

РАЗДЕЛ IX. СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Васильев Д.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М.
Поступление цинка в растения ячменя на разных типах почв и его влияние на
качество семян урожая

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт радиологии и агроэкологии»
(Россия, Обнинск)

doi: 10.18411/lj-05-2019-53

idsp: ljjournal-05-2019-53

Аннотация

Показано, что семенное потомство ячменя, полученное на почвах с концентрациями цинка, не превышающими значения ОДК более чем в 1 – 2 раза, может иметь тенденцию к увеличению всхожести. Внесение же больших доз Zn (приводящее к превышению в исследуемых почвах ОДК содержания металла в 4 – 9 раз) способно оказывать негативное влияние на семенное потомство. При этом изменение всхожести и выраженные цитогенетические эффекты у семенного потомства ячменя, полученного на дерново-подзолистой почве, происходит при меньших концентрациях цинка, чем на черноземе и торфяной почве.

Ключевые слова: ячмень; цинк; качество семенного потомства; цитогенетические нарушения.

Abstract

It has been shown that seed progeny of barley obtained on soils with zinc concentrations that do not exceed 1–2 times the ODC values may tend to increase in germination. The introduction of large doses of Zn (leading to an excess of metal content by 4–9 times in the studied soils of the ODC) can have a negative effect on seed progeny. At the same time, a change in germination and pronounced cytogenetic effects in seed progeny of barley obtained on sod-podzolic soil occurs at lower concentrations of zinc than on black soil and peat soil.

Keywords: barley; zinc; seed quality; cytogenetic disorders.

Рост концентраций тяжёлых металлов (ТМ) в почвах аграрных экосистем, ведет к снижению урожайности и ухудшению качества сельскохозяйственной продукции [1 – 5]. Среди тяжелых металлов важное место занимает цинк, относящийся к веществам 1-го класса опасности [6, 7]. Особенностью цинка является то, что оказывая негативное влияние на рост и развитие растений при высоких концентрациях в почвах, в малых количествах он является важным для растений микроэлементом [1, 8, 9]. Цинк участвует в углеводном и белковом обмене, окислительных процессах, в синтезе ДНК, РНК, хлорофилла, оказывает влияние на формирование генеративных органов, способен изменять гормональный статус растений. При дефиците цинка прекращается образование семян, наблюдается недостаточное развитие листьев и хлороз. [10, 11]. Таким образом, как недостаток, так и избыток цинка в почвах является лимитирующим для растений фактором, влияющим на урожайность и качество семенного потомства сельскохозяйственных растений.

Известно, что на переход цинка из почвы в растения влияют как морфофизиологические особенности растений, так и агрохимические свойства почв [1, 4]. Это необходимо учитывать при разработке нормативов допустимых уровней загрязнения почв металлом. Для этого требуются комплексные исследования, способные дать объективную оценку перехода цинка из загрязненных почв в растения, его влияние на их развитие, физиологическое состояние, биохимические показатели, урожай и качество семян. Однако в настоящее время подобные комплексные исследования часто проводят в упрощенных по сравнению с естественной средой

обитания большинства высших растений модельных системах. Это привело к тому, что сведения о воздействии цинка на качество семенного потомства сельскохозяйственных растений выращенных на различных почвах загрязненных цинком, являются недостаточно полными, а порой и вовсе противоречивыми. Исследования же цитогенетических эффектов у семян полученного урожая и вовсе единичны.

Целью данной работы являлось изучение перехода цинка из почвы в растения, оценка качества семенного потомства (всхожести семян) и частоты цитогенетических нарушений в корневой меристеме проростков семян ячменя, выращенного на почвах, в которые вносился в возрастающих концентрациях нитрат цинка.

Материалы и методы. Объектом исследования служил ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта «Зазерский-85».

Для исследований были взяты почвы трех типов [12, 13]: дерново-подзолистая супесчаная окультуренная (Albic Retisol (Loamic, Ochric), (Калужская обл., Жуковский р-н.)); чернозем типичный тяжелосуглинистый (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic), (Курская обл., Медвенский р-н.)); торфяная болотная низинная (Sapric Histosol, Калужская обл. Спас-Деменский р-н.).

Поведение цинка в системе почва – растение изучалось в вегетационных опытах при контролируемых условиях (температура 20-25 °С; относительная влажность воздуха 60-70%, влажность почвы 60% от полной влагоемкости). Агрохимические показатели почв (табл. 1) определяли общепринятыми методами [14, 15]. рН КСl (рН водн) – потенциометрическим методом в суспензии почвы в 1 М растворе КСl (дистиллированной воде) при соотношении твердой и жидкой фаз 1:2.5. Содержание гумуса – по методу Тюрина. Гидролитическую кислотность – по Каппену. Сумму поглощенных оснований – по Каппену-Гильковицу. Содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O – по Чирикову.

Перед посевом в почву добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (KH_2PO_4 , K_2SO_4) из расчета $P - 100$ и $K - 100$ мг/кг. Водный раствор нитрата цинка вносился в дерново-подзолистые супесчаные окультуренные почвы в концентрациях 25 50 100 150 и 250 мг/кг воздушно-сухой почвы. В чернозем типичный тяжелосуглинистый в концентрациях 50, 100, 250, 500 и 750 мг/кг воздушно-сухой почвы. В торфяную болотную низинную почву в концентрациях 250, 500 и 1000 мг/кг воздушно-сухой почвы. В каждом варианте, включая контрольный, количество вносимого азота корректировали с помощью азотнокислого аммония по варианту с максимальной дозой Zn .

Семена проращивались и высаживались в пластиковые вегетационные сосуды (объемом 5 дм³, на 5 кг абсолютно-сухой массы почвы) с исследуемой почвой по 25 шт./сосуд в 5-ти повторностях.

Концентрацию Zn в растениях, содержание подвижных форм и валовое количество элемента в почвах определяли в соответствии с методикой [16]. Содержание подвижных форм Zn определяли экстракцией с помощью ацетатно-аммонийного буфера (ААБ) при рН 4.8, кислоторастворимых форм – с помощью вытяжки 1 М HCl , общее количество – экстракцией 7М HNO_3 при кипячении в присутствии H_2O_2 . Коэффициенты биологического накопления ($KH Zn$), рассчитывались как отношение содержания Zn в сухой биомассе растений к содержанию соответствующей формы нахождения металла в почве (подвижной - $KH Zn_{подв}$ и кислоторастворимой - $KH Zn_{кисл}$). Воздействие загрязнения почв цинком на состояние растений проводили по изменению показателей урожая.

Для определения последствий воздействия ионов металлов на полученный урожай изучали всхожесть и цитогенетические эффекты в корневой меристеме проростков семенного потомства ячменя. Семена проращивали в чашках Петри, в термостате при температуре 21°С, на смоченной дистиллированной водой фильтровальной бумаге. Всхожесть семян определяли на 7 сутки после начала проращивания. Для фиксации клеток в первом митозе использовали проросшие корешки длиной 1 – 1,5 см, которые фиксировали в ацето-алкоголе (1:3). Окрашивание временных давленных препаратов проводилось ацетоорсеином. В приготовленных препаратах определяли количество клеток с цитогенетическими нарушениями

(анализировали все ана-телофазные клетки, в среднем 3 – 6 тысяч ана-телофаз на вариант). Клетки, имеющие сложные, (неподдающиеся распознаванию) аберрации из анализа исключались. Отметим, что анафазным методом в клетках корневой меристемы проростков семян регистрируются нарушения, которые возникли в период от образования гамет до созревания и сбора семян, так как индуцированные на вегетативной стадии (до цветения) хромосомные перестройки элиминируются в мейозе за исключением не регистрируемых этим методом симметричных инверсий и транслокаций.

Статистический анализ проводили в редакторе MS Excel. Для анализа использовали методы вариационной статистики. Оптимальный объем выборки, определяли методом статистического анализа эмпирических распределений [17]. Экспериментальные данные проверялись на наличие выбросов, которые из дальнейшего рассмотрения исключали. Достоверность отличий оценивали по критерию Стьюдента.

Результаты исследования и обсуждение. Доступность цинка для растений зависит от его подвижности и содержания в почве [18]. В свою очередь подвижность Zn зависит от соотношения различных его форм нахождения в почвах:

1. Цинк, присутствующий в виде водорастворимых, способных к обмену, легкорастворимых (непрочносвязанных) соединений. Такой цинк принято называть «подвижным», а также «доступным» растениям [16, 19]. Чем больше соответствующих соединений Zn в почве – тем выше его подвижность и биологическая доступность;
2. Цинк, содержащийся в виде кислоторастворимых соединений, которые извлекаются при помощи группового реагента 1 М HCl (или 1 М HNO₃), считается «потенциально доступным растениям» [19];
3. Цинк не доступный для растений, прочно связанный с органическими и неорганическими компонентами почвы и не извлекающийся с помощью вышеперечисленных групповых реагентов, считается «прочнофиксированным».

Также подвижность металла зависит от свойств почв, обуславливающих их буферность в отношении цинка [1, 3, 4, 20]. Так, низкая буферность дерново-подзолистой почвы по отношению к Zn, определяется повышенной кислотностью, невысоким содержанием гумуса и обменных катионов, низкой емкостью катионного обмена и степенью насыщенности основаниями (табл. 1).

Таблица 1.

Основные физико-химические показатели почв

Показатель	Дерново-подзолистая	Чернозем типичный тяжелосуглинистый	Торфяная болотная низинная
pH KCl	5,19±0,01	5,49±0,01	5,13±0,03
pH водн.	5,55±0,02	6,23±0,02	не опр.
Полная влагоемкость, %	35,5±0,7		345±3
Гумус, %	1,7±0,1	4,32±0,08	13,81(зольность %)
Hг, мг- экв/100 г почвы	1,08±0,05	3,17±0,01	45,23±1,15
Емкость катионного обмена, мг- экв/100 г. почвы	9,3±1,2	34,4±0,2	62,0±1,0
Обменный K ₂ O, мг/кг (по Масловой)	77,7±1,3	123,9±2,4	372,7±3,9

Примечание. Здесь и далее: ± – стандартное отклонение.

Исследование показало, что в контрольных почвах доля подвижного (доступного растениям), извлекаемого ААБ Zn от общего количества элемента уменьшалась в ряду: чернозем слабовыщелоченный (0.025) < торфяная (0.04) < дерново-подзолистая (0.05) (табл. 2). Доля кислоторастворимого Zn от общего количества металла в контрольных почвах была значительно выше, чем доступного: 0.21 (чернозем) ≈ 0.24 (дерново-подзолистая почва) < 0.53 (торфяная). Таким образом, подвижность Zn определяется динамическим равновесием между различными его формами в почвах [18]. Чем больше водорастворимых (непрочносвязанных), способных к обмену, соединений Zn в почве – тем выше его подвижность и биологическая доступность. Следовательно, внесение Zn в виде водорастворимых

соединений должно приводить к увеличению его подвижности в почвах и соответственно к росту перехода в растения. В наших опытах при внесении возрастающих количеств Zn в почвы доля подвижных (водорастворимых обменных и непрочносвязанных) форм элемента возрастала асимптотически до 0,45 (дерново-подзолистая почва), 0,32 (чернозем) и 0,14 (торфяная почва). Доля кислоторастворимых форм элемента при внесении нитрата цинка также возрастала, но в значительно меньшей степени - в 1,8 раза (дерново-подзолистая почва), в 1,7 раза (чернозем) и в 1,1 раза (торфяная), (табл.2).

Таблица 2.

Переход цинка из почвы в растения и последующее его накопление

Доза ТМ, мг/кг	Массовая концентрация форм нахождения Zn в почве (мг/кг)*, извлекаемых:		Массовая концентрация Zn в пересчете на сухое вещество, мг/кг		КН Znподв		КН Znкисл	
	Подвижная (1 М АсОНН ₄ , рН 4.8 – вытяжка)	Кислоторастворимая. (1 М НСl)	Солома	Семена/зерно	Солома	Семена/зерно	Солома	Семена/зерно
Дерново-подзолистая								
К	1,4±0,5	7,3±0,2	37,7±6,4	77,0±3,7	26,4±10,3	53,8±19,0	5,2±0,9	10,6±0,6
25	13,0±6,3	22,1±0,2	167,8±15,9	113,8±1,5	12,9±6,4	8,8±4,3	7,6±0,7	5,1±0,1
50	19,0±1,1	38,8±0,1	358,5±36,4	174,2±6,4	18,8±2,2	9,2±3,4	9,2±0,9	4,5±1,7
100	43,0±1,1	75,5±3,0	720,6±61,6	191,2±10,9	16,8±1,5	4,4±0,3	9,5±0,9	2,5±0,18
150	93,4±5,4	146,7±13,4	787,9±18,9	220,5±0,7	8,4±0,5	2,4±0,1	5,4±0,5	1,5±0,1
225	104,2±31,0	185,0±3,2	781,2±71,0	202,4±15,3	7,5±2,3	1,9±0,6	4,2±0,4	1,1±0,1
Чернозем типичный тяжелосуглинистый								
К	1,05±0,3	9,0±2,8	16,2±7,3	25,3±9,4	15,4±8,2	24,1±11,3	1,8±1,0	2,8±1,4
50	13,7±0,6	36,5±2,0	137,9±27,1	65,6±7,1	10,1±2,0	4,8±0,6	3,8±0,8	1,8±0,2
100	27,8±0,3	74,1±3,0	233,4±72,0	79,2±17,6	8,4±2,6	2,9±0,6	3,2±1,0	1,1±0,2
250	86,1±0,7	165,6±1,8	515,4±28,1	110,1±22,5	6,0±0,3	1,3±0,3	3,1±0,2	0,7±0,1
500	182,8±18,9	387,3±40,5	1012,8±84,5	165,9±4,3	5,5±0,7	0,9±0,1	2,6±0,4	0,4±0,1
750	272,0±42,8	592,3±13,6	2452,1±199,7	265,0±31,3	9,0±1,6	1,0±0,2	4,2±0,4	0,5±0,1
Болотная торфяная низинная								
К	1,4±0,2	18,3±1,2	26,8±2,7	71,3±14,5	19,6±3,5	52,0±13,0	1,4±0,2	3,7±0,8
250	30,5±1,0	166,7±1,7	114,6±5,1	91,6±1,4	3,8±0,2	3,0±0,1	0,7±0,1	0,5±0,1
500	64,8±8,7	301,6±6,3	150,8±8,8	104,4±2,0	2,3±0,3	1,6±0,2	0,5±0,1	0,3±0,1
1000	115,9±1,0	538,5±17,6	252,8±17,8	109,2±17,1	2,2±0,2	0,9±0,2	0,5±0,1	0,2±0,1

Таким образом, при внесении нитрата цинка наибольшее его поступление в растения должно происходить на дерново-подзолистой почве. Это подтвердила проведенная оценка перехода цинка из почвы в растения. Результаты исследования показали более высокую доступность цинка в дерново-подзолистой почве по сравнению с черноземом и торфяной почвой (табл. 2). В вегетативных органах и семенах ячменя, выросшего на дерново-подзолистой почве, коэффициенты накопления (КН) цинка выше, чем на черноземе и торфяной почве (табл. 2). Также коэффициенты

накопления цинка ячменем на контрольных почвах оказались значительно выше, чем на почвах, в которые вносился нитрат цинка (за исключением КН в соломе на дерново-подзолистой почве и черноземе). При этом имеется тенденция к снижению коэффициентов накопления с увеличением дозы внесенного в почву цинка. Такой эффект можно объяснить тем, что даже незначительное изменение концентраций цинка в почвах может активировать у растений механизмы защищающие их от его избытка. Надо отметить, что с ростом концентрации цинка в почве (в широком диапазоне концентраций, не являющихся фитотоксичными) коэффициенты накопления значительно не изменяются. Это свидетельствует об устойчивости ответных реакций растений в данном диапазоне концентраций Zn [21].

Накопление цинка у ячменя происходит преимущественно в генеративных органах (в отличие от пшеницы и овса) [10, 22]. Но как показало данное исследование (табл. 2), это утверждение справедливо только при невысоких, фоновых концентрациях цинка в почве. Как только его концентрации превышают фоновые показатели, происходит изменение направленности поступления элемента между вегетативной массой и генеративными органами. Таким образом, даже небольшое изменение концентрации цинка в почве способно изменять его биофильность, поскольку при избытке Zn потребность в нем, как биологически важном микроэлементе, уменьшается. Защитные механизмы растений начинают препятствовать поступлению цинка в растения и прежде всего в наиболее важные для сохранения численности популяции генеративные органы.

О надежности защиты растений от избытка цинка в почве можно судить по его влиянию на семенное потомство растений. Наибольшая вероятность обнаружить биологические эффекты негативного влияния цинка имеется на клеточном уровне. Проведенные исследования выявили статистически значимый ($p < 0.05$) рост числа цитогенетических нарушений в корневой меристеме проростков семян урожая ячменя выросшего на черноземе и дерново-подзолистых почвах с высокими концентрациями цинка в 4 – 7 раз превышающими значения ОДК для данных типов почв [6]. На торфяной почве обнаружена тенденция к увеличению цитогенетических aberrаций при концентрациях цинка в почве превышающими значения ОДК в 9 раз (табл. 3).

Таблица 3.

Частота и спектр цитогенетических нарушений

Варианты	АК, %	Относительный вклад aberrаций разных типов, %		
		f+m'	f''+m''	g+mp
Дерново-подзолистая почва				
0 мг/кг	0,80±0,07	17,95±0,05	46,15±0,07	35,90±0,06
25 мг/кг	0,78±0,07	4,00±0,03*	58,00±0,08	38,00±0,07
50 мг/кг	0,82±0,08	10,00±0,07	41,67±0,08	48,33±0,08
100 мг/кг	1,02±0,09	12,28±0,06	38,60±0,08	49,12±0,07
150 мг/кг	0,98±0,10	14,55±0,08	36,36±0,07	49,09±0,07
225 мг/кг	1,31±0,08***	11,67±0,05	31,67±0,06	56,67±0,05**
Чернозем типичный тяжелосуглинистый				
0 мг/кг	0,82±0,06	24,05±0,06	34,18±0,06	41,77±0,06
50 мг/кг	0,83±0,06	16,42±0,07	52,24±0,07	31,34±0,05
100 мг/кг	0,92±0,10	21,67±0,05	43,33±0,11	35,00±0,09
250 мг/кг	0,84±0,10	18,64±0,09	27,12±0,09	54,24±0,09
500 мг/кг	0,99±0,12	22,45±0,07	28,57±0,10	48,98±0,08
750 мг/кг	1,19±0,13*	26,23±0,08	16,39±0,05	57,38±0,10
Торфяная болотная низинная почва				
0 мг/кг	0,81±0,09	17,72±0,05	32,91±0,06	49,37±0,06
250 мг/кг	0,81±0,07	17,91±0,07	28,36±0,06	53,73±0,07
500 мг/кг	0,90±0,09	25,00±0,06	19,12±0,07	55,88±0,08
1000 мг/кг	1,07±0,10	15,79±0,07	24,56±0,07	59,65±0,07

Примечание. ВК – число просмотренных ана-телофазных клеток; АК – aberrантные клетки; f', m' – хроматидные (одиночные) фрагменты и мосты; f'', m'' – хромосомные (двойные) фрагменты и мосты; g – отставания хромосом; mp – многополюсные митозы * – отличие от контроля статистически значимо: * - $p < 5\%$, ** - $p < 1\%$, *** - $p < 0,1\%$.

Надо отметить, что рост цитогенетических нарушений у семян, полученных на дерново-подзолистых почвах, начинается при значительно меньших концентрациях цинка, чем у семян ячменя выросшего на черноземе или торфяной почве, что связано с его большей доступностью для растений.

Действительно ли именно повышенные концентрации цинка сказались на частоте цитогенетических нарушений в корневой меристеме семян ячменя? Природу фактора вызвавшего повышение частоты цитогенетических aberrаций можно определить по спектру нарушений. Этот подход основан на том фундаментальном факте, что ни один из техногенных поллютантов не способен создать новые биологические феномены, т.е. новые типы мутаций, которые не наблюдались бы и в контроле. Но вот соотношение типов мутаций при действии факторов разной природы может меняться весьма значительно [23, 24]. Считается, что тяжелые металлы и в частности цинк способны увеличивать долю геномных aberrаций [25 – 27]. Проведенный анализ спектра цитогенетических нарушений действительно выявил тенденцию к росту числа геномных нарушений, по мере увеличения концентрации цинка в исследуемых почвах. Причем, при концентрации цинка 250 мг/кг воздушно-сухой дерново-подзолистой почвы число геномных нарушений статистически значимо отличается от фонового уровня. Таким образом, повышенные концентрации цинка в почвах в период от образования гамет, до созревания семян и то количество цинка, которое было накоплено растениями, способно оказывать мутагенное влияние на семенное потомство ячменя, полученное на почвах с высоким содержанием цинка.

Сказываются ли повышенные концентрации цинка в почвах на посевных качествах семян урожая ячменя? Одним из эффектов воздействия тяжелых металлов на семенное потомство растений является снижение их всхожести [28]. В нашем исследовании было установлено, что всхожесть семян ячменя выросшего на почвах загрязненных нитратом цинка, имеет тенденцию к немонотонному снижению ($r=0,51 - 0,59$) с ростом концентрации цинка во всех трех типах почв (рис. 1).

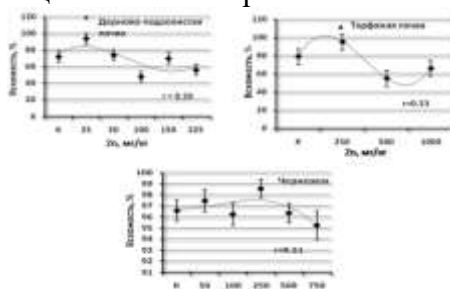


Рис. 1. Всхожесть семян ячменя выращенного на почвах загрязненных нитратом цинка.

Примечание * – отличие от контроля статистически значимо

Однако небольшие концентрации металла (25 – 250 мг/кг воздушно-сухой почвы), способны вызывать увеличение всхожести семян. У семян ячменя выросшего на дерново-подзолистой и торфяной почве этот рост статистически значим. Повышение всхожести семян ячменя выросшего на почвах с низким уровнем загрязнения объясняется тем, что цинк в небольших концентрациях необходим для растений, являясь важным микроэлементом оказывающим влияние на формирование генеративных органов и семян [3, 29]. Токсичным цинк становится, только превысив определенный для каждого вида растений критический уровень [3]. Наиболее низок этот критический уровень на дерново-подзолистой почве, в связи с высокой доступностью цинка для растений.

Закключение. Уровень влияния цинка на качество семенного потомства зависит от типа и агрохимических свойств почв.

Даже небольшое изменение концентрации цинка в почве способно изменять его биологическую доступность и пути накопления в растениях, поскольку избыток цинка, снижает потребность в нем как в биологически важном микроэлементе.

Большие концентрации цинка в почве (превышающие в 4 – 9 раз значения ОДК) способны оказывать негативное влияние на семенное потомство ячменя – увеличивать частоту цитогенетических нарушений, снижать всхожесть семян. В тоже время цинк являясь важным микроэлементом, необходимым для растений, положительно влияет на всхожесть семян ячменя выращенного на почвах слабозагрязненных цинком (не выше чем в 1 – 2 раза значения ОДК).

Таким образом, как недостаток, так и избыток цинка в почвах является лимитирующим для растений фактором способным оказывать влияние на качество их семенного потомства.

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Перевод с английского. М.: Мир, 1989. 439 с.
2. Пространственная агроэкология и рекультивация земель: монография / Демидов А.А., Кобец А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В. – Днепропетровск : Изд-во «Свидлер А.Л.», 2013. – 560 с.
3. Siedlecka, A., Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients. Acta Soc. Bot. Pol., 1995. V. 64, pp. 65 – 272.
4. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Ленинград.: Агропромиздат, ЛО, 1987. 142 с.
5. Цинк и кадмий в окружающей среде / Под ред. В.В. Добровольского. Москва.: Наука, 1992. 200 с.
6. ГН 2.1.7.2511-09 «Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве». Москва, 2009. С. 1 – 6.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. / Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1991. 151 с.
8. Воскресенская О.Л.; Чернавина И.А.; Аксенова В.А. Влияние избытка цинка в среде произрастания на поглощение металлов растениями овса. Физиология устойчивости растений Нечерноземной зоны РСФСР, 1987, – С. 34 – 41.
9. Макарова В.Г., Цыганов А.Р., Кирюшин В.А., Коновалов О.В., Вильдфлуш И.Р., Можайский Ю.А., Персикова Т.Ф., Желязко В.И. Экологические и медико-социальные аспекты охраны природной среды и здоровья населения – Минск: БИТ «Хата», 2002. 114 с.
10. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. Москва: Научный мир, 2004. 648 с.
11. Гэлстон А., Девис П., Сэттер Р. Жизнь зеленого растения: Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 552 с.
12. Классификация и диагностика почв СССР. Москва: «Колос», 1977. 221 с.
13. World reference base for soil resources. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 2006. 132 p.).
14. Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.
15. Практикум по агрохимии. / Под ред. В.Г. Минеева; МГУ им. Ломоносова, факультет почвоведения. М.: МГУ, 2001. 689 с.
16. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО. 1992. 61 с.
17. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // Сельскохозяйственная биология. 1994. № 1. С. 130 – 137.
18. Elsokkary, I. H. and Låg, J.: 1978, 'Distribution of Different Fractions of Cd, Pb, Zn and Cu in Industrially Polluted and Non-polluted Soils of Odda Region, Norway', Acta Agric. Scand. 23, pp. 262 – 268.
19. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. / Под ред. Н.Г. Зырина и Л.К. Садовниковой. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.
20. Васильевская В.Д. Устойчивость почв к антропогенным воздействиям / Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. / Под ред. Д.С. Орлова, В.Д. Васильевской. Москва: МГУ, 1994. С. 61 – 79.
21. Baker A.J.M. Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. Vol. 3. P. 643-654.
22. Соколов О.А., Черников В.А. Лукин С.В. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Белгород: Константа, 2008. 188 с.
23. Фогель Ф., Мотульски А. Генетика человека. 1990. Т. 2., Москва: Мир, 378 с.
24. Geraskin S.A., Dikarev V.G., Dikareva N.S., Vasiliyev D.V., Oudalova A.A., Alexakhin R.M., Zimina L.M., Zimin V.L., Blinova L.D. Bioindication of the anthropogenic effects on micropopulations of pinus sylvestris, 1. in the vicinity of a plant for the storage and processing of radioactive waste and in the Chernobyl NPP zone // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Т. 66. № 1 – 2. pp. 171 – 180.
25. Алиева И.Б., Воробьев И.А. Поведение клеток и распределение центриолей при многополосном митозе, индуцированном действием нокадазола // Цитология. 1989. Т. 31. № 6. С. 633 – 641.
26. Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами // Экология. 1992. № 4. С. 45 – 50.
27. Micieta K., Murin G. Three species of genus Pinus suitable as bioindicators of polluted environment // Water, Air, Soil Pollution. 1998. V. 104. pp. 413 – 422.
28. Munzuroglu O. Geckil H. Effects of metals on seed germination, root elongation and coleoptile and hypocotyl growth in Triticumaestivum and Cucumissativus // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2002. V. 43. pp. 203 – 213.
29. Lindsay, W. L., Zinc in soils and plant nutrition. Adv. Agron., 1972. T. 24, 147 p.