот подход особенно актуальным для реальной оценки экологических рисков. В отличие от химического анализа, фитотестирование выявляет совокупное действие всех компонентов среды – как токсичных, так и условно безвредных, но влияющих на рост и развитие растений [3, 4].

На практике применяются различные подходы к фитотестированию, среди которых наиболее часто используются элюатный (использование водной вытяжки из почвы) и аппликатный методы (проращивание семян непосредственно на почвенном субстрате). Элюатный метод позволяет смоделировать ситуацию поступления загрязняющих веществ в растения через водный раствор, имитируя природные осадки или инфильтрацию. Он эффективен для выявления растворимых ионов, прежде всего тяжелых металлов, солей и кислотных остатков. Аппликатный метод, напротив, предполагает воздействие всей почвенной матрицы, включая как водорастворимые, так и сорбированные формы токсикантов, органические загрязнители, а также механические и физико-химические характеристики почвы, такие как плотность, структура, содержание гумуса и pH [4–6].

Преимуществом применения обоих методов в совокупности является возможность проведения сравнительной диагностики – выявления различий между потенциальной растворимой токсичностью и фактическим угнетающим действием субстрата. Это особенно важно в районах со смешанными источниками загрязнения, где наблюдаются выбросы как в твердой, так и в газообразной фазах.

В условиях города Бишкек, столицы Кыргызской Республики, экологическая нагрузка на почвенный покров увеличивается за счет сочетания нескольких антропогенных факторов: функционирования теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), интенсивного движения автотранспорта, бытовых и строительных отходов, сезонного отопления и низкого уровня озеленения в некоторых микрорайонах. Восточная часть города (район ТЭЦ) представляет собой типичный техногенно-нагруженный участок, где почвы испытывают длительное воздействие выбросов сернистых соединений, оксидов азота, сажи и тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Cd, Cr и др.) [7].

Для всесторонней оценки состояния почв в районе ТЭЦ было проведено фитотестирование образцов, отобранных на трех расстояниях от источника загрязнения: 50, 100 и 500 м. Это позволило оценить как локальное влияние загрязнителя, так и степень его пространственного рассеивания. В качестве тест-объекта использовали семена чувствительного вида (например, *Lepidium sativum* или *Triticum aestivum*), рекомендованного международными стандартами [8].

Оценку состояния образцов проводили на основе двух ключевых показателей: энергии прорастания (Е, %) и средней длины корней (мм), по которым рассчитывался индекс фитотоксичности (ФЭ, %). Такое сочетание показателей дает объективную картину биологического отклика растений на комплексное воздействие загрязненных почв [1].

Фитотестирование представляет собой универсальный и высокочувствительный инструмент, позволяющий оценить состояние почвенной среды как по растворимой, так и по связанной форме токсикантов.

Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью аппликатного и элюатного методов, может быть эффективно использован для экологического мониторинга загрязненных территорий.

Объекты и методы. Объектом исследования являлись почвенные образцы, отобранные в восточной части города Бишкек, в районе расположения теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) – одного из крупнейших источников стационарного загрязнения городской среды. Этот район характеризуется высокой концентрацией выбросов техногенного происхождения: оксидов серы и азота, сажи, тяжелых металлов и углеводородных соединений. В совокупности с интенсивной транспортной нагрузкой в районе ТЭЦ возникает неблагоприятная экологическая обстановка, и большая нагрузка на почвы [7, 9].

Пробоотбор проводили в трех точках, расположенных на различном удалении от основного источника загрязнения – автотранспортных магистралей, которые являются значимым источником выбросов тяжелых металлов, сажи, продуктов сгорания топлива и микропластика в городской среде [10]. Выделены следующие зоны по степени воздействия:

- 50 метров – зона максимального влияния (непосредственная близость к транспортной артерии);
- 100 метров – зона умеренного воздействия;
- 500 метров – зона ослабленного влияния и условный контроль.

На рисунке 1 показано размещение точек отбора почвенных проб.

Отбор почвы проводили вручную с глубины 0–20 см методом комбинированной пробы из 5 подпроб на каждом участке. Пробы помещали в чистые полиэтиленовые контейнеры, маркировали, и в течение суток доставляли в лабораторию. До проведения тестов образцы хранили в холодильной камере при +4 °С. Методика отбора соответствовала требованиям ГОСТ 17.4.4.02–84 и ГОСТ 28168–89 [11, 12].

Для оценки биотоксичности исследуемых почв использовали лабораторный фитотест с применением семян белой горчицы (*Sinapis alba*), рекомендованной как международными, так и национальными стандартами благодаря высокой чувствительности к загрязнителям и стабильности морфологических признаков [2, 3].

Фитотест проводили в лабораторных планшетах – стандартных пластиковых планшетах, заполненных фильтровальной бумагой или слоем исследуемой почвы в зависимости от применяемого метода.

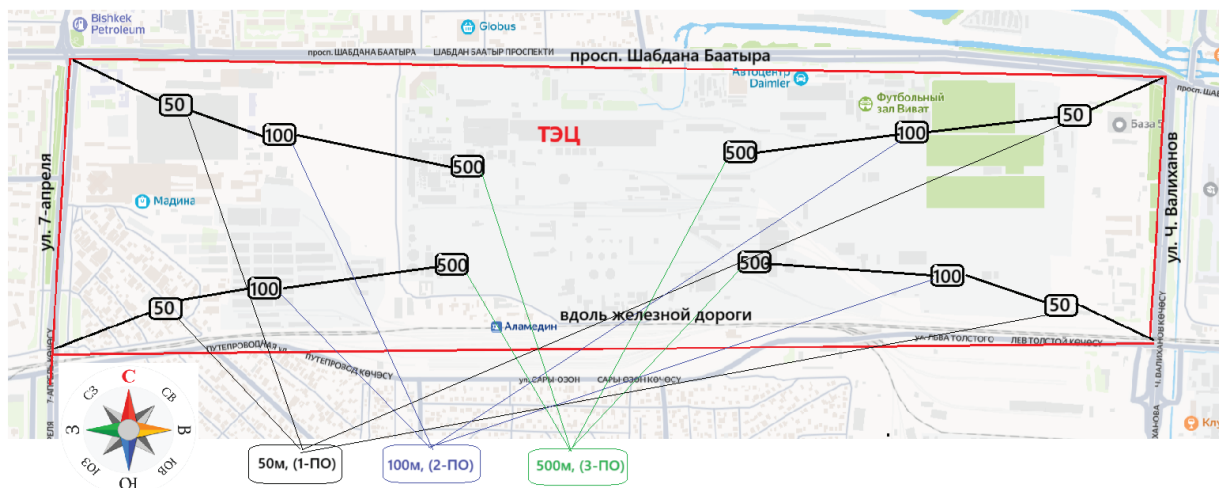


Рисунок 1 – Схема размещения точек отбора почвенных проб на территории вблизи ТЭЦ (восточная часть г. Бишкека) на разных расстояниях от источника загрязнения (50, 100 и 500 м) вдоль линии железной дороги и по периметру участка. Обозначены направления сторон света и схемы точек (1–ПО, 2–ПО, 3–ПО).

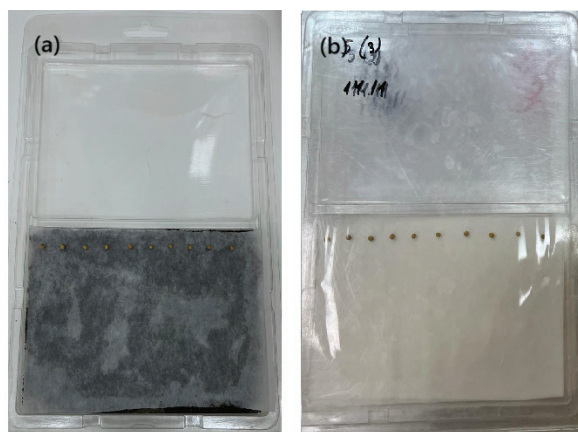


Рисунок 2 – Варианты постановки лабораторного фитотеста с семенами белой горчицы (*Sinapis alba*): а – аппликатный метод (проращивание на почвенном субстрате); б – элюатный метод (проращивание на фильтровальной бумаге, смоченной водной вытяжкой из почвы).

Каждый планшет включал 10 семян, равномерно размещенных на поверхности (рисунок 2). Для каждого варианта анализа (образец $\times$ метод) использовали 3 планшета, что обеспечивало достаточную статистическую надежность.

Применяли два метода: элюатный метод – позволяет оценить действие растворимых форм токсиантов [13, 14]; аппликатный метод – отражает суммарное действие всех фракций загрязнения, включая нерастворимые и связанные формы [15, 16].

Все измерения проводили в трех повторностях. Для оценки достоверности различий между вариантами данные обрабатывали статистически с использованием среднего арифметического, стандартного отклонения (SD) и коэффициента вариации (CV %) [17, 18].

Результаты и обсуждение. По результатам элюатного метода (таблица 1) средняя длина корней проростков варьировала от 102,03 мм (100 м) до 110,37 мм (500 м), что соответствует низким значениям ФЭ (фитотоксичности) – от 4,03 до 11,28 %. Аппликатный метод дал более выраженный эффект: длина корней составляла от 68,83 до 90,97 мм, а значения ФЭ достигали 40,14 % на расстоянии 100 м, что свидетельствует о высокой токсичности поверхностного слоя почвы (рисунки 3, 4).

Сравнение средней длины корней проростков по двум методам (рисунок 3) показало, что при использовании элюатного метода наблюдались относительно высокие и стабильные значения длины корней (от 102 до 110 мм), в то время как аппликатный метод демонстрировал выраженное снижение роста – особенно на расстоянии 100 м, где длина корней не превышала 69 мм. Это указывает на более высокую чувствительность аппликатного метода к общей токсичности почвенной среды, включая как растворимые, так и твердофазные загрязнители.

Полученные результаты согласуются с выводами других авторов о различиях чувствительности методов в зависимости от характера загрязнителя и степени его биодоступности [14].

График изменения фитотоксического эффекта (ФЭ, %), в зависимости от расстояния до источника загрязнения (рисунок 4), подтверждает эту тенденцию. По аппликатному методу наблюдалась четкая отрицательная зависимость между расстоянием и уровнем токсичности: ФЭ составлял до 40 % на расстоянии 100 м и снижался до 20 % – при 500 м. В то же время, элюатный метод продемонстрировал значительно меньший разброс значений (ФЭ до 11 %) и менее выраженную пространственную зависимость.

Таблица 1 – Результаты фитотестирования почвенных образцов, отобранных в восточной части г. Бишкек (район ТЭЦ) на разном расстоянии от автотранспортной магистрали

Название метода	Расстояние, м	Ср. длина корней, мм	SD	Медиана	Q1	Q3	CV (%)	ФЭ (%)	95 % ДИ
ЭМ	50	109.40	3.12	107.80	107.60	110.40	2.86	4.87	3.54
	100	102.03	7.54	105.40	99.40	106.35	7.39	11.28	8.53
	500	110.37	11.61	115.30	106.20	117.00	10.52	4.03	13.14
АМ	50	73.67	8.24	70.60	69.00	76.80	11.19	35.94	9.32
	100	68.83	7.91	68.30	64.75	72.65	11.50	40.14	8.95
	500	90.97	7.06	92.40	87.85	94.80	7.76	20.90	7.99

Примечание: представлены значения средней длины корней проростков белой горчицы (*Sinapis alba*), стандартного отклонения (SD), медианы, квартилей (Q1 и Q3), коэффициента вариации (CV, %), фитотоксического эффекта (ФЭ, %) и 95 % доверительного интервала (95 % ДИ). ФЭ рассчитывался по сравнению с контрольной длиной корней (115 мм); контрольным служила культивационная вода; элюатный метод (ЭМ); аппликатный метод (АМ).

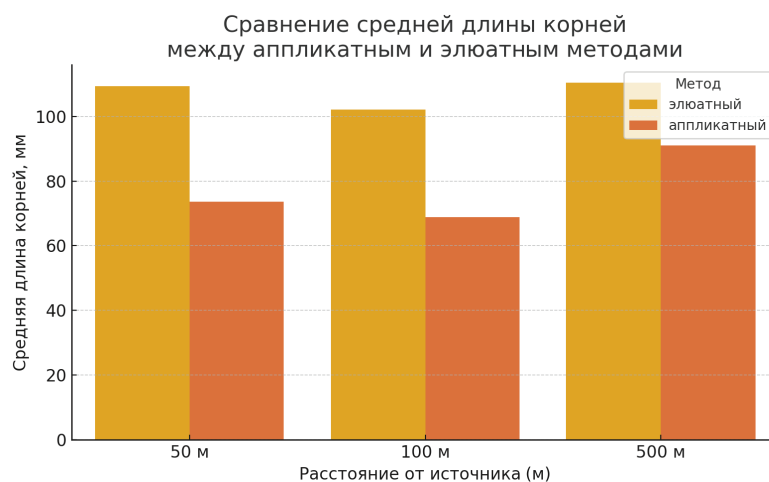


Рисунок 3 – Сравнение средней длины корней растений белой горчицы (*Sinapis alba*) при фитотестировании почв восточной части г. Бишкека (район ТЭЦ) двумя методами – элюатным и аппликатным – на разных расстояниях от источника загрязнения (50, 100 и 500 м)

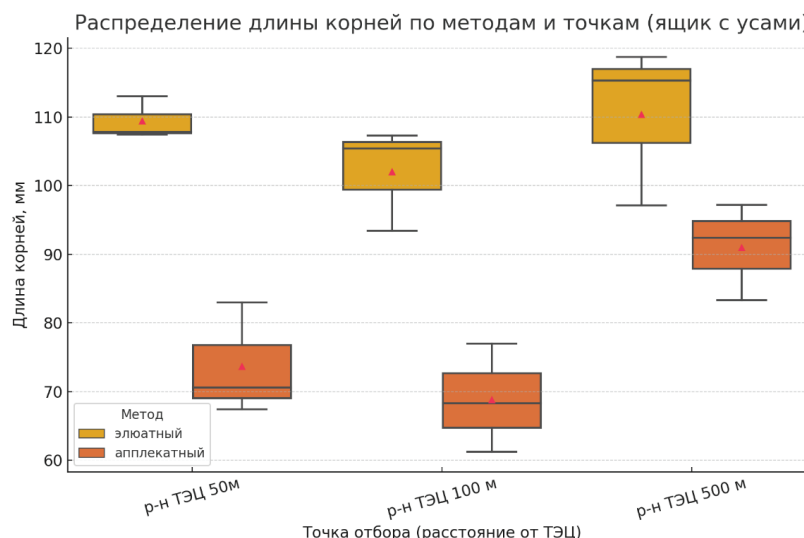


Рисунок 4 – Распределение длины корней растений белой горчицы (*Sinapis alba*) при использовании аппликатного и элюатного методов фитотестирования почв восточной части г. Бишкека (район ТЭЦ) на разных расстояниях от источника загрязнения (50, 100 и 500 м)

Распределение длины корней по каждому варианту тестирования и расстоянию (рисунок 4) показывает различия в вариабельности и структуре данных. Элюатный метод продемонстрировал узкий интерквартильный диапазон и высокие медианные значения (≈ 115 мм), особенно на удалении 500 м. В противоположность этому, при аппликатном методе были зафиксированы более широкие размахи (особенно в зоне 100 м), что может свидетельствовать о гетерогенности почвенного субстрата и наличии локальных загрязнителей, действующих на корневую систему [19, 20].

Форма распределения при аппликатном методе также указывает на наличие отдельных экстремальных значений, усиливающих стрессовое воздействие почвенной среды.

Таким образом, интегральный анализ трех представленных графиков позволяет заключить, что аппликатный метод выявляет более высокую степень токсичности и пространственную вариабельность загрязнённой почвы, в то время как элюатный метод отражает лишь растворимую фракцию загрязнителей и показывает менее выраженные изменения в биологических откликах растений. Полученные данные подчеркивают необходимость применения комплексного подхода при биодиагностике техногенно нарушенных территорий.

Заключение. Проведенное фитотестирование почв восточной части города Бишкека (район ТЭЦ) с использованием семян белой горчицы (*Sinapis alba*) позволило выявить различия в токсичности почвенных образцов в зависимости от расстояния до источника техногенного воздействия. Сравнительный анализ элюатного и аппликатного методов показал, что последний обладает большей чувствительностью к совокупному загрязнению почвы, включая как растворимые, так и нерастворимые компоненты.

Аппликатный метод продемонстрировал значительное снижение длины корней проростков и более высокие значения фитотоксичности (ФЭ), особенно в зоне умеренного воздействия (100 м от дороги), где отмечено максимальное угнетение роста. Элюатный метод, напротив, зафиксировал менее выраженные изменения, отражая лишь действие водорастворимых токсикантов.

Пространственная вариабельность и распределение значений по методу *boxplot* также подтвердили высокую гетерогенность почв в зоне техногенного влияния.

Полученные данные подтверждают необходимость использования как элюатного, так и аппликатного методов при биодиагностике урбанизированных почв. Такой подход обеспечивает более точную оценку степени загрязнения и позволяет выявить экологические риски в зонах с высоким техногенным воздействием.

Поступила: 30.06.2025; рецензирована: 14.07.2025; принята: 16.07.2025.

Литература

1. Терехова В.А. Стандартный алгоритм измерений фитоэффектов: учеб. пособие / В.А. Терехова, Л.П. Воронина, А.П. Кирюшина и др. М.: Научная библиотека МГУ, 2021. 58 с.
2. Кыдралиева К.А. Оценка биологической активности магнитоактивного композита методом фитотестирования / К.А. Кыдралиева, В.А. Прохоренко, Э.Д. Касымова и др. // Изв. НАН КР. 2014. № 3–4. С. 31–34.
3. ISO 11269-2:2012. Качество почвы. Определение воздействия загрязняющих веществ на почвенную флору. Часть 2: Воздействие загрязненной почвы на прорастание и раннее развитие высших растений. Женева: Межд. организация по стандартизации, 2012. 13 с.
4. Айдыралиева Ч.Б. Сравнительный анализ загрязнения почв тяжелыми металлами на территории Бишкека / Ч.Б. Айдыралиева, Б.М. Худайбергенова // Наука. Образование. Техника. 2022. № 2(74). С. 80–86.
5. Худайбергенова Б.М. Некоторые аспекты экологической генетики / Б.М. Худайбергенова; отв. ред. А.Т. Жунушов. Бишкек: НеоПринт, 2018. 242 с.
6. Андреев Д.Н. Экогеохимическая диагностика антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий / Д.Н. Андреев // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. № 3. С. 3–9.
7. Карабаев Н.А. Современное состояние экологии почв и урбаноземов города Бишкека / Н.А. Карабаев, Ж.М. Узакбаева // Почвоведение и агрохимия. 2010. № 1. С. 51–56.
8. Anderson T.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil / T.H. Anderson, K.H. Domsh // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. P. 215–221.
9. Айдыралиева Ч.Б. Роль автотранспорта в ухудшении экологического состояния окружающей среды г. Бишкека и риски здоровью / Ч.Б. Айдыралиева, Б.М. Худайбергенова // Современные проблемы биологии и экологии: матер. III межд. науч.-практ. конф. Махачкала, Дагестан, 04–05 марта 2021 г. Махачкала, 2021. С. 362–365.
10. Бейсеев А.О. Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в зависимости от удаленности автодорог / А.О. Бейсеев // Молодой ученый. 2020. № 25(315). С. 367–371.
11. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора проб. М.: Изд-во стандартов, 1985. 6 с.
12. ГОСТ 28168–89. Почвы. Подготовка почвенных проб для химического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1990. 7 с.
13. Федосеева Е.В. Практическая экотоксикология: оценка чувствительности биотест-культур: учеб. пособие / Е.В. Федосеева, Н.Ю. Сапункова, В.А. Терехова. М.: ГЕОС, 2017. 54 с.
14. Николаева О.В. Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв / О.В. Николаева, В.А. Терехова // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1141–1152.
15. Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы / В.А. Терехова // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.
16. Капелькина Л.П. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязненных почв / Л.П. Капелькина, Т.В. Бардина, Л.Г. Бакина и др. СПб.: Фора-принт, 2009. 19 с.
17. Ананьева Н.Д. Микробиологические и биохимические методы в экологии почв: учеб. пособие / Н.Д. Ананьева, Е.А. Воробьева, Т.С. Демкина, О.С. Корнилова. М.: Пушино, 2009. 312 с.
18. Васенев В.И. Влияние поллютантов (тяжелые металлы, дизельное топливо) на дыхательную активность конструкторов / В.И. Васенев, Н.Д. Ананьева, К.В. Иващенко // Экология. 2013. № 6. С. 436–445.
19. Терехова В.А. Biotesting of soils: approaches and challenges / В.А. Терехова // Eurasian Soil Science. 2017. T. 50. № 2. С. 190–198.
20. Zhang C. Using phytotoxicity assays to assess contaminated urban soils: methods and interpretation / C. Zhang, Q. Guo, L. Chen, Y. Wang et al. // Ecotoxicology. 2020. V. 29(3). P. 371–382.