

УДК 57.04:631.465:574.4:628.472.37

Исследование инвертазной и протеазной активности почвы территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов

Н.И. ДРОЗОВА, В.С. АВЕРИН

Рассмотрена возможность использования инвертазной и протеазной активности ферментов почвы для оценки состояния территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов. На основании результатов парного корреляционного анализа установлен характер связи между активностью инвертазы и протеазы и некоторыми физико-химическими показателями почвы. Установлено, что активность инвертазы в 2021–2022 гг. характеризовалась слабым и средним уровнями, что может свидетельствовать о нарушенном состоянии почвы территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: полигоны твердых коммунальных отходов, почвы, биологическая активность, протеаза, инвертаза, тяжелые металлы, физико-химические показатели почвы, корреляция.

The possibility of using the invertase and protease activity of soil enzymes to assess the state of territories adjacent to municipal solid waste landfills is considered. Based on the results of paired correlation analysis, the nature of the relationship between the activity of invertase and protease and some physicochemical parameters of the soil was established. It was found that the activity of invertase in 2021–2022 was characterized by low and medium levels, which may indicate a disturbed state of the soil of the territories adjacent to solid municipal waste landfills.

Keywords: solid municipal waste landfills, soils, biological activity, protease, invertase, heavy metals, physico-chemical indicators of soil, correlation.

В настоящее время в Республике Беларусь, как и во многих других странах, самым распространенным методом обезвреживания отходов производства и потребления остается захоронение. В Беларуси насчитывалось около 164 полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), из них 29 – на территории Гомельской области. Техногенные геохимические аномалии, формирующиеся в зонах влияния полигонов, как правило, имеют комплексный характер: загрязнению подвергаются все компоненты ландшафта – атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвы и растительность. По данным Н.А. Лысухо [1], значительная часть эксплуатируемых на территории Гомельской области полигонов ТКО была введена в эксплуатацию до 1991 г., когда начала формироваться законодательная база по вопросам обращения с отходами. Такие полигоны часто не имеют экологических паспортов и природоохранных сооружений, что может приводить к ситуациям значительного распространения загрязнений за пределы санитарно-защитных зон (СЗЗ). На сопредельных с СЗЗ территориях часто располагаются объекты хозяйствования, в том числе, сельскохозяйственные угодья, зоны выпаса скота, селитебные зоны. Сказанное выше определяет актуальность проведения исследований сопредельных территорий, не входящих в зону локальных мониторинговых наблюдений.

Ряд исследователей (Д.Г. Звягинцев, Ф.Х. Хазиев, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников и др.) [2]–[5] отмечают перспективность использования показателей ферментативной активности почвы для ранней диагностики изменения состояния компонентов биogeосистемы. Это связано с тем, что ферментативная активность почвы является в основном результатом жизнедеятельности почвенной микробиоты и растений и ранее других почвенных показателей отражает происходящие в системе изменения. Кроме того, активность многих ферментов четко коррелирует с определенным уровнем загрязнения, что делает перспективным включение данного показателя в систему биоиндикации.

Аргументами в пользу биохимической диагностики являются относительная простота измерений и достаточно быстрый ответ, формируемый как реакция на антропогенное воздействие, что в большей степени подходит для ранней диагностики нежелательных экологических тенденций [6]. Происходящие при этом в почве модификации микробиологической и ферментативной активности со временем восстанавливаются, за исключением экстремальных нарушений состояния почвы, вызванных высокими концентрациями загрязнителей.

Несмотря на то, что биомониторинг и биоиндикация почв приобретает все большее значение при проведении научных исследований, выполнении практических производственных мероприятий, до настоящего времени не найден единый показатель, на основании которого можно было бы сделать вывод о биологическом состоянии почвы в целом. При обосновании выбора индикатора необходимо учитывать чувствительность показателей, вариабельность получаемых результатов, сложность метода и длительность анализа, универсальность применения для различных почв, селективность для различных загрязнителей и типов деградации почв [7]. Важно учитывать тот фактор, что активность ферментов представляет собой интегральный показатель, отражающий влияние различных физико-химических параметров, а также складывающихся гидротермических условий.

Цель исследования – установить приоритетные загрязнители почвы территорий, сопредельных с полигонами ТКО и оценить характер их влияния на активность почвенных ферментов инвертазы и протеазы для обоснования перспектив использования их в качестве индикаторов при биодиагностике состояния почвы.

Объект и методы исследования. В качестве объектов исследований служили образцы почвы, отобранные на территориях, сопредельных с СЗЗ полигонов ТКО с разным уровнем мощности. Отбор проб производился в июле (фаза активной вегетации) и сентябре (завершение активной вегетации) 2021–2022 гг. на глубину 0–20 см. С пробных площадок методом конверта отбирали по 5 точечных проб с формированием объединенной пробы. Почвы обладали дерново-подзолистые песчаные.

Полигон ТКО г. Гомеля расположен на 12-м километре шоссе Гомель – Калинковичи (в 4 км на юго-запад от г. Гомеля). На юге полигон граничит с полями фильтрации городских очистных сооружений, эксплуатируется с 1968 г. Данный полигон относится к категории полигонов большой мощности: объем принимаемых твердых коммунальных отходов составляет 870 тыс. м³/год. Отбор проб производился с пробных площадок, удаленных от зоны обваловки полигона на 500 м (граница СЗЗ), 650 м, 800 м, 1000 м и 2,5 км (контрольный участок в районе д. Сосновка).

Полигон ТКО г. Калинковичи располагается в пределах Горбовичского сельсовета Калинковичского района в районе реки Нетеч (мелиоративный канал № 1 г. Калинковичи, приток р. Ненач) бассейна р. Припять в западной части пригородной зоны г. Калинковичи. Полигон введен в эксплуатацию с 1961 г. Расчетный объем поступлений ТКО на полигон 110,8 тыс. м³/год, что позволяет отнести его к полигонам средней мощности. Отбор проб производился на удалении 100 м, 300 м и 550–600 м от условной границы (зоны обваловки), контрольный участок располагался на территории д. Рудня Горбовичская примерно в 2,5 км от полигона.

Определение физико-химических показателей почвы проводили по стандартным методикам: кислотность почв – потенциметрически (ГОСТ 26483); сумму обменных оснований – по Каппену (ГОСТ 27821); гидролитическую кислотность – по Каппену; гумус по Тюрину (ГОСТ 26213); подвижные фосфаты по Кирсанову (ГОСТ 26207); определение нитратов [8] и хлоридов потенциметрическим методом. Потенциальную активность инвертазы и протеазы определяли по Галстяну [9], [10]. Содержание тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр AAS NovAA 300, свидетельство о государственной поверке № 150061455-4022 от 29.06.2022) на базе КУП «Гомельская областная проектно-исследовательская станция химизации сельского хозяйства».

Из всех контролируемых параметров метеорологического состояния природной среды наибольшая значимость для настоящих исследований принадлежит количеству атмосферных осадков. Согласно наблюдениям ГУ «Гомельский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» период 2021 г. характеризовался значительным варьированием количества атмосферных осадков относительно климатических норм. Норма суммы осадков в июле на основании многолетних наблюдений составляет около 100 мм. В сумме выпало 19 мм осадков, что составляет 19 % от нормы. Норма суммы осадков в сентябре (52 мм) была превышена. Выпало в сумме 99 мм осадков, что составляет 191 % от нормы. За летний сезон 2022 г. в среднем по Беларуси выпало 193 мм осадков, что составляет 86 % климатической нормы. Наименьшее количество осадков выпало в Гомельской области – 151 мм или 67 % климатической нормы. За сентябрь на территории Гомельской области вы-

пало в среднем 103,4 мм осадков или 200 % нормы. Данные погодные условия могут оказывать определенное влияние на количественный и видовой состав почвенной биоты, что в свою очередь, отражается на активности почвенных ферментов. Увеличение количества почвенной влаги может служить причиной снижения содержания подвижных форм элементов за счет их вымывания в нижележащие горизонты почвы.

Результаты и обсуждение. Оценка потенциальной биологической активности почвы территорий, сопредельных с санитарно-защитными зонами полигонов, проведена по таким показателям, как активность протеазы и инвертазы (таблица 1).

Таблица 1 – Активность ферментов почвы в различные годы наблюдений

Значения показателей	Активность ферментов			
	Инвертаза, мг глюкозы / 1 г почвы за 24 часа		Протеаза, мг глицина / 10 г почвы за 24 часа	
	2021 год	2022 год	2021 год	2022 год
min-max	1,95–6,00	3,28–20,47	2,10–33,80	7,56–46,78
среднее	3,61	14,20	10,63	20,72

Для инвертазы была зафиксирована активность на уровне (1,95 ÷ 6,00) и (3,28 ÷ 20,47) мг глюкозы / 1 г почвы за 24 часа, что позволяет отнести ее к категории слабой и средней активности по оценочным шкалам, предложенным Звягинцевым [3], [5], Хазиевым [2], Гапонюком и Малаховым [11], [12]. Диапазон варьирования активности протеаз в почве составлял (2,10 ÷ 33,80) и (7,56 ÷ 46,78) мг глицина / 10 г почвы за 24 часа, что соответствует средними и высокими показателями для данного фермента. По результатам исследований в 2022 г. отмечалось возрастание активности ферментов гидролаз: средние значения активности ферментов по выборкам в случае инвертазы увеличились в 3,9 раза, протеазы – в 1,95 раза по отношению к аналогичным показателям 2021 г.

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ свидетельствует об отсутствии достоверных сезонных (июль–сентябрь) вариаций в активности как инвертазы ($F(1;31) = 3,8835$; $p = 0,0577$), так и протеазы ($F(4,19) = 0,254$ при $p = 0,618$), полученных по результатам измерений в 2022 г.

Выбор индикаторных ферментов должен осуществляться с учетом особенностей физико-химических показателей почвы и доминирующих загрязнителей данных территорий. Почвы экспериментальных площадок существенно не отличались по анализируемым показателям: слабокислые и близкие к нейтральным в районе Гомельского полигона ТКО ($pH_{KCl} 5,44–6,71$); кислые и слабокислые – в районе Калинковичского полигона ($pH_{KCl} 4,54–6,12$).

Содержание гумуса в почве в районе полигона ТКО г. Гомеля варьировалось от 2,4 % до 5,2 %. Диапазон значений для почв вокруг полигона ТКО г. Калинковичи составил 1,9 %–3,2 %. Содержание фосфатов и сульфатов не превышало значений ПДК [13], [14] и составляло, соответственно, для почв в районе полигона ТКО г. Гомеля (1,25 ÷ 8,75) мг/100 г и (2,92 ÷ 11,25) мг/кг; для почв, сопредельных с полигоном ТКО г. Калинковичи – (1,87 ÷ 3,18) мг/100 г и (7,85 ÷ 11,84) мг/кг соответственно.

В то же время исследованиями в 2021 году установлено, что приоритетными загрязнителями почвы территорий, сопредельных с СЗЗ полигонов ТКО г. Гомеля и г. Калинковичи, являлись нитрат-ионы, содержание которых соответственно в 35,3 % и 57,1 % проанализированных проб превышало значения ПДК (130 мг/кг) [13], [14]. Максимальная кратность превышения значений ПДК варьировалась от 1,30 до 1,95 раза. Содержание хлоридов превышало значения ПДК в 12 % проанализированных проб почвы в районе полигона ТКО г. Гомеля с максимальной кратностью превышения в 1,43 раза.

В 2022 г. выявили значительно более низкие уровни содержания как нитратов, так и хлоридов в почве. Диапазон варьирования концентраций нитрат-ионов в почве не превышал (1,02 ÷ 3,89) мг/кг, хлоридов – (1,80 ÷ 10,19) мг/кг, что значительно ниже предельно-допустимых концентраций. Таким образом, среди перечня проанализированных нами анионов, в 2022 г. не выявлена группа с превышением значений ПДК. Усиленный промывной режим в осенний период 2022 г. мог способствовать выносу растворимых и легкоподвижных солей в нижележащие горизонты почвы.

Обязательному контролю в почве подлежит содержание таких тяжелых металлов как кадмий, медь, свинец и цинк [15]. Для территорий, находящихся в зоне влияния полигона ТКО г. Гомеля, установлено превышение в почве ПДК подвижных форм меди [16]. В 100 % проанализированных образцов, отобранных на удалении (500 ÷ 1000) м от зоны обваловки полигона, содержание меди превышало фоновые содержания, в 80 % случаев – допустимые концентрации в 1,13–3,43 раза. В пробах на удалении 800 м от границы обваловки полигона установлено незначительное превышение уровня ОДК подвижных форм кадмия – на 3,3–6,6 % (таблица 2). Превышение ПДК подвижных форм меди и кадмия в почвах контрольных участков (2,5 км от зоны обваловки) не выявлено. Валовые содержания металлов в почвах не превышали ПДК/ОДК. Таким образом, в 2022 г. было установлено, что к приоритетным загрязнителям почвы территорий, сопредельных с полигоном ТКО г. Гомеля, относилась только медь, по результатам исследований 2021 г. – медь и кадмий.

Таблица 2– Сравнительная оценка содержания подвижных форм металлов в почве территорий, сопредельных с СЗЗ полигона ТКО г. Гомеля

В мг/кг

Параметры	Медь	Цинк	Свинец	Кадмий
2021 год				
Среднее содержание	10,64	20,31	4,12	0,33
Min-max	2,66–49,69	6,94–115,00	2,08–14,41	0,16–0,66
% проб выше ПДК/ОДК	92,3 %	2,3 %	2,3 %	33,3 %
2022 год				
Среднее содержание	5,53	9,84	3,25	0,16
Min-max	1,08–10,30	4,87–19,34	2,45–4,45	0,01–0,32
% проб выше ПДК/ОДК	80 %	–	–	20 %

Анализ содержания подвижных и валовых форм тяжелых металлов в почве в районе полигона ТКО г. Калинковичи по результатам 2022 г. не выявил превышения их ПДК/ОДК. В 2021 г. содержание подвижных форм меди, свинца и кадмия превышало ПДК/ОДК примерно в 15–20 % проанализированных образцов.

Можно предположить, что снижение содержания в почве тяжелых металлов и некоторых анионов относительно значений аналогичных периодов 2021 г. обусловлено гидрологическим режимом территории (гидротермический коэффициент в 2022 г. составлял примерно 1,5, что указывает на избыточное увлажнение). Возможен смыв поллютантов в нижележащие горизонты, вынос с растительной биомассой. Вероятно также уменьшение количества пылевых выветриваний с территории полигонов ТКО в виду высокой увлажненности.

Наблюдаемые различия в накоплении тяжелых металлов в почве территорий, сопредельных с полигонами ТКО г. Гомеля и г. Калинковичи, могут быть также связаны с различием в их физико-химических характеристиках и разной мощностью загрузки данных объектов, а, следовательно, и предполагаемой нагрузкой на окружающую среду.

Оценка влияния физико-химических показателей почвы, в том числе и приоритетных загрязнителей, на активность ферментов проведена на основе расчета парных и множественных коэффициентов корреляции и регрессии. В целом для применения методов параметрической статистики проведена оценка нормальности распределения всех параметров в выборке. Было установлено, что все представленные к анализу выборки, характеризуются нормальным распределением в рассматриваемом диапазоне значений переменных.

Анализ значений коэффициентов корреляции показывает, что сила связи между активностью ферментов и значениями некоторых физико-химических показателей в указанном выше диапазоне варьируется от слабой до средней и сильной. Так для инвертазы установлена средняя и высокая по силе корреляция активности с такими показателями как содержание валовых форм меди ($r = 0,51$), рН ($r = 0,58$), сульфатов ($r = 0,66$), с гидролитической кислотностью ($r = -0,64$), суммой обменных оснований ($r = 0,74$) при $p \leq 0,05$. В случае протеазы выявлена высокая зависимость активности от таких показателей как гидролитическая кислотность ($r = -0,83$), рН_{водн.} ($r = 0,72$), содержание подвижного фосфора ($r = -0,89$) и средняя – с содержанием сульфатов ($r = 0,62$) при $p \leq 0,05$.

При проведении процедуры множественной корреляции и регрессии результативным признаком являлись значения показателя ферментной активности $C_i = f(X_1, \dots, X_n)$. Независимыми переменными (X_1, \dots, X_n) служили те химические показатели почвы, которые характеризовались средней и высокой степенью связи с активностью ферментов. Результаты представлены в таблице 3 и на рисунках 7–8.

Таблица 3 – Параметры множественной корреляции и регрессии

R	R ²	F	p	a	b	c	d
для активности протеазы:							
$C_{\text{протеазы}} = a + b \cdot \text{pH}_{\text{водн}} + c \cdot \text{гидролит. кислотность} + d \cdot \text{подв. фосфор}$							
0,928	0,861	12,344	менее 0,00561	55,1078	-0,07034	-7,5712	-3,7894
для активности инвертазы:							
$C_{\text{инвертазы}} = a + b \cdot \text{pH}_{\text{водн}} + c \cdot \text{pH}_{\text{солевой}} + d \cdot \text{сульфаты}$							
0,989	0,978	22,285	менее 0,01385	69,1328	-15,5914	5,8735	1,6618

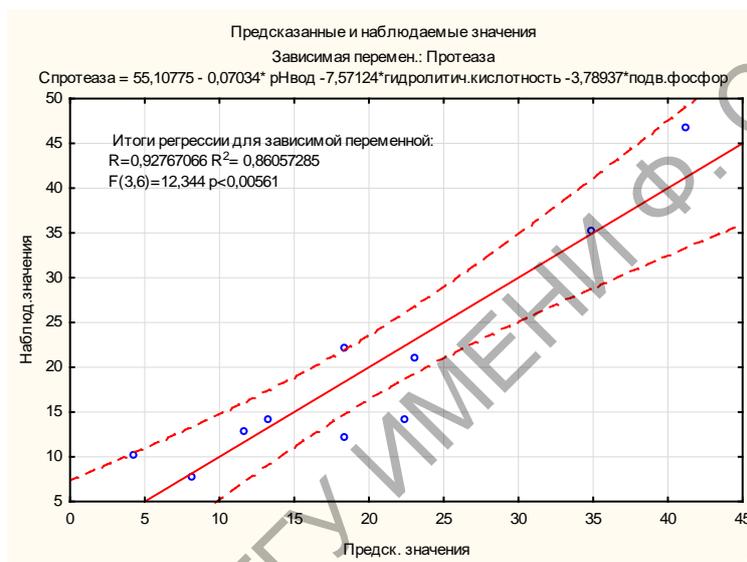


Рисунок 7 – Адекватность модели для прогноза активности протеазы

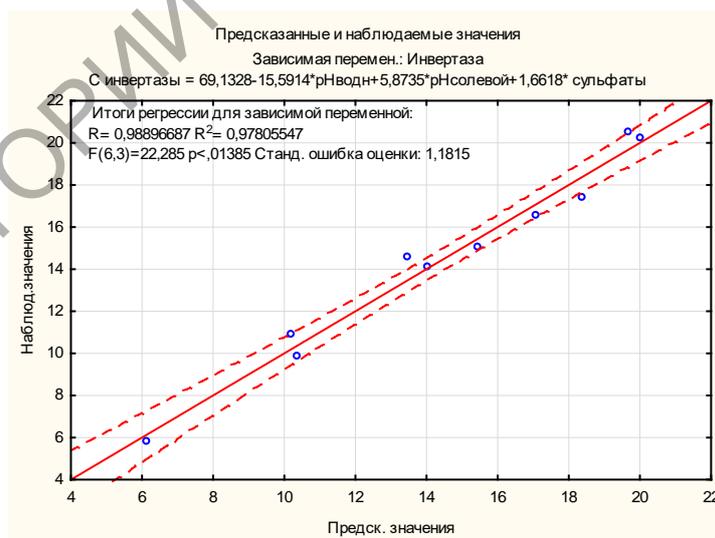


Рисунок 8 – Адекватность модели для прогноза активности инвертазы

Заключение. Установлено, что полученные в эксперименте диапазоны активностей фермента инвертазы характеризуются слабым и средним уровнями, что может свидетельствовать о нарушенном состоянии почвы территорий, сопредельных с полигонами ТКО. В то же время диапазон варьирования активности протеаз в почве отвечает средним и высоким показателям.

телям для данного фермента [2], [3]. За период наблюдений 2021–2022 гг. не выявлено достоверных сезонных (июль, сентябрь) отличий в активности рассматриваемых ферментов при общей тенденции к увеличению значений показателей в 2022 г. Установлена корреляционная зависимость активности протеазы и инвертазы от некоторых химических показателей почвы в указанном в работе диапазоне значений, имеющая как прямой, так и обратный характер. Для инвертазы выявлена средняя и высокая по силе корреляция с такими показателями как содержание валовых форм меди и сульфатов, рН и гидролитической кислотностью почвы, суммой обменных оснований ($p \leq 0,05$). Активность протеазы коррелировала с гидролитической кислотностью, рН почвы, содержанием подвижного фосфора и сульфатов ($p \leq 0,05$).

Полученные результаты позволят продолжить изучение динамики физико-химических и биохимических показателей почв для выявления возможного влияния полигонов ТКО на состояние почвенного покрова сопредельных территорий.

Литература

1. Лысухо, Н. А. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду : монография / Н. А. Лысухо, Д. М. Ерошина. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. – 210 с.
2. Хазиев, Ф. Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв / Ф. Х. Хазиев. – М. : Наука, 1982. – 204 с.
3. Казеев, К. Ш. Биодиагностика почв : методология и методы исследований / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2012. – 260 с.
4. Швакова, Э. В. Использование показателей ферментативной активности почв в почвенно-экологическом мониторинге / Э. В. Швакова // Потенциал современной науки. – 2015. – № 4 (12). – С. 62–66.
5. Звягинцев, Д. Г. Биологическая активность почв и шкала для оценки некоторых ее показателей / Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
6. Sariaslani, F. S. Microbial enzymes for oxidation of organic molecules / F. S. Sariaslani // Crit. Rev. Biotechnol. – 1989. – Vol. 9. – P. 171–257.
7. Деградация и охрана почв / под общ. ред. Г. В. Добровольского. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 654 с.
8. Охрана окружающей среды и природы. Аналитический контроль и мониторинг. Качество почвы. Определение нитратов ионометрическим методом : СТБ 17.13.05-28-2014. – Введ. 01.09.2014. – Минск : Госстандарт, 2014. – 16 с.
9. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М. : Наука, 2005. – 252 с.
10. Минеев, В. Г. Практикум по агрохимии : учеб. пособ. для ун-тов / В. Г. Минеев. – М. : Изд-во МГУ, 1989. – 303 с.
11. Казеев, К. Ш. Почвоведение. Практикум : учеб. пособ. для СПО / К. Ш. Казеев, С. А. Тищенко, С. И. Колесников. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 257 с.
12. Гапонюк, Э. И. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв / Э. И. Гапонюк, С. В. Малахов // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах : труды 4-го Всесоюзного совещания. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – С. 3–10.
13. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nsmos.by/content/150.html>. – Дата доступа : 14.12.2020.
14. Мониторинг земель [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/1%20SOIL%20Monitoring%202021.pdf>. – Дата доступа : 15.12.2022.
15. О локальном мониторинге окружающей среды : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 11.01.2017 г., № 5 : в ред. постановления Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 22.07.2020 г., № 15 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2020. – № 8/35694.
16. Перечень предельно допустимых (ПДК) и ориентировочно допустимых (ОДК) концентраций химических веществ в почве : ГН 2.1.7.12-1-2004. – Введ. 01.09.2004. – Минск : Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2004. – 27 с.