



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://petrsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 2 (56). Июнь, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugotek
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 57.044

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ РЕДИСА ПОСЕВНОГО (*RAPHANUS SATIVUS*) В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

СИНДИРЕВА
Анна Владимировна

доктор биологических наук, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, sindireva72@mail.ru

ЗАОСТРОВСКАЯ
Вероника Владимировна

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, stud0000212862@utmn.ru

ВЕШКУРЦЕВА
Светлана Семеновна

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, s.s.veshkurceva@utmn.ru

Ключевые слова:

тяжелые металлы
нефтепродукты
редис
пигменты фотосинтеза
оксидативный стресс
антиоксидантная активность

Аннотация: При фитотестировании загрязненных почв интегральной оценкой служат показатели роста и развития растений. В то же время представляют особый интерес биохимические маркеры, среди которых особое значение имеют продукты оксидативного стресса, вещества-антиоксиданты. В статье проведена оценка морфологических изменений и антиоксидантной активности растительного организма на примере тест-культуры редиса посевного (*Raphanus sativus*) в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами. Проведено пять серий опытов методом проростков по следующей схеме: 1) контроль – почвогрунт; 2) опытные образцы: с внесением в почву ацетатных солей меди (в дозах от 27.5 до 110 мг/кг), цинка (11.5–46 мг/кг), свинца (15–60 мг/кг), кадмия (0.25–1 мг/кг), нефтепродуктов (100–1000 мг/кг). Изучены лабораторная всхожесть семян, показатели роста и развития редиса посевного в условиях воздействия тяжелых металлов и нефтепродуктов. Внесение цинка (в дозах от 12.5 до 46 мг/кг) и свинца (в дозах от 15 до 60 мг/кг) способствовало увеличению лабораторной всхожести семян редиса посевного. Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса. Кадмий и нефтепродукты в исследуемых дозах снижают лабораторную всхожесть семян редиса. Выявлено действие экотоксикантов на содержание компонентов пигментов фотосинтеза, количество фенольных и флавоноидных соединений. Оценено содержание продуктов перекисного окисления липидов (диеновых конъюгатов и оснований Шиффа) у растений в условиях загрязнения

почв Cd, Pb, Zn, Cu и нефтепродуктами. Определено состояние антиоксидантной активности у растений в ответ на стресс, вызванный дополнительным поступлением в почву экотоксикантов. Уровень прооксидантных и антиоксидантных процессов в растительном организме зависит от дозы и химических свойств вносимых тяжелых металлов и нефтепродуктов

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 10 февраля 2025 года

Подписана к печати: 28 мая 2025 года

Введение

В настоящее время актуальными являются наблюдения за изменениями состояния окружающей среды, вызванными антропогенными причинами. Система этих наблюдений и прогнозов составляет суть экологического мониторинга. В этих целях все чаще применяются и используются достаточно эффективные и недорогие способы диагностики состояния окружающей среды – биоиндикация и биотестирование, в частности, по состоянию растений.

При фитотестировании загрязненных почв интегральной оценкой служат показатели роста и развития растений. В то же время представляют особый интерес биохимические маркеры. В частности, при неблагоприятных условиях растения испытывают окислительный стресс, при этом повышается активность внутриклеточной антиоксидантной защиты растительного организма.

Использование биодиагностики с помощью биохимических маркеров в экологическом мониторинге позволяет более точно определить воздействие антропогенных факторов на окружающую среду и способствует разработке эффективных стратегий по ее охране и восстановлению. Кроме того, такой подход к биомониторингу является относительно дешевым и доступным, что позволяет применять его на различных территориях – как фоновых, так и подверженных антропогенной нагрузке.

Использование растений тест-культур для биотестирования, где маркерами являются продукты оксидативного стресса, вещества-антиоксиданты, представляется перспективным. В качестве растений тест-культур можно использовать кресс-салат, редис, овес (Ловинецкая и др., 2015).

Показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ) и антиоксидантная активность могут быть критериями поражения растений экотоксикантами, т. ч. тяжелыми металлами (ТМ) и нефтепродуктами (НП) (Devi Chinmayee et al., 2014; Emamverdian et al., 2015). Таким образом, необходимость оценки состояния ПОЛ и уровня антиокси-

дантов у растений, наиболее чувствительных к загрязнителям тест-культур, представляет теоретический и практический интерес с позиции проведения биомониторинга.

Цель работы – оценить морфологические изменения и антиоксидантную активность растительного организма на примере тест-культуры редиса посевного (*Raphanus sativus*) в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами.

Задачи:

- изучить лабораторную всхожесть семян, показатели роста и развития редиса посевного (*R. sativus*) в условиях воздействия тяжелых металлов и нефтепродуктов;

- выявить действие экотоксикантов на содержание компонентов пигментов фотосинтеза, количество фенольных и флавоноидных соединений;

- оценить содержание продуктов перекисного окисления липидов у растений в условиях загрязнения почв Cd, Pb, Zn, Cu и нефтепродуктами;

- определить состояние антиоксидантной активности у растений в ответ на стресс, вызванный дополнительным поступлением в почву тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Материалы

Исследование проводилось на базе Лаборатории экологического мониторинга кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук Тюменского государственного университета.

Объектом исследования стал редис посевной (*R. sativus*) – однолетнее растение, которое относится к отряду Цветковые, классу Двудольные, порядку Капустоцветные, семейству Капустные. Редис посевной высоко чувствителен к загрязнению почвы, в т. ч. тяжелыми металлами, нефтепродуктами, что и обусловило выбор этой культуры в качестве тест-объекта.

Методы

Для решения поставленных задач проведена серия лабораторных опытов. В пластиковые контейнеры объемом 500 мл было помещено 200 г почвы. Высевали по 35 шт.

семян редиса. Эксперимент проводился в течение 15 дней. На третий, десятый и пятнадцатый день определяли количество проросших семян.

Проведено пять серий опытов методом проростков по следующей схеме: 1) контроль – почвогрунт (К); 2) опытные образцы (О): с внесением в почву в виде сухих ацетатных солей: меди (опыт 1), цинка (опыт 2), свинца (опыт 3), кадмия (опыт 4); нефтепродуктов (дизельное топливо) (опыт 5). Ацетатные соли традиционно хорошо растворимы в воде, благодаря чему противоионы быстро становятся доступными корням растений, легко проникая через мембраны клеток, что

позволяет наблюдать результаты эксперимента в более короткие сроки.

Все опыты были заложены в шестикратной повторности. Дозы тяжелых металлов рассчитаны исходя из их ПДК в почве и составляли ориентировочно 0.5, 1, 2 ПДК в почве (по меди, свинцу и кадмию рассчитывали по валовому содержанию, по цинку – для подвижной формы). Установили три дозы нефтепродуктов – «фоновое содержание», «повышенный фон», «загрязненные почвы» согласно разработанному критерию (Пиковский и др., 2003). Схема проведения лабораторного опыта представлена в табл. 1.

Таблица 1. Схема проведения лабораторного опыта

Загрязнитель	Варианты, условное обозначение	Доза вносимых металлов, мг/кг	Загрязнитель	Варианты	Доза вносимых металлов, мг/кг
Контроль	Контроль (К)	0	Pb	O1Pb (0.5 ПДК)	15
	Опыт O1 Cu	27.5		O2 Pb (1 ПДК)	30
	O2 Cu	55		O3 Pb (2 ПДК)	60
Cu	O3 Cu	110	Нефтепродукты	O1 НП	100
	O1Zn	11.5		O2 НП	200
	O2 Zn	23		O3 НП	400
Zn	O3 Zn	46	Cd	O4 НП	1000
	O1Cd (0.5 ПДК)	0.25			
	O2 Cd (1 ПДК)	0.5			
Cd	O3 Cd (2 ПДК)	1			

По окончании эксперимента определяли начальные показатели роста и развития редиса, содержание в растительной ткани продуктов перекисного окисления липидов и показатели антиоксидантной активности. Использовали следующую методику для определения содержания пигментов фотосинтеза (Шульгин, Ничипорович, 1974). Навеску растительного материала массой 100 мг растерли с добавлением безводного сульфата натрия в фарфоровой ступке до состояния гомогенного зеленого порошка. Затем добавили 8 мл 96 % этилового спирта. В надосадочной жидкости определили концентрацию пигментов фотосинтеза с использованием спектрофотометра. Показания снимали при длине волны 662, 644, 440 нм.

Методика определения фенольных соединений (Федорова, Никольская, 2001) основана на окислении перманганатом калия гидроксильных групп растительных фенолов в карбонильные группы с образованием хинонов. Отщепляющиеся от растительных фенолов протоны присоединя-

ются к индигокармину, что вызывает смену окраски индикатора с синей на желтую. Навеску массой 1–3 г зеленой части растения, перемолотого в фарфоровой ступке, нагревали в стаканчике на 100 мл в течение 15 минут с добавлением 40 мл дистиллированной воды на кипящей водяной бане при интенсивном перемешивании. Затем полученный экстракт охладили, отфильтровали и довели до 100 мл. 10 мл полученного экстракта перенесли в стакан объемом 800–1000 мл, добавили 750 мл дистиллированной воды и 25 мл раствора индигокармина. Смесь титровали при энергичном перемешивании 0.1н раствора KMnO_4 . Окончание титрования установили по появлению в растворе золотисто-желтого оттенка.

Методика определения содержания флавоноидов описана в работе Н. Н. Третьякова с соавт. (2000). Для определения взяли навеску массой 0.25 г сухого растительного материала, измельчили в фарфоровой ступке, поместили в пробирку на 30 мл с обратным холодильником, залили 15 мл 70 % спирта и

поставили на водяную баню на 30 минут. Затем содержимое пробирки отфильтровали в колбу, а остаток промыли 10 мл 70 % спирта. Объем довели до 25 мл (раствор А). Затем в опытную пробирку добавили 1 мл раствора А, 0.4 мл 2 % раствора хлорида алюминия, а через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 3.6 мл 70 % спирта. В контрольную пробирку добавили 1 мл раствора А, через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 4 мл 70 % спирта. Для определения оптической плотности стандарта в пробирку поместили 0.2 мл раствора рутина, 0.4 мл хлорида алюминия, через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 4.4 мл спирта. За контроль стандарта была взята пробирка с 0.4 мл хлорида алюминия, 0.02 мл уксусной кислоты и 4.6 мл 70 % спирта.

Оптическую плотность опыта определяли на SmartSpecPlus, BioRad напротив контроля в кювете 10 мм при длине волны 410 нм. Оптическую плотность стандарта определяли при тех же условиях напротив контроля стандарта.

Методика определения диеновых конъюгатов и оснований Шиффа состоит в следующем (Шведова, Полянский, 1992). Для определения диеновых конъюгатов к 0.2 мл экстракта растений добавили 4 мл смеси гептан – изопропанол (1:1) и встряхивали 10–15 мин. Далее в пробирку добавили 1 мл раствора HCl (pH 2) и 2 мл гептана, интенсивно встряхивали и после отстаивания и расслоения смеси на фазы отобрали верхний, гептановый слой, который использовали для определения в нем диеновых конъюгатов по степени светопоглощений вместо экстракта растений 0.2 мл воды, подвергнутый всем вышеперечисленным видам обработки. Для определения оснований Шиффа измельчили навеску растительного материала с небольшим количеством Na_2SO_4 , поместили в пробирку, добавили 4 мл смеси гептан – изопропанол (1:1) и встряхивали 10 минут. Затем добавили 1 мл раствор HCl (pH 2,0) и 2 мл чистого гептана. Отстаивали в течение 20 минут. После этого отобрали верхний слой, замерили его объем (V, мл) и измерили оптическую плотность образцов (D_o) и чистого гептана (D_p) при длине волны 365 нм на спектрофотометре SmartSpecPlus, BioRad по «контрольной» пробе, которую приготовили так же, как и остальные, но вместо растительного экстракта добавили гептан.

Статистическая обработка данных проводилась в программе MS EXCEL. Во всех процедурах статистического анализа рассчиты-

вали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0.05$.

Результаты

Одним из важнейших показателей, позволяющих выявить первичную реакцию семян растений на дополнительное поступление экотоксикантов, является их всхожесть. Количество проросших семян редиса на разных этапах эксперимента представлено в табл. 2

При внесении меди в почву не выявлено статистически достоверных различий количества всхожих семян на вариантах опыта по сравнению с контролем во все сроки эксперимента (см. табл. 2). Отмечена лишь тенденция повышения всхожести семян при внесении меди в дозе 27.5 мг/кг. Микроконцентрации ионов меди являются важным компонентом для нормального метаболизма большинства клеточных организмов, однако длительное воздействие повышенных концентраций меди приводит к негативным последствиям для растений (Петухов и др., 2018).

Увеличение количества проросших семян редиса посевного по сравнению с контролем отмечалось при внесении цинка в почву в дозах от 11.5 до 46 мг/кг на протяжении всего эксперимента (см. табл. 2).

Одним из опаснейших тяжелых металлов является кадмий. Повышенное содержание кадмия в почве вызывает такие изменения для растений, как образование бурых листьев, хлороз, скручивание листьев, красноватые жилки и бурые недоразвитые корни. В результате определения количества проросших семян редиса посевного при загрязнении почвы кадмием выявлено достоверное снижение данного показателя на всех вариантах опыта (см. табл. 2).

Повышенный уровень свинца в почве может угнетать рост и продуктивность растений, произрастающих на ней, а низкая концентрация может активизировать некоторые жизненно важные процессы в растительном организме. В наших исследованиях установлено стимулирующее действие свинца на всхожесть редиса при дозах от 15 до 60 мг/кг (см. табл. 2).

У растений редиса посевного выявлена высокая чувствительность к нефтепродуктам. Так, эксперимент показал, что на варианте ОЗ с концентрацией нефтепродуктов 400 мг/кг всхожесть была самая низкая по отношению к контролю (см. табл. 2).

Таблица 2. Количество проросших семян редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Варианты эксперимента	Количество семян	Количество проросших семян		
		3-й день	10-й день	15-й день
Варианты с применением цинка (Zn)				
К (контроль)	100	70 ± 2.8	83 ± 0.8	83 ± 0.8
O1	100	77 ± 3.1	89 ± 1.3	89 ± 1.3
O2	100	63 ± 1	79 ± 1.2	79 ± 1.2
O3	100	49 ± 3.5	81 ± 1.5	81 ± 1.5
Варианты с применением меди (Cu)				
К (контроль)	100	81 ± 0.8	91 ± 0.8	91 ± 0.8
O1	100	86 ± 0.2	92 ± 0.6	92 ± 0.6*
O2	100	86 ± 1.4	95 ± 0.8	95 ± 0.8
O3	100	93 ± 0.8	95 ± 1.3	95 ± 1.3
Варианты с применением меди (Cd)				
К (контроль)	100	70 ± 0.6	83 ± 1.4	93 ± 1
O1	100	56 ± 0.8*	64 ± 2.9*	70 ± 2.02*
O2	100	54 ± 2.5*	60 ± 1.7*	68 ± 1.7*
O3	100	65 ± 0.3*	66 ± 0	76 ± 2.4
Варианты с применением меди (Pb)				
К (контроль)	100	67 ± 2.3	68 ± 2.1	69 ± 2.08
O1	100	74 ± 2.4*	75 ± 2.6*	78 ± 1.7*
O2	100	84 ± 0.5*	84 ± 0.5*	85 ± 0.3*
O3	100	76 ± 0.3*	76 ± 0.3*	77 ± 0.3*
Варианты с применением нефтепродуктов				
К(контроль)	100	83 ± 1.4	90 ± 0.5	92 ± 0.3
O1	100	80 ± 1.6	83 ± 1.4*	85 ± 0.8*
O2	100	65 ± 4.4*	71 ± 4.4*	72 ± 4.5*
O3	100	59 ± 5.3*	73 ± 2.8*	74 ± 2.7*
O4	100	68 ± 1.2*	80 ± 0.8*	83 ± 1.4*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

В целом действие тяжелых металлов и нефтепродуктов на прорастание семян редиса зависело от их дозы и химических свойств.

Влияние тяжелых металлов и нефтепродуктов на морфометрические показатели редиса посевного представлено в табл. 3..

Согласно данным табл. 1, медь, цинк, свинец и нефтепродукты не способствовали изменению начальных показателей роста редиса. В то же время кадмий во всех применяемых дозах стимулирует рост корня и листа. При этом данные показатели увеличиваются прямо пропорционально повышению концентрации металла. Необходимо отметить, что в большинстве литературных данных кадмий рассматривается как фактор, оказывающий негативное влияние на рост растений, однако имеются данные и о стимулирующем действии кадмия (Синдирева, 2011), что подтверждается и нашими иссле-

дованиями. Тем не менее токсическое действие кадмия может проявиться на более поздних этапах онтогенеза.

Для нейтрализации возникающих нарушений в случае токсического воздействия поллютантов требуются большие энергетические затраты, которые компенсируются работой фотосинтетических пигментов, отражающих энергетический статус клетки. В ходе фотосинтеза вырабатываются органические вещества, которые используются для нейтрализации токсического действия нефтепродуктов и тяжелых металлов. Содержание хлорофиллов и каротиноидов является важным показателем, который позволяет оценить функциональное состояние растений, т. к. фотосинтетический аппарат является очень чувствительным к изменяющимся условиям внешней среды. При негативном воздействии экотоксикантов на раститель-

Таблица 3. Морфометрические показатели редиса посевного (*R. sativus*) в ходе лабораторного эксперимента

Варианты эксперимента		Длина, см ($M \pm m$)		
		гипокотилия	корня	листа
Варианты с применением меди (Zn)	К (контроль)	0.5 ± 0.2	3.0 ± 0.1	0.5 ± 0.2
	O1	0.6 ± 0.3	3.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	O2	0.5 ± 0.4	3.6 ± 0.3	0.3 ± 0.2
	O3	0.5 ± 0.4	3.8 ± 0.4	0.4 ± 0.3
Варианты с применением меди (Cu)	К (контроль)	0.2 ± 0.2	2.5 ± 0.1	0.3 ± 0.2
	O1	0.1 ± 0.2	2.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	O2	0.2 ± 0.1	2.6 ± 0.3	0.4 ± 0.2
	O3	0.3 ± 0.2	2.8 ± 0.2	0.5 ± 0.2
Варианты с применением кадмия (Cd)	К (контроль)	0.2 ± 0.2	2.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1
	O1	0.2 ± 0.1	$3.2 \pm 0.2^*$	0.4 ± 0.1
	O2	0.3 ± 0.2	$3.5 \pm 0.3^*$	0.5 ± 0.2
	O3	0.5 ± 0.2	$3.8 \pm 0.2^*$	$0.8 \pm 0.2^*$
Варианты с применением свинца (Pb)	К (контроль)	0.3 ± 0.1	2.3 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	O1	0.2 ± 0.2	2.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1
	O2	0.2 ± 0.1	3.0 ± 0.3	0.5 ± 0.2
	O3	0.4 ± 0.2	3.6 ± 0.4	0.6 ± 0.1
Варианты с применением нефтепродуктов	К (контроль)	0.2 ± 0.1	2.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1
	O1	0.2 ± 0.2	2.8 ± 0.3	0.3 ± 0.2
	O2	0.3 ± 0.1	3.3 ± 0.5	0.4 ± 0.3
	O3	0.2 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.4 ± 0.2
	O4	0.2 ± 0.2	3.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

ный организм концентрация фотосинтетических пигментов уменьшается (Осипова и др., 2013). Наряду с пигментами, которые участвуют непосредственно в процессе фотосинтеза, особый интерес представляют каротиноиды, которые выполняют антиоксидантные функции. Содержание пигментов фотосинтеза у редиса посевного при внесении в почву по окончании экспериментов представлено в табл. 4.

Согласно данным табл. 4, с увеличением дозы цинка, внесенного в почву, концентрация хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в проростках редиса достоверно не изменяется. Применение меди способствовало увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в проростках редиса. При этом рост концентрации пигментов отмечен до дозы 55 мг/кг. С дальнейшим увеличением концентрации микроэлемента уровень хлорофилла *a* и хлорофилла *b* снижается. Концентрация каротиноидов в растениях редиса при внесении меди в дозах от 27.5 до 110 мг/кг достоверно не отличается от уровня контроля. При внесении кадмия отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротино-

идов в растениях редиса при максимальной дозе кадмия 1 мг/кг. Несмотря на доказанное токсическое действие свинца, в определенных концентрациях этот металл оказывает положительное влияние на метаболизм растений. Содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b* увеличивается до дозы свинца, внесенного в почву, 30 мг/кг. С повышением его дозы до 60 мг/кг уровень пигментов снижается. Аналогичная тенденция отмечается и при оценке уровня каротиноидов. Возможно, увеличение содержания каротиноидов объясняется тем, что кроме активного участия в процессе фотосинтеза они являются антиоксидантами и ликвидируют избыток образовавшихся активных форм кислорода и свободных радикалов, возможно, возрастающих с повышением дозы металла (Никитина и др., 2005). Отмечена тенденция снижения концентрации пигментов в растениях редиса с увеличением содержания нефтепродуктов в почве до 1000 мг/кг.

Одними из биохимических показателей, отражающих степень повреждения клеток растений, являются показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ), продукты ко-

Таблица 4. Содержание пигментов фотосинтеза в растениях редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Варианты эксперимента		Содержание пигментов фотосинтеза (мг/г сырой массы), $M \pm m$		
		хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
Варианты с применением цинка (Zn)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.007
	O1	0.01 ± 0.003	0.05 ± 0.006	0.02 ± 0.001
	O2	0.01 ± 0.008	0.05 ± 0.003	0.01 ± 0.004
	O3	0.01 ± 0.001	0.04 ± 0.003	0.01 ± 0.008
Варианты с применением меди (Cu)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	O1	0.012 ± 0.001*	0.03 ± 0.003	0.008 ± 0.001
	O2	0.017 ± 0.003*	0.06 ± 0.004*	0.02 ± 0.001
	O3	0.005 ± 0.004*	0.027 ± 0.003	0.013 ± 0.008
Варианты с применением кадмия (Cd)	К (контроль)	0.009 ± 0.01	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	O1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.005	0.009 ± 0.001
	O2	0.01 ± 0.005	0.01 ± 0.001*	0.01 ± 0.006
	O3	0.02 ± 0.005	0.01 ± 0.0005*	0.005 ± 0.001*
Варианты с применением свинца (Pb)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	O1	0.013 ± 0.02*	0.01 ± 0.003	0.008 ± 0.001
	O2	0.018 ± 0.02*	0.04 ± 0.004	0.02 ± 0.001*
	O3	0.005 ± 0.001*	0.02 ± 0.003	0.013 ± 0.0008
Варианты с применением нефтепродуктов	К (контроль)	0.009 ± 0.002	0.07 ± 0.002	0.026 ± 0.006
	O1	0.005 ± 0.003	0.06 ± 0.007	0.023 ± 0.001
	O2	0.006 ± 0.001	0.07 ± 0.007	0.028 ± 0.001
	O3	0.006 ± 0.001	0.04 ± 0.002*	0.016 ± 0.002*
	O4	0.006 ± 0.001	0.03 ± 0.006	0.014 ± 0.001*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

торого – диеновые конъюгаты и основания Шиффа (Anjum et al., 2015). Данные о влиянии тяжелых металлов и нефтепродуктов на показатели ПОЛ представлены в табл. 5.

Перекисное окисление липидов – свободнорадикальное окисление полиненасыщенных жирных кислот. Первичным продуктом ПОЛ является гидроперекись, затем образуется гидроперекисный радикал, что, в свою очередь, ведет к формированию системы соединений, сопряженных двойной связью, – диеновых конъюгатов. Гидроперекиси неустойчивы, и при распаде образуются вторичные продукты ПОЛ: альдегиды, кетоны, спирты. При взаимодействии первичных органических веществ с альдегидами и кетонами образуются конечные продукты ПОЛ – основания Шиффа. На сегодняшний день известно большое количество данных, которые позволяют сделать вывод, что увеличение свободнорадикальных процессов и перекисного окисления липидов – многофункциональная клеточная реакция на стресс у растений. К тому же литературные данные свидетельствуют о том, что интенсивность

перекисного окисления липидов и свободнорадикальных процессов во время стресса повышается из-за нарушения антиоксидантно-проксидантного гомеостаза (Ерофеева, 2016).

Анализ содержания первичных продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов при влиянии цинка показал, что у редиса посевного во всех вариантах опыта концентрация этих веществ была ниже ($p < 0.05$), чем у растений контрольного варианта.

При внесении в почву меди в дозах 55–110 мг/кг отмечено повышение концентрации диеновых конъюгатов относительно контроля ($p < 0.05$), что свидетельствует о негативном действии высоких концентраций меди на растительный организм, наличие повреждений клеток и их угнетенное состояние. В то же время при внесении меди в дозах 27.5 мг/кг уровень диеновых конъюгатов снижается по сравнению с контролем.

Анализ содержания продуктов ПОЛ у редиса посевного показал, что при загрязнении почв кадмием и свинцом во всех вариантах опыта концентрация диеновых конъюгатов

Таблица 5. Содержание диеновых конъюгатов у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация диеновых конъюгатов, усл. ед./мг липидов
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	0.9 ± 0.002
O1	0.6 ± 0.002*
O2	0.6 ± 0.003*
O3	0.609 ± 0.001*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.1 ± 0.01
O1	0.9 ± 0.002*
O2	1.5 ± 0.01*
O3	1.2 ± 0.0005*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	1.2 ± 0.4
O1	1.02 ± 0.01*
O2	0.8 ± 0.1*
O3	0.6 ± 0.001*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	3.7 ± 0.01
O1	0.3 ± 0.005
O2	0.4 ± 0.02
O3	0.1 ± 0.002
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	0.7 ± 0.004
O1	0.4 ± 0.01*
O2	0.7 ± 0.004
O3	0.5 ± 0.0005*
O4	0.09 ± 0.005*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

была ниже ($p < 0.05$), чем у растений контрольного варианта (см. табл. 5). Наибольшее снижение установлено при применении свинца, при этом уровень метаболитов снижался от 9.5 до 19 раз. Следует отметить, что чем выше доза внесения экотоксикантов, тем ниже содержание диеновых конъюгатов. Содержание диеновых конъюгатов у редиса посевного при действии нефтепродуктов также снижается по сравнению с контролем (см. табл. 5).

Снижение содержания продуктов ПОЛ может быть обусловлено следующими причинами. По всей вероятности, антиоксидантные системы успешно активизируются в условиях стресса, ликвидируют избыток активных форм кислорода и тем самым предотвращают развитие процессов ПОЛ. Растения, произрастающие в неблагоприятных условиях, могут вырабатывать механизмы

блокирования поступления токсикантов с помощью хелатирования их в клетках корня или в прикорневой среде (Петухов и др., 2018).

Противоречивые данные установлены при оценке влияния тяжелых металлов и нефтепродуктов на уровень конечных продуктов ПОЛ – оснований Шиффа (табл. 6).

При оценке содержания оснований Шиффа установлены следующие закономерности. Только самые высокие в опыте дозы цинка (46 мг/кг) и меди (110мг/кг) способствуют увеличению содержания данных продуктов ПОЛ. Кадмий и свинец способствовали увеличению содержания оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (соответственно 0.25 и 15 мг/кг). С дальнейшим увеличением доз этих металлов уровень оснований Шиффа снижается, что, возможно, объясняется активизацией процессов анти-

Таблица 6. Содержание оснований Шиффа у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация оснований Шиффа, усл. ед./мг липидов
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	0.1 ± 0.003
О1	0.1 ± 0.003*
О2	0.1 ± 0.003*
О3	0.2 ± 0.003*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	0.3 ± 0.004
О1	0.3 ± 0.005
О2	0.3 ± 0.003*
О3	0.3 ± 0.002*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	0.1 ± 0.08
О1	0.4 ± 0.003*
О2	0.2 ± 0.002
О3	0.3 ± 0.008*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	0.03 ± 0.01
О1	0.01 ± 0.0008
О2	0.2 ± 0.01
О3	0.05 ± 0.008
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	0.3 ± 0.009
О1	0.1 ± 0.002
О2	0.3 ± 0.007
О3	0.1 ± 0.01
О4	0.009 ± 0.001

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

оксидантной защиты. Не установлено прямой зависимости между дозами нефтепродуктов и содержанием оснований Шиффа в растениях редиса. Тем не менее во всех вариантах опыта с нефтепродуктами отмечено в разной степени снижение уровня продуктов ПОЛ.

Обязательными участниками всех метаболических процессов являются вещества вторичного метаболизма – фенольные соединения. Они обеспечивают инактивацию свободных радикалов. Содержание фенольных соединений в растениях редиса посевного, выращенного при загрязнении почвы тяжелыми металлами и нефтепродуктами, представлено в табл. 7.

Содержание фенольных соединений в растительном организме зависело от химических свойств металлов. Отмечено снижение их концентрации при внесении цинка

в почву. Медь не повлияла на уровень фенольных соединений. Достоверное увеличение уровня фенолов отмечено при внесении кадмия в дозе 0.5 мг/кг, а свинца – 6 мг/кг. Применение нефтепродуктов способствовало достоверному снижению этого показателя.

За защиту растений от окислительного стресса, возникающего по причине загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами, совместно с фенолами отвечают флавоноиды. Это вещества, относящиеся к полифенольным соединениям, ингибируют процессы ПОЛ, взаимодействуя со свободными радикалами и нейтрализуя их.

В нашем исследовании система флавоноидной защиты у редиса посевного отличалась в зависимости от дозы различных тяжелых металлов и нефтяного загрязнения (табл. 8).

Таблица 7. Содержание фенольных соединений у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация, усл. ед./мг
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	3.7 ± 0.05
О1	2.5 ± 0.02
О2	2.8 ± 0.06*
О3	1.9 ± 0.01*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.6 ± 0.1
О1	1.8 ± 0.1
О2	1.9 ± 0.1
О3	1.6 ± 0.1
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	2.1 ± 0.05
О1	1.9 ± 0.05*
О2	3.1 ± 0.08
О3	1.7 ± 0.08*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	0.8 ± 0.1
О1	1.2 ± 0.1*
О2	0.8 ± 0.1
О3	0.8 ± 0.08
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	3.03 ± 0.08
О1	1.7 ± 0.01*
О2	1.8 ± 0.08*
О3	1.5 ± 0.1*
О4	1.4 ± 0.01*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

В опытах с применением цинка наибольшее содержание флавоноидных соединений установлено при дозе микроэлемента 23 мг/кг (что соответствует ПДК его подвижной формы в почве).

В результате исследований установлено, что медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса. В то же время при внесении кадмия в дозах от 0.5 до 1 мг/кг отмечается увеличение уровня флавоноидов по сравнению с контролем, а свинец и нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию этих метаболитов.

Обсуждение

Полученные результаты позволили определить особенности реакции редиса посевного на воздействие одних из наиболее распространенных экотоксикантов – тяжелых металлов (меди, цинка, кадмия, свинца) и

нефтепродуктов.

Внесение цинка в дозах от 12.5 до 46 мг/кг способствовало увеличению лабораторной всхожести семян редиса посевного. Концентрация в растениях хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов достоверно не изменяется по сравнению с контролем. Данный микроэлемент способствовал снижению в растениях продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов, однако при высокой дозе Zn (46 мг/кг) достоверно увеличивается уровень оснований Шиффа. Цинк способствовал снижению уровня фенольных соединений, а максимальный уровень флавоноидных соединений установлен при дозе микроэлемента 23 мг/кг.

Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса, однако способствовала увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в про-

Таблица 8. Содержание флавоноидных соединений у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация, усл. ед./мг
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	1.6 ± 0.004
О1	1.5 ± 0.0005*
О2	2.3 ± 0.002*
О3	1.5 ± 0.0008*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.2 ± 0.001
О1	0.5 ± 0.0003*
О2	0.6 ± 0.0005*
О3	0.5 ± 0*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	1.2 ± 0.001
О1	1.1 ± 0.0005*
О2	1.9 ± 0.001*
О3	2.05 ± 0.001*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	2.4 ± 0.005
О1	2.3 ± 0.001*
О2	2.3 ± 0.005*
О3	2.2 ± 0.003*
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	2.3 ± 0.0003
О1	2.3 ± 0.005*
О2	2.4 ± 0.01*
О3	2.5 ± 0.001*
О4	2.4 ± 0.02*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

ростках редиса (до дозы 55 мг/кг). Не установлено прямой взаимосвязи между дозами меди и концентрацией диеновых конъюгатов. Только самые высокие дозы меди (110 мг/кг) способствуют увеличению содержания оснований Шиффа. Медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса, но не влияет на уровень фенольных соединений.

Кадмий снижает лабораторную всхожесть семян редиса, однако способствует начальному росту корня и листьев. При внесении кадмия отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротиноидов в растениях редиса при максимальной дозе кадмия 1 мг/кг. При внесении кадмия концентрация диеновых конъюгатов была ниже, чем у растений контрольного варианта, однако отмечалось увеличение содержания оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (0.25 мг/кг). Дополнительное применение кадмия

способствует активизации антиоксидантной системы, о чем свидетельствует увеличение уровня фенолов и флавоноидов.

Установлено стимулирующее действие свинца на лабораторную всхожесть редиса при дозах от 15 до 60 мг/кг. Содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов увеличивается до дозы свинца, внесенного в почву, 30 мг/кг. Чем выше доза внесения свинца в опыте, тем ниже содержание диеновых конъюгатов. Однако отмечается рост уровня оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (15 мг/кг). Достоверное увеличение уровня фенолов отмечено при внесении свинца в дозе 6 мг/кг, но значимого влияния на концентрацию флавоноидов не установлено.

У растений редиса посевного выявлена высокая чувствительность к отношению к нефтепродуктам, которые снижают всхожесть редиса. Отмечена тенденция сниже-

ния концентрации пигментов фотосинтеза в растениях редиса с увеличением содержания нефтепродуктов в почве до 1000 мг/кг. На всех вариантах опыта с нефтепродуктами отмечено снижение уровня продуктов ПОЛ. Нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию флавоноидов, однако способствовали снижению уровня фенолов.

Заключение

1. Выявлены особенности структурно-функциональных преобразований тест-культуры редиса посевного (*R. sativus*) на воздействие тяжелых металлов и нефтепродуктов. Внесение цинка (в дозах от 12.5 до 46 мг/кг), свинца (в дозах от 15 до 60 мг/кг) способствовало увеличению количества проросших семян редиса посевного. Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса. Кадмий и нефтепродукты способствуют снижению количества проросших семян редиса, но не влияют отрицательно на его начальные показатели роста.

2. При внесении цинка в исследуемых дозировках содержание пигментов фотосинтеза достоверно не изменяется по сравнению с контролем. Медь способствовала увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в проростках редиса (до дозы 55 мг/кг). При внесении кадмия в максимальной дозе 1 мг/кг отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротиноидов в растениях. Свинец до дозы 30 мг/кг способствовал увеличению содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов.

3. В зависимости от дозы все изученные компоненты могут проявлять как антиокси-

дантное, так и прооксидантное действие на растительный организм. Так, цинк способствовал снижению в растениях продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов, однако при высокой дозе Zn (46 мг/кг) достоверно увеличивается уровень оснований Шиффа. Не установлено прямой взаимосвязи между дозами меди и концентрацией диеновых конъюгатов, самые высокие дозы меди (110 мг/кг) способствуют увеличению содержания оснований Шиффа. Кадмий и свинец способствовали снижению содержания диеновых конъюгатов, но при высоких дозах – увеличению количества оснований Шиффа. Нефтепродукты способствовали снижению уровня продуктов ПОЛ.

4. Медь и цинк способствовали снижению уровня фенольных соединений. Максимальный уровень флавоноидных соединений установлен при дозе цинка 23 мг/кг. Медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса. Кадмий способствует активизации антиоксидантной системы, о чем свидетельствует увеличение уровня фенолов и флавоноидов. Увеличение уровня фенолов отмечено при внесении свинца в дозе 6 мг/кг, но этот элемент значимого влияния на уровень флавоноидов не оказывает. Нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию флавоноидов, однако способствовали снижению уровня фенолов.

5. Полученные закономерности можно использовать в экологическом мониторинге, при нормировании уровня кадмия, свинца, меди, цинка и нефтепродуктов в системе почва – растение с помощью фитотестирования.

Библиография

- Ерофеева Е. А. Гормезис и парадоксальные эффекты у растений в условиях автотранспортного загрязнения и при действии поллютантов в эксперименте : Дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2016. 45 с.
- Ловинецкая С. Б., Еремеева В. Г., Синдирева А. В. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах придорожных территорий г. Омска и Омской области и возможности их ремедиации // Омский научный вестник. 2015. № 1 (138). С. 241–245.
- Никитина В. С., Шендель Г. В., Оразов О. Э. Растительные фенольные соединения-индикаторы промышленного загрязнения среды // Актуальные проблемы экологии. 2005. № 2. С. 124–127.
- Осипова Е. С., Петухова Г. А., Перекупка А. Г. Активация биохимических механизмов защиты растений при действии нефтяного загрязнения и парааминобензойной кислоты // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 6. С. 41–47.
- Петухов А. С., Хритохин Н. А., Петухова Г. А. Перекисное окисление липидов в клетках растений в условиях городской среды // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26, № 1. С. 82–90.
- Пиковский Ю. И., Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Сахаров Г. Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.

- Синдирева А. В. Эколого-токсикологическая оценка действия кадмия, цинка, селена в условиях южной лесостепи Омской области // Вестник КрасГАУ. 2011. № 10 (61). С. 118–122.
- Третьяков Н. Н., Кошкин Е. И., Макрушин Н. М. и др. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос, 2000. 640 с.
- Федорова А. И., Никольская А. Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. М.: ВЛАДОС, 2001. С. 101–104.
- Шведова А. А., Полянский Н. Б. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований // Исследование синтетических и природных антиоксидантов in vitro и in vivo: Сб. науч. статей / Под ред. Е. Б. Бурлаковой. М.: Наука, 1992. С. 72–73.
- Шульгин И. А., Ничипирович А. А. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм // Хролофилл. Минск: Наука и техника, 1974. С. 127–136.
- Anjum N. A., Sofo A., Scopa A. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants // Environmental Science and Pollution Research. 2015. № 22. P. 4099–4121.
- Devi Chinmayee M., Anu M. S., Mahesh B. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Jatropha curcas* L. // Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 2014. Vol. 8, № 7. P. 58–67.
- Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdoran F. Review article: Heavy metals and some mechanisms of plant defense response // The Scientific World Journal. 2015. № 4. P. 1–18.

Благодарности

Выражаем благодарность коллегам, помогавшим в осуществлении исследования, сборе материала, давшим ценные советы и консультации.

ASSESSMENT OF MORPHOLOGICAL FEATURES AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF RADISH (*RAPHANUS SATIVUS*) IN CONDITIONS OF SOIL POLLUTION BY HEAVY METALS AND PETROLEUM PRODUCTS

SINDIREVA
Anna Vladimirovna

D.Sc., Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, sindireva72@mail.ru

ZAOSTROVSKAYA
Veronika Vladimirovna

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, stud0000212862@utmn.ru

VESHKURTSEVA
Svetlana Semyonovna

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, s.s.veshkurtseva@utmn.ru

Keywords:

heavy metals
petroleum products
radish
photosynthetic pigments
oxidative stress
antioxidant activity

Summary: In phytotesting polluted soils, the indicators of plant growth and development serve as an integral assessment. At the same time, biochemical markers are of particular interest, among which products of oxidative stress and antioxidant substances are of particular importance. The article evaluates the morphological changes and antioxidant activity of a plant organism using the example of a test culture of radish (*Raphanus sativus*) in conditions of soil contamination with heavy metals and petroleum products. Five series of experiments were conducted using the seedling method according to the following scheme: 1) control – soil; 2) experimental samples: the soil with the addition of acetate salts of copper (in doses from 27.5 to 110 mg/kg), zinc (11.5–46 mg/kg), lead (15–60 mg/kg), cadmium (0.25–1 mg/kg), as well as petroleum products (100–1000 mg/kg). The laboratory germination of seeds, growth and development indicators of radish seeds under the influence of heavy metals and petroleum products were studied. The addition of zinc (in doses from 12.5 to 46 mg/kg) and lead (in doses from 15 to 60 mg/kg) contributed to an increase in laboratory germination of radish seeds. Copper had no significant effect on the initial growth and development of radishes. Cadmium and petroleum products in the studied doses reduce the laboratory germination of radish seeds. The effect of ecotoxins on the content of photosynthetic pigment components, the amount of phenolic and flavonoid compounds was revealed. The content of lipid peroxidation products (diene conjugates and Schiff bases) in plants under conditions of soil contamination with Cd, Pb, Zn, Cu and petroleum products was estimated. The state of antioxidant activity in plants in response to stress caused by additional intake of ecotoxins into the soil was determined. The level of pro-oxidant and antioxidant processes in the plant body depends on the dose and chemical properties of the introduced heavy metals and petroleum products.

Received on: 10 February 2025

Published on: 28 May 2025

References

- Anjum N. A. Sofo A. Scopa A. et al. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants, *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. No. 22. P. 4099–4121.
- Chinmayee M. Anu M. S. Mahesh B. et al. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Jatropha curcas* L., *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. 2014. Vol. 8, No. 7. P. 58–67.
- Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdoran F. Review article: Heavy metals and some mechanisms of plant defense response, *The Scientific World Journal*. 2015. No. 4. P. 1–18.
- Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects in plants under conditions of automobile pollution and under the action of pollutants in an experiment: Dip. ... kand. biol. nauk. N. Novgorod, 2016. 45 p.
- Fedorova A. I. Nikol'skaya A. N. Practicum on ecology and environmental protection. M.: VLADOS, 2001. P. 101–104.
- Lovineckaya S. B. Ereemeeva V. G. Sindireva A. V. Assessment of the content of petroleum products in the soils of the roadside territories of Omsk and the Omsk region and the possibility of their remediation, *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2015. No. 1 (138). P. 241–245.
- Nikitina V. S. Shendel' G. V. Orazov O. E. Plant phenolic compounds as indicators of industrial environmental pollution, *Aktual'nye problemy ekologii*. 2005. No. 2. P. 124–127.
- Osipova E. S. Petuhova G. A. Perekupka A. G. Activation of biochemical plant protection mechanisms under the influence of oil pollution and paraaminobenzoic acid, *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. No. 6. P. 41–47.
- Petuhov A. S. Hritohin N. A. Petuhova G. A. Lipid peroxidation in plant cells in an urban environment, *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2018. T. 26, No. 1. P. 82–90.
- Pikovskiy Yu. I. Gennadiev A. N. Chernyanskiy S. S. Saharov G. N. The problem of diagnostics and normalization of soil pollution by oil and petroleum products, *Pochvovedenie*. 2003. No. 9. P. 1132–1140.
- Shul'gin I. A. Nichipirovich A. A. Calculation of pigment content using nomograms, *Hrolofill*. Minsk: Nauka i tehnika, 1974. P. 127–136.
- Shvedova A. A. Polyanskiy N. B. A method for determining the end products of lipid peroxidation in tissues-fluorescent Schiff bases, *Issledovanie sinteticheskikh i prirodnkh antioksidantov in vitro i in vivo: Sb. nauch. statey, Pod red. E. B. Burlakovoy*. M.: Nauka, 1992. P. 72–73.
- Sindireva A. V. Ecological and toxicological assessment of the effects of cadmium, zinc, selenium in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region, *Vestnik KrasGAU*. 2011. No. 10 (61). P. 118–122.
- Tret'yakov N. N. Koshkin E. I. Makrushin N. M. Physiology and biochemistry of agricultural plants. M.: Kolos, 2000. 640 p.