

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЦИНКА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ

В.Д. НАУМОВ, А.Е. СОРОКИН¹, В.И. САВИЧ², В.А. ТЮТИНА², Н.Л. КАМЕННЫХ

(¹Московский авиационный институт, ²Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева)

Исследования проведены на подзолистых и дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах и для сравнения на черноземах выщелоченных легко- и тяжелосуглинистых. Предлагается оценка состояния соединений цинка в почвах по фракционному составу его соединений, вытесняемых из почв 0,1 Н КСl, 0,1Н КСl + 0,01 М ЭДТА при разных рН среды, по скорости вытеснения цинка из твердой фазы почв, по депонирующей способности почв к Zn, по содержанию положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений цинка в почвах.

Содержание цинка, извлекаемого 0,1 Н КСl, больше при рН = 3 и меньше при рН = 5,8. При добавлении в раствор ЭДТА десорбция Zn из почв возросла, особенно из горизонта Ап.

Соединения цинка присутствуют в почвах в виде положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений. При добавлении в почву фосфатов отношение ZnL^+/ZnL^- уменьшилось. Депонирующая способность почв по отношению к цинку была выше в черноземе по сравнению с дерново-подзолистой почвой и выше в почвах более тяжелого гранулометрического состава. Скорость вытеснения десорбентами цинка из почв была ниже в почвах более тяжелого гранулометрического состава.

При компостировании почв в условиях избыточной влажности содержание подвижного цинка уменьшается, что, очевидно, обусловлено его сорбцией на гидроокисях Fe, Mn, Al.

После высушивания образцов содержание цинка, извлекаемого из почв десорбентами, возрастает.

Показана возможность увеличения содержания Zn в древесных культурах за счет его электрофоретического введения в ветви, увеличения содержания цинка в полевых культурах при внекорневой их подкормке гуматами и водорастворимым органическим веществом разлагающихся растительных остатков при анодном обогащении их цинком.

При электрофоретическом введении цинка в яблоню содержание Zn у анода было $0,5 \pm 0,1$ мг/100 г, а у катода – $2,8 \pm 0,2$ (напряжение 3 вольта, продолжительность электрофоретического введения 2 суток) [5, 7].

Положительное влияние на обогащение растений цинком оказывал и полив растений гуматом, обогащенным цинком за счет анодного его растворения. Так, в контрольном варианте содержание цинка в корнях и стеблях биотеста составляло соответственно $3,7 \pm 0,3$ и $2,3 \pm 0,1$ мг/100 г, а при поливе гуматом Zn соответственно $6,9 \pm 0,4$ и $4,5 \pm 0,2$ мг/100 г [5, 7].

Ключевые слова: цинк, почва, комплексоны, влияние рН, анодное обогащение, электрофорез, влияние избыточного увлажнения.

Введение

Содержание подвижных соединений цинка в почвах в значительной степени определяет их агроэкологическое состояние. Недостаток цинка для растений возникает при щелочной и нейтральной реакциях среды, при конкуренции его с Cu, Fe, Mn, Ni в процессе поглощения растениями, при осажении в корнях при больших дозах фосфорных удобрений. Избыток цинка в почвах возникает чаще при загрязнении им почв при антропогенном воздействии и продолжительном применении смеси

микроэлементов, содержащей цинк. Подвижность этого элемента в значительной степени зависит от рН среды и комплексообразующей способности почвенных растворов. Однако для разных типов почв эти зависимости отличаются, что и определяет необходимость их изучения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбраны подзолистые и дерново-подзолистые средне-суглинистые почвы Архангельской области, развитые на покровных суглинках: Р-1 – подзолистая почва, Р-3 дерново-подзолистая почва, Р-2 – подзолистая глееватая почва, Р-7 – дерново-подзолистая глееватая почва, а также черноземы выщелоченные легко- и тяжелосуглинистые на лессовидных суглинках [9].

Образцы почв компостировались при оптимальной ($W = 60\%$ ПВ) и избыточной влажности ($W > 100\%$ ПВ) 1 месяц, а затем во влажных и в высушенных образцах определялось содержание подвижного цинка в растворах 0,1н КС1 при рН = 3,8; 5,8 и 8,5 и в растворе 0,1н КС1 + 0,01м ЭДТА при рН = 4,3; 6,2 и 7,4.

При сравнении вариантов принятый уровень вероятности $P = 0,95$.

Экспериментальная часть

1. На вытеснение Zn из почв существенно влияет рН десорбента, а в полевых условиях рН почвенных растворов и корневых выделений [3]. Содержание подвижного цинка зависит и от условий увлажнения почв (компостирования их в условиях оптимальной и избыточной влажности) [2]. Это иллюстрируют данные таблицы 1.

Таблица 1

Содержание подвижного Zn, извлекаемого из почв 0,1н КС1 в зависимости от рН среды (влажная почва), n = 15

Варианты	рН	W = 60% ПВ	W = >100% ПВ
горизонт Ап	3,8	0,23±0,06	0,15±0,00
	5,8	0,22±0,06	0,07±0,02
горизонт А ₂ В	3,8	0,29±0,05	0,10±0,03
	5,8	0,22±0,03	0,12±0,04
горизонт В	3,8	0,28±0,06	0,26±0,11
	5,8	0,20±0,05	0,05±0,02

Как видно из представленных данных, в тех интервалах рН, которые возможны в исследуемых почвах, содержание подвижных форм цинка, извлекаемого из почв 0,1н КС1, больше при рН = 3,8 и меньше при рН = 5,8, больше для почв, компостированных при оптимальной влажности, больше в А₂В и В, по сравнению с Ап. При избыточной влажности эта закономерность сохраняется, но количество подвижного цинка снижается почти в два раза.

Согласно диаграммам растворимости соединений цинка, содержание подвижных форм Zn в почвах уменьшается при нейтрализации рН до 8,0 от 10^2 м/л до 10^{-2} – 10^{-3} м/л. Однако, затем при подщелачивании среды до рН = 10,0 содержание водорастворимого цинка снова возрастает до 10^{-1} м/л. Это отмечается для $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$, ZnO , $Zn_3(PO_4)_2 \cdot H_2O$, $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ [1, 6].

Для дерново-подзолистых почв нами была установлена следующая зависимость подвижного цинка от рН: $Zn = 28,8 - 3,2 \text{ рН}$; $R = 0,82$; $F = 12,3$.

2. Подвижность цинка в почвах зависит от наличия в почвенных растворах или в составе десорбентов, извлекающих его из почв, комплексонов. Это иллюстрируется данными таблицы 2.

Таблица 2

Содержание подвижного цинка, извлекаемого из почв десорбентом 0,1н КС1 + 0,01м ЭДТА в зависимости от рН среды (влажная почва), мг/л, n = 15

Варианты	рН	W = 60% ПВ	W = 100% ПВ
горизонт Ап	4,3	1,3±0,8	1,2±0,8
	6,2	1,4±1,0	1,4±0,9
горизонт А ₂ В	4,3	0,5±0,2	0,5±0,1
	6,2	0,4±0,1	1,6±1,2
горизонт В	4,3	0,3±0,1	0,4±0,1
	6,2	0,4±0,1	0,4±0,1

Как видно из представленных данных, количество цинка, вытесняемого из почв десорбентом КС1 + ЭДТА, выше, чем десорбентом КС1. Большее количество Zn извлекается из горизонтов Ап, содержащих большее количество гумуса. Зависимость вытеснения Zn от условий компостирования почв (при оптимальной и избыточной влажности не проявляется).

3. Соединения цинка в почве и в растениях присутствуют частично в виде положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений, что определяет особенности их миграции, поступления в растения, конкурирующего комплексообразования в процессах метаболизма растений.

Внесение в почву фосфатов изменяет соотношение положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений цинка. По полученным нами данным, внесение в почву $\text{KН}_2\text{PО}_4$ в результате конкурирующего комплексообразования органических лигандов и $\text{Н}_2\text{PО}_4^-$; НPО_4^{2-} , PО_4^{3-} привело к изменению доли положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений цинка в дерново-подзолистых почвах и взятых для сравнения черноземах. К 5 г почв добавляли 5 мл 0,1н $\text{KН}_2\text{PО}_4$ и после высыхания проводили электрофоретическое вытеснение из почв Zn.

Насыщение почв $\text{KН}_2\text{PО}_4$ привело к уменьшению соотношения $\text{ZnL}^{n+}/\text{ZnL}^n$ в черноземе от 1,2 до 0,3; в дерново-подзолистой почве – от 0,6 до 0,5 [5].

4. Состояние соединений цинка в почвах характеризуется кинетикой их десорбции из почв различными десорбентами. В проведенных исследованиях в качестве десорбента использовали раствор $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с рН = 4,8. К 10 г почвы приливали 140 мл раствора. Пробы по 10 мл брали через 10 минут, 1 час, 1 сутки, 1 неделю.

Кинетика вытеснения Zn из почв была в большей степени выражена для тяжелосуглинистого чернозема, меньше – для легкосуглинистого и еще меньше – для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, что соответствует теоретическим закономерностям. Так, отношение максимальной и минимальной концентрации цинка в растворе за 1 неделю компостирования и 10 минут взаимодействия составляло в тяжелосуглинистом черноземе 4,5–7,0; в легкосуглинистом – 3,0; в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве – 1,1–1,2 [2, 5].

Однако вытеснение катионов из почв обусловлено как минералогическим составом почв, так и содержанием органического вещества, формой связи ионов в твердой фазе почв (за счет осадкообразования, ионного обмена, комплексообразования). С течением времени взаимодействия почв и раствора освобождаются новые сорбционные места и происходит изменение рН, что приводит и к изменению скорости десорбции цинка. Так, в дерново-подзолистой почве концентрация цинка, вытесняемого 0,1н $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ составляла за 1 час взаимодействия и 1 неделю для горизонта Ап – 1,6 и 1,9 мг/л; для A_2B – 2,1 и 2,3; для В – 2,0 и 2,9 мг/л. В черноземе концентрация Zn , вытесняемого из почв указанным десорбентом, за 1 час взаимодействия и 1 неделю составляла для горизонта Ап – 1,6 и 0,8 мг/л; для АВ – 3,4 и 0,6 мг/л. При этом вытеснение из почв, например, Mn с увеличением времени десорбции значительно увеличивалось. Например, в дерново-подзолистой почве за 1 час и 1 неделю вытеснилось Mn из Ап – 0,8 и 12,9 мг/л; из A_2B – 1,1 и 5,1 мг/л; из В – 1,2 и 3,3 мг/л [7].

5. Содержание катионов в почвенных растворах и в растворах десорбентов определяется эффективными произведениями растворимости их осадков, эффективными константами ионного обмена из ППК на ион десорбента, эффективными константами устойчивости имеющихся в почве комплексных соединений цинка. Это содержание не полностью характеризует содержание подвижного Zn в твердой фазе почв [7].

Для оценки содержания подвижного цинка в твердой фазе почв проводят его исчерпывающее элюирование последовательными порциями десорбента, и, очевидно, что для разных десорбентов это содержание будет отличаться. Вычисляемая зависимость определяется в предыдущих исследованиях как депонирующая (возобновляющая) способность почв [7].

В выполненных нами исследованиях проводилось вытеснение цинка из чернозема 5 последовательными вытяжками раствора 0,05н HCl . По полученным данным, в тяжелосуглинистом и в легкосуглинистом черноземе (Ап) сумма вытесненных фракций мг/100 г составляла соответственно $1,2 \pm 0,8$ и $1,0 \pm 0,1$ мг/100 г. В 5-й фракции фильтрата содержание цинка в тяжелосуглинистом черноземе составляло $0,06 \pm 0,01$ мг/л, в легкосуглинистом – $0,02 \pm 0,01$ мг/л [2, 7].

6. Подвижность цинка в почвах существенно меняется в зависимости от развития в почвах условий оптимального или избыточного увлажнения [8]. Это иллюстрируют данные следующей таблицы.

Таблица 3

Влияние компостирования почв в условиях оптимальной и избыточной влажности на содержание подвижного цинка в подзолистых и дерново-подзолистых почвах *, мг/л, n = 15

Десорбент	Компостирование при оптимальной влажности	Компостирование при избыточной влажности
0,1н KCl рН = 3,8	$0,28 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,05$
5,8	$0,21 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,02$
8,5	$0,13 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,03$
0,1н KCl + 0,01м ЭДТА рН = 4,3	$0,64 \pm 0,18$	$0,64 \pm 0,19$
6,2	$0,58 \pm 0,20$	$0,99 \pm 0,44$
7,4	$0,80 \pm 0,16$	$0,62 \pm 0,23$

* – определение во влажной почве с учетом % H_2O

Компостирование почв при избыточной влажности в основном уменьшило десорбцию цинка раствором КС1 при рН = 3,8 в 8 случаях из 15; при рН = 5,8 – в 7 случаях из 15, при рН = 8,5 – в 10 случаях из 15.

При десорбции Zn из почв раствором КС1 + ЭДТА компостирование почв при избыточной влажности уменьшило количество подвижного цинка в 7 случаях из 15 при рН = 4,3; в 4 случаях из 15 при рН = 6,2 и в 10 случаях из 15 при рН = 7,4.

Очевидно, при увеличении степени развития анаэробнозиса увеличивается образование гидроокисей Fe, Mn, которые могут сорбировать Zn. Видимо, этим и объясняется уменьшение содержания его подвижных форм, вытесняемых из почв как КС1, так и КС1 + ЭДТА, при оглеении почв [10].

Содержание подвижных соединений цинка в почвах в значительной степени отличается для разных групп почв и изменяется с глубиной почвенного профиля. Так, по полученным нами данным, в дерново-подзолистой почве на покровном суглинке Мичуринского сада ТСХА содержание подвижного цинка (вытяжка $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с рН = 4,8) составляло в Ап – 2,3 мг/л, а в горизонте В₂ – 0,4; в оглеенной почве этого сада в Ап – 1,0 мг/л, а в В_г – 0,3 мг/л, что, очевидно, связано с сорбцией цинка на свежесформированных гидроокисях железа.

В автоморфной хорошо окультуренной дерново-подзолистой почве отношение Fe/Zn (в вытяжке $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с рН = 4,8) составляло в Ап – 8,1, а в оглеенной – 8,3; в А₂В соответственно 12,8 и 44,4 [5].

7. Подвижность цинка в почвах изменяется при высушивании образцов и зависит от характера высушивания (на солнце, на воздухе, в термостате при разных температурах) [7, 8]. Полученные нами данные приведены в следующей таблице.

Таблица 4

Влияние высушивания образцов на подвижность цинка в подзолистых и дерново-подзолистых почвах, мг/л, n = 15

Десорбент	Компостирование при избыточной влажности	
	влажные образцы	высушенные образцы
КС1, 0,1н рН = 3,8 5,8 8,5	0,20±0,05	0,24±0,06
	0,08±0,02	0,09±0,02
	0,08±0,02	0,12±0,03
0,1н КС1 + 0,01м ЭДТА рН = 4,3 6,2 7,4	0,28±0,03	0,31±0,04
	0,21±0,03	0,24±0,03
	0,12±0,03	0,16±0,04

При использовании непараметрических критериев различия при высушивании образцов содержание подвижного цинка, извлекаемого из почв десорбентом КС1 + ЭДТА, в основном увеличивается: при рН = 4,3 – в 14 случаях из 15; при рН = 6,2 – в 14 случаях из 15; при рН = 7,5 – в 11 случаях из 15.

При десорбции цинка из почв раствором КС1 при высушивании образцов его содержание в растворе также в основном выше: при рН = 3,8 – в 11 случаях из 15; при рН = 5,8 – в 8 случаях из 15; при рН = 8,5 – в 8 случаях из 15. Раствором КС1 вытесняется Zn в основном больше из горизонта В и меньше из горизонта А₂. Десорбентом КС1 + ЭДТА Zn в основном вытесняется больше из горизонтов В и Ап и меньше из горизонтов А₂ и А₂В.

8. Поступление Zn из почв в растения возможно как в виде Zn^{2+} , так и в виде комплексных соединений. Поглощенный корневой системой Zn^{2+} , ZnL вступает

в растениях в процессы конкурирующего комплексообразования и осадкообразования. Образование трудно растворимых соединений цинка в почве возможно в виде карбонатов, фосфатов, что снижает их поступление в растения.

В то же время, цинк может осаждаться при избытке P_2O_5 и в корневых системах растений, не поступая в вегетативные органы [4, 5]. Цинк может конкурировать за поступление в растения с другими катионами. Так, по полученным ранее данным, зависимость содержания подвижного цинка от содержания P_2O_5 , Cu, Mn в черноземе описывалась следующими уравнениями:

для слоя 0–20 см $Zn = -0,22 - 0,44 P_2O_5 + 10,0 Cu - 0,02 Mn$;

для слоя 20–60 см $Zn = -2,3 - 0,10 P_2O_5 - 6,29 Cu + 0,04 Mn$ [4, 5].

Оптимизация ситуации при недостатке подвижного цинка в почве достигается увеличением гумусированности и комплексообразующей способности почв. Так, по полученным данным растворимость $ZnCO_3$ при $pH = 2,4 - 3,7$ в растворе 0,1н KCl + водорастворимое органическое вещество из соломы пшеницы составляла $9,8 \pm 2,9$ мг/л, а при добавлении водорастворимого органического вещества из сена злаков – $12,0 \pm 0,2$ мг/л.

При недостатке содержания цинка оптимизация его состояния в растениях достигается электрофоретическим введением в ветви. Так, по полученным данным, в контрольном варианте в липе содержание в листьях было 0,7 мг на 100 г, а после электрофоретического введения – 1,9 (продолжительность введения 30 минут при напряжении 9 вольт).

При электрофоретическом введении цинка в яблоню содержание Zn у анода было $0,5 \pm 0,1$ мг/100 г, а у катода – $2,8 \pm 0,2$ (напряжение 3 вольта, продолжительность электрофоретического введения 2 суток) [5, 7].

Положительное влияние на обогащение растений цинком оказывал и полив растений гуматом, обогащенным цинком за счет анодного его растворения. Так, в контрольном варианте содержание цинка в корнях и стеблях биотеста составляло соответственно $3,7 \pm 0,3$ и $2,3 \pm 0,1$ мг/100 г, а при поливе гуматом Zn соответственно $6,9 \pm 0,4$ и $4,5 \pm 0,2$ мг/100 г [5, 7].

Оценка содержания цинка в почвах имеет важное агрономическое значение, определяющее его поступление в растения как биофильного элемента. Однако методы определения его подвижных форм в основном не дифференцированы для разных типов почв, отличающихся по pH, Eh, гумусированности, емкости поглощения, гранулометрическому и минералогическому составу. Для получения более высоких урожаев с/х культур необходимо и более точное знание поведения цинка в почвах и в отдельных горизонтах почв.

В работе предлагаются новые дополнительные методы оценки содержания подвижных соединений цинка в почвах. Для оптимизации поступления Zn в растения, как правило, применяют удобрения, содержащие цинк. Однако в последнее время все большее внимание уделяется использованию комплексона-тов Zn.

В работе приведены данные об увеличении поступления Zn в растения при его электрофоретическом введении в древесные культуры, при применении гуматов, обогащенных цинком, при применении комплексных соединений цинка.

Выводы

1. Предлагается оценка состояния соединений цинка в почвах по фракционному составу его соединений, вытесняемых из почв 0,1н KCl, 0,1н KCl + 0,01м ЭДТА при разных pH среды, по скорости вытеснения Zn из твердой фазы почв,

по депонирующей способности почв к цинку, по содержанию положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений Zn в почвах.

2. При компостировании почв в условиях избыточной влажности содержание подвижного цинка уменьшается.

3. После высушивания образцов содержание цинка, извлекаемого из почв десорбентами, возрастает.

4. Показана возможность увеличения содержания цинка в древесных культурах за счет его электрофоретического введения в ветви и увеличения содержания цинка в полевых культурах при внекорневой их подкормке гуматами и водорастворимым органическим веществом разлагающихся растительных остатков при анодном обогащении их цинком.

Библиографический список

1. Воробьева Л.А. Методические указания по расчету диаграмм растворимости соединений, М., МГУ, 1986, 71 с.

2. Гукалов В.Н., Савич В.И., Белюченко И.С. Информационно-энергетическая оценка состояния тяжелых металлов в компонентах агроландшафта, М., РГАУ-МСХА, 2015, 398 с.

3. Гукалов В.В., Савич В.И. Интегральная оценка кислотно-основного состояния почв таежно-лесной и лесостепной зоны, М., РГАУ-МСХА, ВНИИА, 2019, 408 с.

4. Наумов В.Д. Почвенно-экологические условия заболевания яблони розеточностью, М., РГАУ-МСХА, 2012, 444 с.

5. Никиточкин Д.Н., Савич В.И., Наумов В.Д., Байбеков Р.Ф. Модели плодородия почв под яблоню во времени и в пространстве, М., РГАУ-МСХА, ВНИИА, 2015, 272 с.

6. Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва – растения – удобрения, М., ЦИНАО, 1997, 230 с.

7. Савич В.И. Физико-химические основы плодородия почв, М., РГАУ-МСХА, 2013, 431 с.

8. Савич В.И., Наумов В.Д., Гукалов В.В. Локальное протекание почвообразовательных процессов, как фактор корректировки моделей плодородия почв, Международный с.-х. ж-л, 2017, № 1, с. 49–53.

9. Савич В.И., Белопухов С.Л., Подволоцкая Г.Б., Бакланова А.А., Гукалов В.В. Влияние эффектов протонирования и гидратообразования на вытеснение марганца за счет комплексообразования из дерново-подзолистых почв, Бутлеровские сообщения, 2017, т. 52, № 12, с. 46–51

10. Седых В.А., Савич В.И., Балабко П.Н. Почвенно-экологический мониторинг, М., РГАУ-МСХА, ВНИИА, 2013, 584 с.

AGROECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE STATUS OF ZINC COMPOUNDS IN SOD-PODZOLIC SOILS

V.D. NAUMOV, A.YE. SOROKIN¹, V.I. SAVICH², V.A. TYUTIN², N.L. KAMENNYKH

(¹ Moscow Aviation Institute,

² Russian Timiryazev State Agrarian University)

The authors carried out studies on podzolic and sod-podzolic medium loamy soils compared to leached chernozems, light and heavy loamy soils. The goal was to evaluate the state of zinc compounds in soils by the fractional composition of its compounds displaced from soils

0.1 N KCl, 0.1 N KCl + 0.01 M EDTA at different pH values, by the rate of zinc displacement from the solid soil phase, by the soil deposition capacity to Zn, and by the content of positively and negatively charged zinc complexes in soils. The content of zinc extracted by 0.1 N KCl is greater at pH = 3 and less at pH = 5.8. When adding EDTA to the solution, Zn desorption from soils increased, especially from the An horizon. Zinc compounds are present in soils in the form of positively and negatively charged complex compounds. When adding phosphates to the soil, the ZnL + / ZnL-ratio decreased. The depositing ability of soils with respect to zinc was higher in chernozem as compared to the sod-podzolic soil and higher in soils with a heavier particle-size distribution. The rate of zinc displacement from soils by desorbents was lower in soils of heavier particle-size distribution. When composting soils under conditions of excess moisture, the content of mobile zinc decreases, which is obviously caused by its sorption on Fe, Mn, Al hydroxides. After drying the samples, the content of zinc extracted from the soil by desorbents increases. The authors show possible ways of increasing the Zn content in tree crops due to its electrophoretic introduction into the branches, as well as increasing the zinc content in field crops by their foliar feeding with humates and water-soluble organic matter of decomposing plant residues during their anodic enrichment with zinc. During the electrophoretic introduction of zinc into the apple tree, the Zn content at the anode was 0.5 ± 0.1 mg/100 g, and that at the cathode – 2.8 ± 0.2 (at a voltage of 3 volts and electrophoretic treatment for a two-day period) [5, 7]. A positive effect on plant enrichment with zinc was also exerted by watering plants with zinc-enriched humate due to its anodic dissolution. As the check showed, the zinc content in the biotest roots and stems was 3.7 ± 0.3 and 2.3 ± 0.1 mg/100 g, respectively, and when watering with zinc-enriched humate – 6.9 ± 0.4 and 4, respectively 5 ± 0.2 mg/100 g [5, 7].

Key words: zinc, soil, complexones, pH effect, anodic enrichment, electrophoresis, excess moisture effect.

References

1. Vorobyeva L.A. Metodicheskiye ukazaniya po raschetu diagram rastvorimosti soedineniy [Guidelines for analyzing the solubility diagrams of compounds] – M., MGU, 1986: 71. (In Rus.)
2. Gukalov V.N., Savich V.I., Belyuchtnko I.S. Informatsionno-energeticheskaya otsenka sostoyaniya tyazhelykh metallov v komponentakh agrolandshafa [Information and energy assessment of the state of heavy metals in agrolandscape components] – M., RGAU-MSKHA, 2015: 398. (In Rus.)
3. Gukalov V.N., Savich V.I. Integralnaya otsenka kislotno-osnovnogo sostoyaniya pochv taezhno-lesnoy i lesostepnoy zony [Integral assessment of the acid-base state of the soils of the taiga-forest and forest-steppe zone] – M., RGAU-MSKHA, VNIIA, 2019: 408. (In Rus.)
4. Naumov V.D. Pochvenno-ekologicheskkiye usloviya zabolevaniya yabloni rozetchnostyu [Soil-ecological conditions of the rosette disease of apple trees] – M., RGAU-MSKHA, 2012: 444. (In Rus.)
5. Nikitochkin D.N., Savich V.I., Naumov V.D., Baybekov R.F. Modeli plodorodiya pochv pod yablonyu vo vremeni i v prostranstve [Time and space models of soil fertility under apple trees] – M., RGAU-MSKHA, VNIIA, 2015: 272. (In Rus.)
6. Ovcharenko M.M. Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie-udobreniye [Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system] – TSINAO, 1997: 230. (In Rus.)
7. Savich V.I. Fiziko-khimicheskkiye osnovy plodorodiya pochv [Physicochemical fundamentals of soil fertility] – M., RGAU-MSKHA, 2013: 431. (In Rus.)
8. Savich V.I., Naumov V.D., Gukalov V.N. Lokalnoye protekaniye pochvoobrazovatelnykh protsessov, kak factor korrektyrovki modeley plodorodiya pochv [Local flow of soil-forming processes as a factor for adjusting soil fertility models], Mezhdunarodniy s.-kh. zh-l, 2017; 1: 49–53. (In Rus.)

9. *Savich V.I., Belopukhov S.L., Podvolotskaya G.B., Baklanova A.A., Gukalov V.V.* Vliyaniye effektov protonirovaniya i gidratoobrazovaniya na vytesnenie margantsa za schet kompleksoobrazovaniya iz dernovo-podzolistykh pochv [Effect of protonation and hydrate formation on the manganese displacement due to complexation from sod-podzolic soils] // *Butlerovskiye soobscheniya*, 2017; 52; 12: 46–51. (In Rus.)

10. *Sedykh V.A., Savich V.I., Balabko P.N.* Pochvenno-ekologicheskiiy monitoring [Soil-ecological monitoring] – M., RGAU-MSKHA, VNIIA, 2013: 584. (In Rus.)

Наумов Владимир Дмитриевич, доктор биологических наук, профессор кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, тел.: +7-926-088-30-34 E-mail: naumovsol@rgau-msha.ru.

Савич Виталий Игоревич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, тел.: +7-905-501-14-46 E-mail: savich.mail@gmail.com.

Сорокин Андрей Евгеньевич, кандидат экономических наук, зав. кафедрой экологии, систем жизнеобеспечения и безопасности жизнедеятельности Московского авиационного института, тел.: +7-499-158-41-34, E-mail: kaf614@mail.ru.

Тютинa Виктория Андреевна, инженер каф. почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА.

Каменных Наталья Львовна, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Vladimir D. Naumov, DSc (Bio), Professor, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian Timiryazev State Agrarian University, phone: +7-926-088-30-34 E-mail: naumovsol@rgau-msha.ru.

Vitaliy I. Savich, DSc (Ag), Professor, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian Timiryazev State Agrarian University, phone: +7-905-501-14-46 E-mail: savich.mail@gmail.com.

Andrey Ye. Sorokin, PhD (Econ), Head, the Department of Ecology, Life Support Systems and Life Safety, Moscow Aviation Institute (National Research University), phone: +7-499-158-41-34, E-mail: kaf614@mail.ru.

Victoria A. Tyutina, engineer. the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian Timiryazev State Agrarian University

Nataliya L. Kamennykh, PhD (Bio), Associate Professor the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian Timiryazev State Agrarian University.