

УДК 504.03 (477.41/42)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ КАРТОФЕЛЯ И ОВОЩЕЙ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ НА АГРОСЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

*О. Н. Левшук, аспирант*

*Т. Н. Мыслыва, доктор сельскохозяйственных наук*

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Беларусь*

### Аннотация

На основании собственных экспериментальных исследований выполнена комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами (Cu, Zn, Mn, Pb, Cd,) картофеля и овощей, выращиваемых в пределах территории с индивидуальной жилой застройкой г. Горки. Установлено, что загрязнение овощей и картофеля имеет полиэлементный характер, а доминирующими их загрязнителями являются: для картофеля – Cd; для свеклы столовой и моркови столовой – Zn и Cd; для капусты белокочанной и лука репчатого – Zn; для свеклы столовой – Cu. По способности к биологическому накоплению тяжелые металлы располагаются в следующие ниспадающие ряды: картофель: Cu > Cd > Zn > Pb > Mn; свекла столовая: Cu > Zn > Cd > Mn > Pb; морковь столовая: Cd > Zn > Cu > Pb > Mn; капуста белокочанная и лук репчатый: Zn > Cu > Cd > Pb > Mn. Для моделирования пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей использовался метод радиальных базисных функций, с помощью которого определены три зоны с различным уровнем комплексного загрязнения. Посредством применения автоматизированных нейронных сетей из многослойных перцептронов с минимальным и максимальным количеством скрытых нейронов 3 и 10 соответственно созданы модели, позволяющие прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах. Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государственного управления, так и исследователями для разработки мер по снижению риска для здоровья населения от употребления в пищу загрязненной продукции.

**Ключевые слова:** *тяжелые металлы, картофель, овощи, загрязнение, прогнозирование.*

### Abstract

*O. N. Levshuk, T. N. Myslyva*

### MODELING AND FORECASTING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF HEAVY METALS CONTAMINATION OF POTATOES AND VEGETABLES CULTIVATED IN AGROSETTLE TERRITORY

On the basis of our own experimental studies, a comprehensive assessment of the contamination with heavy metals (Cu, Zn, Mn, Pb, Cd,) of potatoes and vegetables grown within the territory with individual residential buildings in the city of Gorki was carried out. It has been established that the pollution of vegetables and potatoes is of a multi-element nature, and their dominant pollutants are: for potatoes – Cd; for beet and carrot – Zn and Cd; for cabbage and onion – Zn; for beet – Cu. According to their ability to bioaccumulate, heavy metals are arranged in the following descending rows: potatoes: Cu > Cd > Zn > Pb > Mn; beet: Cu > Zn > Cd > Mn > Pb; carrot: Cd > Zn > Cu > Pb > Mn; cabbage and onion: Zn > Cu > Cd > Pb > Mn. The method of radial basis functions, which identified three zones with different levels of complex contamination of potatoes and vegetables with heavy metals, was used to model the spatial distribution of contamination. Models were created to predict the accumulation of heavy metals in potatoes and vegetables by using automated neural networks of multilayer perceptron with a minimum and maximum number of hidden neurons 3 and 10, respectively. The results of the study can be used by both local government bodies and researchers to develop measures to reduce the risk to public health from consuming contaminated food.

**Keywords:** *heavy metals, potatoes, vegetables, pollution, forecasting.*

### Введение

Стратегической целью развития сельского хозяйства Беларуси является формирование конкурентоспособного на мировом рынке и экологически безопасного производства сель-

скохозяйственных продуктов, необходимых для поддержания достигнутого уровня продовольственной безопасности, обеспечения полноценного питания и здорового образа

жизни населения при сохранении плодородия почв [1]. Современная социально-экономическая ситуация и сложившийся традиционный уклад жизни поддерживают высокий интерес населения к пополнению пищевого рациона за счет сельскохозяйственной продукции, выращиваемой в личных подсобных хозяйствах [2]. Валовой сбор картофеля, выращенного в Беларуси в таких хозяйствах в 2019 г., составил 5004,1 тыс. т; в Могилевской обл. – 675,1 тыс. т, овощей 1238,1 тыс. т и 162,1 тыс. т соответственно [3]. Примечательно, что индивидуальным огородничеством и садоводством занимаются как сельские жители, так и городское население, особенно в городах с наличием значительных площадей индивидуальной жилой застройки. Однако качество растениеводческой продукции, получаемой на таких землях, вызывает беспокойство. В Беларуси практически отсутствуют как ее мониторинг (за исключением эпизодических моментов контроля качества на организованных рынках при ее реализации), так и контроль применения минеральных удобрений и средств защиты растений на частных земельных участках, поскольку традиционно контроль со стороны государства осуществляется исключительно над сельскохозяйственными землями. В то же время качество сельскохозяйственной продукции, получаемой в личных подсобных хозяйствах, напрямую зависит от качества почвы, так как она является наиболее чувствительным индикатором эколого-геохимической обстановки территории и локалитетом для депонирования и пересечения путей мигра-

### Основная часть

Цель данной работы – выполнение исследований, направленных на оценку уровня и выполнение прогноза пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами (медь, цинк, марганец, свинец, кадмий) картофеля и овощей, выращиваемых населением в пределах индивидуальной жилой застройки г. Горки (Могилевская обл., Беларусь).

Для достижения указанной цели предусматривалось решение следующих задач:

1) определить уровни загрязнения тяжелыми металлами и установить особенности накопления поллютантов картофелем и овощами, выращиваемыми в пределах индивидуальной

жилой застройки агропоселительных территорий г. Горки;

2) применяя функциональные возможности геоинформационных систем, выполнить моделирование и визуализацию пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей;

3) путем обучения нейронных сетей построить сложные нелинейные зависимости, позволяющие прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах в зависимости от содержания поллютантов в почве, биологических особенностей сельскохозяйственных культур и агрохимических свойств почвы.

ции химических элементов, в частности токсикантов. Однако отнесение почвы к разряду опасно загрязненной, исходя из повышенного содержания в ней тяжелых металлов, еще не значит, что и выращиваемые на ней картофель и овощи будут также иметь высокий уровень загрязнения. Установлено, что растения владеют целым комплексом защитных свойств, в результате чего в органы запаса ассимилянтов попадает ослабленный поток имеющихся в почве в избыточных количествах химических элементов [4], поэтому не всегда на загрязненной почве будет получена такая же продукция. Кроме того, различные овощные культуры способны в разной степени накапливать поллютанты, в зависимости от свойств вещества-загрязнителя, биологических особенностей самого растения, места его произрастания и даже от сорта сельскохозяйственной культуры и генотипов одного и того же вида [5].

Следует отметить, что, несмотря на широкое изучение проблем, связанных с загрязнением окружающей среды тяжелыми металлами, подавляющее большинство подобного рода исследований касается прежде всего оценки уровня загрязнения почвы, растений и иных компонентов ландшафта в мегаполисах и городах с высокой степенью концентрации промышленного производства [6–8]. Исследований по оценке экологического состояния агропоселительных ландшафтов малых городов, значительная часть территории которых представлена индивидуальной жилой застройкой, проведено еще недостаточно.

Исследования выполнялись в 2017–2021 гг. на территории микрорайонов Заречье, Слобода и Академия, а также садовых товариществ

«Труд», «Иваново», «Яблонька», «Верхнее озеро» и «Садовод», находящихся в пределах административной границы г. Горки (рис. 1).



Рис. 1. Схема отбора образцов картофеля и овощей на территории участков индивидуальной жилищной застройки в пределах г. Горки

Отбор проб овощных культур (свекла столовая, морковь столовая, капуста белокочанная, лук репчатый) и картофеля проводился в соответствии с требованиями, указанными в ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 28168-89. Пробы товарной продукции отбирались на исследуемых участках по диагонали, через равные расстояния, в трех точках, массой 1 кг каждая.

Перечень приоритетных загрязнителей определен на основании анализа источников, в которых представлены результаты исследований, выполненных на территории Республики Беларусь и других сопредельных государств. Кроме того, проведен разведочный

анализ, в ходе которого дополнительно определялись содержание в растениях никеля, кобальта, молибдена, бора и железа. Однако, поскольку фактические уровни содержания данных элементов в растениях были на несколько порядков ниже предельно допустимых, для дальнейшего определения и изучения выбраны именно Cu, Zn, Pb, Cd и Mn.

Аналитические исследования проводились на базе химико-экологической лаборатории УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», аккредитованной в Системе аккредитации Республики Беларусь в соответствии с СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Определение содержания тяжелых метал-

лов выполнялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе SOLAAR S Series AA фирмы *Thermo Scientific* (США). Экстрагирование тяжелых металлов выполняли 1н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, минерализацию рас-

тительных проб проводили методом сухого озоления. Информация о статистических характеристиках выборки данных о содержании тяжелых металлов в картофеле и овощах представлена в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных о содержании тяжелых металлов в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, мг/кг сухого вещества

Название элемента	Статистическая характеристика показателя									
	min	max	mid	Sd	Cv, %	Асимметрия	Экссесс	1-й квартиль	med	3-й квартиль
Картофель, n = 150										
Медь	1,49	6,23	3,02	0,93	30,79	0,98	4,48	2,43	2,87	3,44
Цинк	7,18	20,05	10,55	2,59	24,55	1,23	4,96	8,54	9,83	12,29
Марганец	3,54	10,77	6,12	1,51	24,67	1,14	4,34	5,21	5,72	6,71
Свинец	0,01	1,76	0,33	0,39	118,18	1,56	5,54	0,02	0,21	0,55
Кадмий	0,001	0,85	0,11	0,17	154,55	2,66	10,19	0,03	0,04	0,08
Свекла столовая, n = 129										
Медь	3,02	11,29	5,96	1,86	31,21	0,59	3,22	4,78	5,90	7,11
Цинк	15,98	65,24	30,74	9,94	32,34	1,35	5,51	23,82	29,42	35,12
Марганец	7,32	65,73	22,68	11,29	49,78	1,47	6,02	13,76	18,76	28,47
Свинец	0,01	0,73	0,08	0,13	162,50	3,52	17,54	0,02	0,03	0,08
Кадмий	0,001	0,24	0,08	0,05	62,50	0,74	3,66	0,04	0,07	0,11
Морковь столовая, n = 123										
Медь	0,99	8,23	4,44	1,69	38,06	0,65	2,82	3,42	3,92	5,37
Цинк	9,55	45,62	19,65	7,77	39,54	1,33	4,87	14,15	18,46	23,0
Марганец	7,20	80,40	14,14	11,64	82,32	4,73	27,04	9,47	11,39	13,79
Свинец	0,001	2,60	0,54	0,57	105,56	1,49	5,55	0,06	0,35	0,77
Кадмий	0,31	40,13	8,85	8,99	101,58	1,76	5,95	2,38	4,48	12,16
Капуста белокочанная, n = 60										
Медь	1,22	4,52	2,16	0,90	41,67	1,19	3,67	1,54	1,82	2,67
Цинк	9,36	29,20	18,44	5,65	30,64	0,26	2,25	14,83	17,69	22,48
Марганец	7,65	21,75	13,28	3,89	29,29	0,40	2,40	10,55	12,36	16,69
Свинец	0,11	9,02	0,96	1,98	206,25	3,60	15,17	0,13	0,32	0,98
Кадмий	0,011	0,089	0,025	0,021	84,00	1,62	5,19	0,012	0,013	0,039
Лук репчатый, n = 129										
Медь	1,03	6,35	2,75	1,23	44,73	1,24	3,84	1,89	2,36	3,09
Цинк	8,57	44,54	16,47	7,88	47,84	2,06	7,50	11,43	14,56	17,66
Марганец	5,80	17,91	9,55	3,44	36,02	1,10	3,02	7,13	8,06	12,15
Свинец	0,11	1,48	0,23	0,26	113,04	3,16	13,69	0,12	0,13	0,17
Кадмий	0,01	0,11	0,026	0,017	65,38	2,82	13,79	0,015	0,022	0,030

Примечание. Min – минимальное значение; max – максимальное значение; mid – среднее значение; Sd – среднеквадратическое отклонение; Cv – коэффициент вариации; med – медианное значение.

Для оценки степени опасности элемента-загрязнителя использовали коэффициент опасности элемента ( $K_{оп}$ ) – соотношение между концентрацией поллютанта в биомассе растения и его предельно допустимой концентрацией:

$$K_{оп} = C_i / ПДК_i, \quad (1)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества в биомассе растения, мг/кг;

ПДК $_i$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/кг.

Для количественной оценки поступления тяжелых металлов из почвы в растения использовался коэффициент биологического накопления элемента ( $K_{бн}$ ):

$$K_{бн} = C_p / C_n, \quad (2)$$

где  $C_p$  – концентрация загрязняющего вещества в биомассе растения, мг/кг;

$C_n$  – концентрация загрязняющего вещества в почве, мг/кг.

Анализ пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами выполнялся с помощью функциональных возможностей модуля «Геопространственный анализ» программного продукта ArcGIS версии 10.5.

Для обучения нейронной сети и создания сложных нелинейных зависимостей использовались функциональные возможности прикладного программного продукта Statistica версии 12.0 [9].

Загрязнение картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных тер-

риторий г. Горки, имеет полиэлементный характер и обусловлено как условиями места произрастания растений и уровнем загрязнения почвы, так и их биологическими особенностями. По содержанию в товарной продукции картофеля и овощей преобладающие позиции занимают цинк, марганец и медь, относящиеся к важным микроэлементам, необходимым для нормального роста и развития растений. Исключение составляет морковь столовая, относящаяся к семейству *Compositae*; она накапливает кадмий в больших количествах, чем необходимые микроэлементы (табл. 1). На способность моркови накапливать значительные количества кадмия в корнеплодах даже на незагрязненной почве указывается и в исследованиях словацких ученых [10]. Установлена средняя положительная корреляционная связь между содержанием в почве подвижного фосфора и калия и содержанием кадмия в корнеплодах моркови:  $r = 0,56$  и  $0,69$  соответственно. В то же время в исследованиях польских ученых не было обнаружено тесной корреляции между уровнем содержания кадмия в корнеплодах моркови и содержанием в почве подвижных фосфора и калия [11].

В разрезе отдельных культур концентраторами меди являются картофель и свекла столовая, цинка – капуста белокочанная и лук репчатый, кадмия – морковь столовая, а по способности к биологическому накоплению тяжелые металлы располагаются в следующие ниспадающие ряды (табл. 2).

Таблица 2. Ряды интенсивности накопления тяжелых металлов картофелем и овощами, выращиваемыми в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Название культуры	Ряд накопления
Картофель	Cu < Cd < Zn < Pb < Mn
Свекла столовая	Cu < Zn < Cd < Mn < Pb
Морковь столовая	Cd < Zn < Cu < Pb < Mn
Капуста белокочанная	Zn < Cu < Cd < Pb < Mn
Лук репчатый	Zn < Cu < Cd < Pb < Mn

Наличие корреляционной зависимости между содержанием Cu, Zn, Mn и Pb в почве и в товарной продукции картофеля и овощей

свидетельствует о том, что главным источником поступления этих тяжелых металлов в растения является именно почва (табл. 3).

**Таблица 3. Величина коэффициента корреляции Спирмена, характеризующая взаимосвязь между содержанием тяжелых металлов в урбаноземах и товарной продукции картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки**

Название культуры	Название элемента				
	медь	цинк	марганец	свинец	кадмий
Картофель	0,7202	0,8262	0,7083	0,8048	0,3882
Свекла столовая	0,6270	0,6894	0,5699	0,5792	0,2535
Морковь столовая	0,5740	0,6809	0,6658	0,7535	0,3843
Капуста белокочанная	0,9414	0,9278	0,9376	0,9549	0,9289
Лук репчатый	0,6603	0,7176	0,7065	0,7495	0,1289

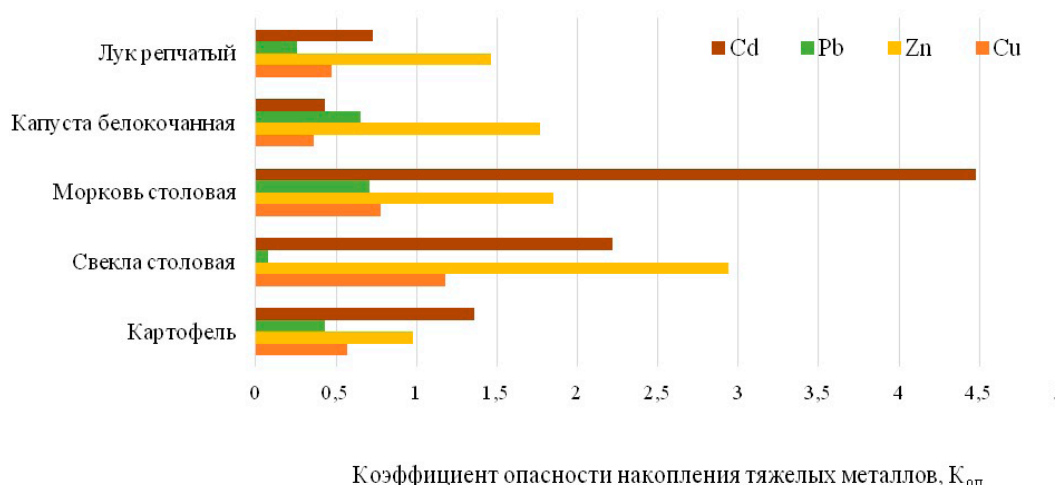
В то же время для содержания Cd сила такой зависимости оценена как слабая, что свидетельствует о том, что почва не является основным источником поступления кадмия в растения, как это бывает в случае остальных исследуемых поллютантов, а основным путем его транслокации является сорбция аэрозольных загрязнений листовой поверхностью и их диффузия через устьица. Исключение составила лишь капуста белокочанная, для которой корреляционная связь между содержанием кадмия в почве и надземной части оценена как сильная. Это, по нашему мнению, может быть связано с тем, что капуста белокочанная, как и другие представители семейства *Brassicaceae*, относится к гипераккумуляторам цинка [12]; она токсикотолерантна к данному тяжелому металлу [13] и способна накапливать его в больших количествах по сравнению с другими микроэлементами, на что указывается в исследованиях [14, 15]. Из-за химического сродства Cd и Zn растительный организм не различает эти элементы, вследствие чего интенсивно накапливает кадмий совместно с цинком [16, 17]. Избыток свинца в почве также усиливает поступление в растения ионов  $Cd^{2+}$ , на что указывают другие авторы [18, 19].

Важно отметить, что поступление тяжелых металлов в почву в пределах территории интереса может быть обусловлено как природными, так и антропогенными факторами. Среди природных преобладающим фактором следует считать минералогический состав материнских пород, на которых сформировался

почвенный покров, а среди антропогенных – неконтролируемое и научно не обоснованное применение в частном секторе хозяйствования органических и минеральных удобрений, агромелиорантов, а также химических средств защиты растений. Определенную роль играет также привнесение загрязненных воздушных масс, содержащих элементы-поллютанты в форме аэрозолей, которые впоследствии оседают на поверхность почвы, а загрязнители мигрируют в низлежащие слои почвенного профиля.

Санитарно-гигиеническое качество картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, является неудовлетворительным, а доминирующими их загрязнителями выступают: для картофеля Cd (медианное значение  $K_{оп} = 1,36$ ); для свеклы столовой и моркови столовой – Zn и Cd (медианное значение  $K_{оп} = 2,94$  и  $2,22$  и  $1,85$  и  $4,48$  соответственно); для капусты белокочанной и лука репчатого – Zn (медианное значение  $K_{оп} = 1,77$  и  $1,46$  соответственно); для свеклы столовой – Cu (медианное значение  $K_{оп} = 1,18$ ) (рис. 2).

С учетом того, что медианное значение  $K_{оп}$  содержания цинка в картофеле составляет  $0,98$ , колеблясь от  $0,72$  до  $2,0$ , медианное значение  $K_{оп}$  содержания меди в моркови столовой составляет  $0,78$ , колеблясь от  $0,20$  до  $1,65$ , а медианное значение  $K_{оп}$  содержания кадмия в луке репчатом составляет  $0,73$ , колеблясь от  $0,33$  до  $3,64$ , данные элементы следует считать возможными потенциальными загрязнителями товарной продукции вышеуказанных сельскохозяйственных культур.



Коэффициент опасности накопления тяжелых металлов,  $K_{оп}$

Рис. 2. Медианное значение величины коэффициента опасности накопления тяжелых металлов ( $K_{оп}$ ) в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Важно подчеркнуть, что среди исследованной растениеводческой продукции максимальную способность к накоплению поллютантов имеет свекла столовая, которую следует рассматривать в качестве основного источника поступления тяжелых металлов в организм человека. Характерным для всех исследуемых культур оказалось и накопление кадмия, более частое, чем других элементов, что дает основание в случае наличия опасных уровней загрязнения почвы рассматривать данный элемент в качестве потенциального источника поступления тяжелых металлов в организм человека. Также установлена тесная корреляционная зависимость между коэффициентом биологического накопления картофелем и овощами свинца и коэффициентом опасности его содержания в товарной продукции, свидетельствующая о том, что при прочих равных условиях наиболее вероятно загрязнение данным поллютантом свеклы столовой ( $R^2 = 0,94$ ), лука репчатого ( $R^2 = 0,85$ ) и капусты белокочанной ( $R^2 = 0,80$ ).

Чтобы спрогнозировать пространственное загрязнение картофеля и овощей (то есть для построения карт загрязнения по каждой культуре и каждому элементу-загрязнителю) выполнялся поиск наиболее оптимального метода интерполяции.

Для этого вначале исследовалась эффективность следующих детерминированных методов: метод обратных взвешенных расстояний; метод локальных полиномов; метод радиальных базисных функций.

Методы детерминированной интерполяции создают поверхности из измеренных то-

чек, основываясь или на степени схожести (обратные взвешенные расстояния), или на уровне сглаживания (радиальные базисные функции).

Установлено, что наиболее оптимальным является метод радиальных базисных функций, поскольку при выполнении кросс-валидации полученных интерполированных поверхностей именно он обеспечивал наименьшую ошибку.

Для прогнозирования пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами, визуализированные результаты которого представлены на рис. 3–5, использован метод радиальных базисных функций (*Radial Basis / Bias Functions, RBF*), относящийся к детерминированным методам интерполяции и представляющий собой жесткий интерполятор, создающий сглаженные поверхности. В отличие от других детерминированных методов интерполяции (в частности, метода обратных взвешенных расстояний, также являющегося жестким интерполятором) радиальные базисные функции позволяют интерполировать значения выше максимального или ниже минимального измеренного значения в выборке геопространственных данных. В качестве радиальных базисных функций чаще всего использовались полностью регуляризованный сплайн и сплайн с натяжением, и лишь в отдельных случаях (прогнозирование пространственного распределения загрязнения цинком моркови столовой и лука репчатого) применялась мультиквадратичная функция (табл. 4).

Далее для каждой культуры и каждого элемента подбирались наиболее оптимальные параметры модели, позволяющие спрогнозировать его пространственное распределение.

Первый параметр – конкретная подобранная функция, наиболее точно описывающая распределение загрязнения (она дает наименьшую ошибку при выполнении кросс-валидации), указанная в табл. 4 как функция ядра. Всего таких функций может быть пять ( $h$  – расстояние;  $\delta$  – сглаживающий параметр, указанный в табл. 4 как параметр ядра):

- тонкий сплайн (TPS):  $B(h) = (h^2 + \delta^2) \lg(h^2 + \delta^2)$ ;
- сплайн с напряжением (SPT):  $B(h) = (h^2 + \delta^2)^{1/2}$ ;
- полностью регуляризованный сплайн (CRS):  $B(h) = \lg(h^2 + \delta^2)$ ;
- мультиквадратичная функция (MQ):  $B(h) = \sqrt{h^2 + \delta^2}$  ;
- обратная мультиквадратичная функция (IMQ):  $B(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + \delta^2}}$ .

Поскольку для пространственного загрязнения картофеля и овощей использовались

методы геостатистики, оперирующие геопространственными данными (не путать с традиционной статистикой, которая оперирует случайными величинами), а инструментом для создания прогнозных моделей являлся модуль «Геопространственный анализ» программного продукта ArcGIS версии 10.5, при создании оптимальной модели учитывались и факторы, характеризующие пространственное распределение геоданных, в частности тип сектора (может быть 1 без смещения, 4 без смещения, 8 без смещения, 4 со смещением 45 градусов и 8 со смещением 45 градусов) и радиус полуоси выбранного сектора. Под сектором подразумевается окружность (или эллипс, если речь идет о секторе со смещением), в пределах которой значения измеренных точек используются для прогнозирования значения в точке, где измерения не проводились (показана желтым цветом).

**Таблица 4. Параметры моделей пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки (метод интерполяции – радиальные базисные функции)**

Название культуры	Тяжелый металл	Функция ядра <sup>1</sup>	Параметр ядра <sup>2</sup>	Тип сектора <sup>3</sup>	Радиус полуоси <sup>4</sup> , м
Картофель	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0697	1 без смещения	1888,231
	Zn				
	Pb	Сплайн с натяжением	0,1004		
	Cd				
Морковь столовая	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0592	1 без смещения	1865,778
	Zn	Мультиквадратичная	0		
	Pb	Полностью регуляризованный сплайн	0,0135		
	Cd	Сплайн с натяжением	0,0129		
Свекла столовая	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0592	4 без смещения	1888,231
	Zn	Сплайн с натяжением	0,0853		
	Pb	Сплайн с натяжением	0,0853	1 без смещения	
	Cd				
Капуста белокочанная	Cu	Сплайн с натяжением	0,0083	4 без смещения	1392,306
	Zn		0,0738		
	Pb	Полностью регуляризованный сплайн	0,0181	1 без смещения	
	Cd		0,0513	4 без смещения	
Лук репчатый	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0614	1 без смещения	1888,231
	Zn	Мультиквадратичная	0		
	Pb	Сплайн с натяжением	0,1004		
	Cd				

Примечание. <sup>1</sup> – функция, наиболее точно описывающая характер распределения загрязнения; <sup>2</sup> – сглаживающий параметр; <sup>3</sup> – окружность, в пределах которой значения измеренных точек используются для прогнозирования значения в точке, где измерения не проводились; <sup>4</sup> – радиус окружности.



По результатам выполненных исследований определены три зоны с различным уровнем комплексного загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами. Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение незагрязненных клубней картофеля, составляет 1249,58 га, в то время как территория, в пределах которой следует избегать выращивания данной культуры, занимает 435,27 га. Территориально такие зоны размещены в пределах микрорайона Заречье, левого берега р. Поросицы (район ул. В. Чапаева, О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого, К. Циолковского, С. Королева), части садового товарищества «Садовод», района ул. Соловьинной, Гаражной и Дворцовой, в районе ул. Высокой (рис. 3 а).

Площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно не загрязненных тяжелыми металлами корнеплодов свеклы, составляет 182,69 га, а территория, в пределах которой следует избегать выращивания данной культуры, – 661,09 га. Территориально

зоны с максимальным загрязнением товарной продукции столовой свеклы размещены в пределах северной и восточной части города, микрорайона Заречье, левого берега р. Поросицы (район улиц О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого), части улиц Якубовского, Бруцера-Ерофеевской и Красинской (рис. 3 б).

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных корнеплодов моркови, составляет 904,77 га, в то время как площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания столовой моркови, – 159,84 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно экологически безопасной товарной продукции моркови, размещены в пределах садовых товариществ «Садовод» и «Труд», в районе дендропарка, центральной части города и микрорайона Заречье, а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания моркови, – в микрорайоне Слобода и в районе гаражного кооператива «Белый ручей» (рис. 4 а).

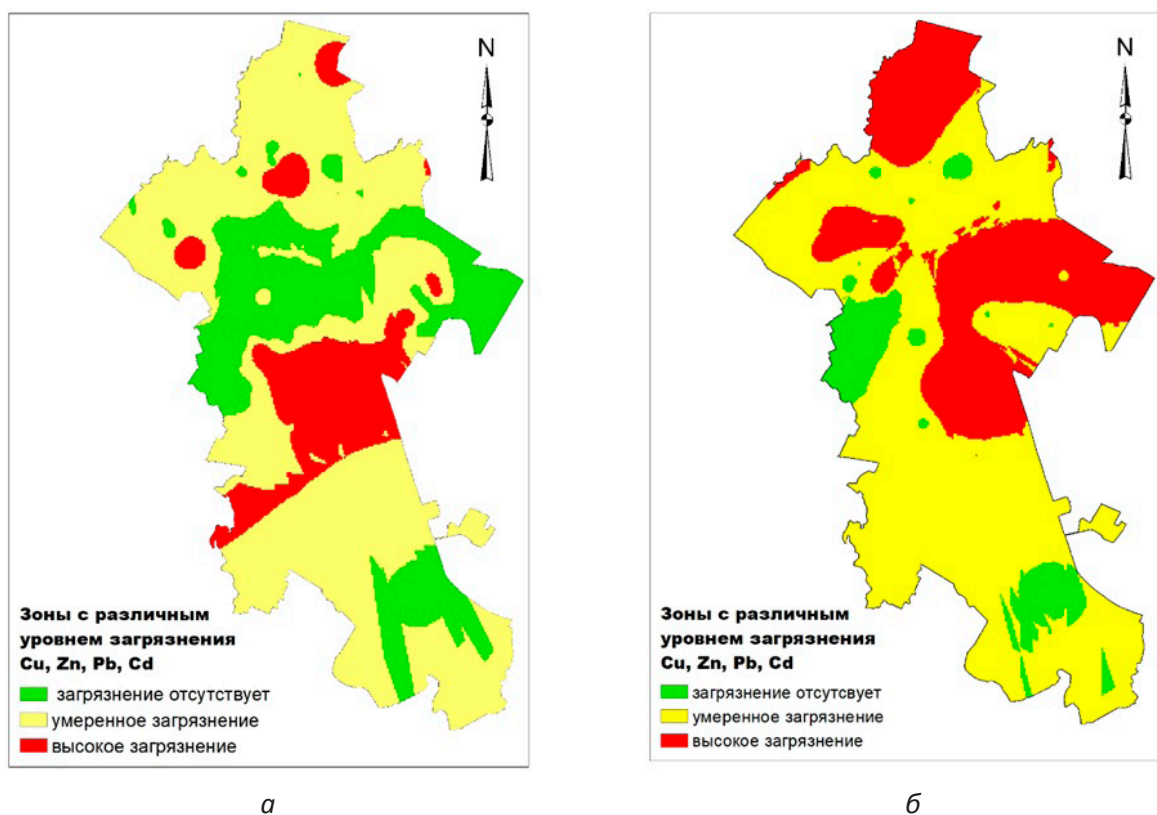


Рис. 3. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами картофеля (а) и корнеплодов столовой свеклы (б), выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

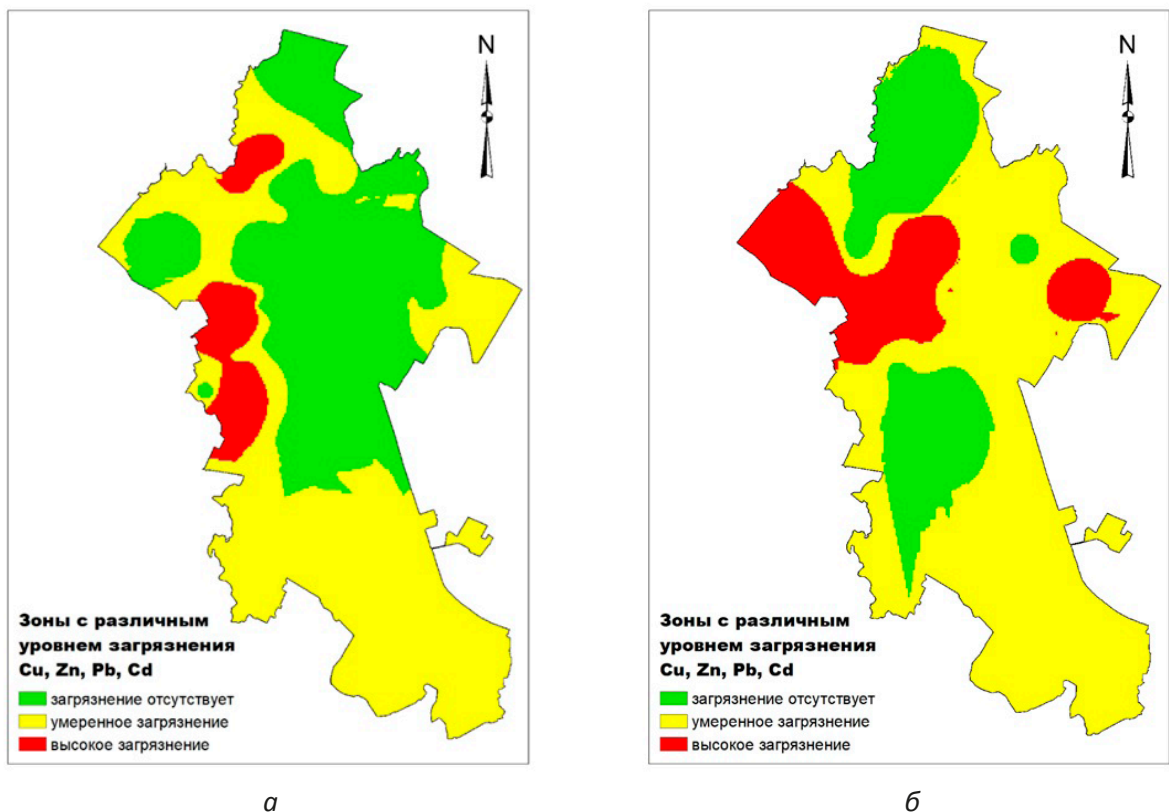


Рис. 4. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами моркови столовой (а) и капусты белокочанной (б), выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

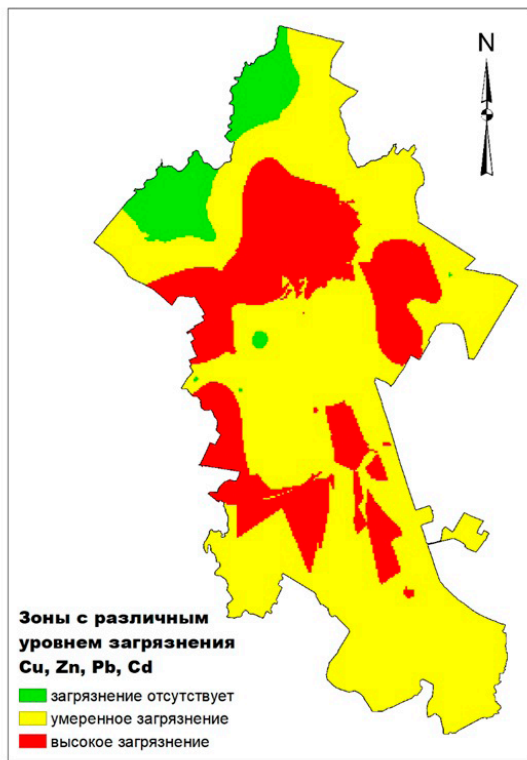


Рис. 5. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами лука репчатого, выращиваемого в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных кочанов капусты, составляет 494,92 га, а площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания капусты белокочанной, занимает 349,40 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных кочанов капусты, размещены в пределах садового товарищества «Садовод» и микрорайона Заречье, а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания капусты белокочанной, – в районе ул. Машерова, на территории садового товарищества «Труд» и в пределах левого берега р. Поросицы (район ул. О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого) (рис. 4 б).

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненной товарной продукции, составляет 157,42 га, в то время как площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания лука репчатого, – 584,54 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненного лука репчатого, размещены в пределах садового товарищества «Садовод», северной части садового товарищества «Труд» и в районе гаражного кооператива «Белый ручей», а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания лука, – в районе ул. Якубовского, Бруцера-Ерофеевской, Фурманова, Матросова, Космонавтов, в северной и южной части микрорайона Слобода и в районе ул. Первомайской и железнодорожной станции Погдино (рис. 5).

Для создания моделей, позволяющих прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, использованы автоматизированные нейронные сети из многослойных перцептронов с минимальным и максимальным количеством скрытых нейронов 3 и 10 соответственно (табл. 5).

По результатам тестирования обученных нейронных сетей установлено, что в отношении картофеля они с наибольшей эффек-

тивностью способны спрогнозировать накопление им Zn и Mn (MAPE = 2,54 % и 0,51 % соответственно). Нейронную сеть для прогноза накопления кадмия в клубнях картофеля не удалось обучить даже при использовании в качестве независимых переменных содержания данного элемента в почве и коэффициента его биологического накопления. Поэтому можно с определенной долей вероятности констатировать, что на поступление кадмия в растения картофеля более интенсивно влияет его поглощение из аэральных загрязнений, нежели из почвы. Для свеклы столовой обученная нейронная сеть с наибольшей эффективностью способна спрогнозировать накопление Cu и Mn (MAPE = 2,76 % и 1,26 % соответственно), а для моркови столовой – Cu (MAPE = 1,38 %). Поскольку не удалось обучить нейронную сеть для выполнения достоверного прогноза накопления свинца в корнеплодах свеклы столовой и моркови столовой, можно с определенной долей вероятности предположить, что на накопление данного элемента могут влиять факторы, не учтенные в модели, в частности сортовые особенности данных овощных культур. Что касается агрохимических свойств почвы в модели нелинейной регрессии, создаваемой для прогнозирования накопления меди и цинка в столовых корнеплодах, был учтен показатель pH, поскольку и Cu, и Zn легкоподвижны в кислых почвах и способны накапливаться в больших количествах в растениях, произрастающих на таких почвах. Нейронные сети, обученные для прогноза загрязнения кочанов капусты белокочанной, оказались наиболее высокоэффективны в сравнении с нейронными сетями, созданными для прогноза загрязнения других культур. Максимальная эффективность созданной прогнозной модели установлена в отношении прогнозирования накопления Cu и Cd (MAPE = 0,15 % и 0,58 % соответственно). Для лука репчатого получены эффективные нейронные сети, способные с высокой вероятностью прогнозировать накопление данной культурой Cu и Mn (MAPE = 0,11 % и 0,19 % соответственно).

Таблица 5. Характеристики нейронных сетей, обученных для выполнения прогноза загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Элемент, содержание которого прогнозируется	Факторы с максимальным влиянием			Архитектура нейронной сети	Средняя абсолютная ошибка тестовой выборки данных, MAPE, %	Функция активации	
	содержание в почве	коэффициент биологического накопления	агрохимические свойства почвы			скрытого нейрона	исходного нейрона
<i>Картофель, n = 150</i>							
Cu	Cu, Cd	Cu	–	MLP 3–9–1	5,39	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Cu	Zn	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MLP 4–8–1	2,54	экспоненциальная	тождественная
Mn	Mn	Mn	K <sub>2</sub> O	MLP 3–7–1	0,91	тангенциальная	экспоненциальная
Pb	Pb, Cu	Pb	–	MLP 3–10–1	10,34	тангенциальная	тангенциальная
<i>Свекла столовая, n = 129</i>							
Cu	Cu	Cu	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MLP 3–9–1	2,76	экспоненциальная	логистическая
Zn	Zn	Zn	pH	MLP 3–7–1	4,46	логистическая	тангенциальная
Mn	Mn, Zn	Mn	K <sub>2</sub> O	MLP 4–6–1	1,26	экспоненциальная	тождественная
Cd	Cd	Cd	–	MLP 2–8–1	9,49	экспоненциальная	тангенциальная
<i>Морковь столовая, n = 123</i>							
Cu	Cu	Cu	pH	MLP 3–7–1	1,38	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Mn	Zn	–	MLP 3–9–1	9,38	логистическая	тождественная
Mn	Mn	Mn	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MLP 3–4–1	7,98	тангенциальная	тождественная
Cd	Cd	Cd	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MLP 3–9–1	6,60	экспоненциальная	тождественная
<i>Капуста белокочанная, n = 60</i>							
Cu	Cu, Zn, Pb	Cu	–	MLP 4–10–1	0,15	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Cu	Zn	pH	MLP 4–4–1	5,18	логистическая	тождественная
Mn	Mn, Cd	Mn	–	MLP 3–8–1	1,43	экспоненциальная	тождественная
Pb	Pb, Mn	Pb	–	MLP 3–10–1	3,81	тангенциальная	экспоненциальная
Cd	Cd	Cd	–	MLP 2–9–1	0,58	тангенциальная	тождественная
<i>Лук репчатый, n = 129</i>							
Cu	Cu, Mn	Cu	–	MLP 3–7–1	0,11	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Pb	Zn	–	MLP 3–3–1	9,45	экспоненциальная	тождественная
Mn	Mn	Mn	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MLP 3–4–1	0,19	тангенциальная	тождественная
Pb	Pb, Zn	Pb	–	MLP 3–3–1	1,81	экспоненциальная	тангенциальная
Cd	Cd	Cd	K <sub>2</sub> O	MLP 3–4–1	8,38	тангенциальная	тождественная

П р и м е ч а н и е. 1) объем обучающей выборки – 70 % от общего объема выборки данных; 2) объем обучающей выборки – 15 % от общего объема выборки данных; 3) обучение сети выполнялось с помощью алгоритма Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS), итерационного метода численной оптимизации, предназначенного для нахождения локального максимума/минимума нелинейного функционала без ограничений.

### Заключение

Полученные результаты дают основания для следующих выводов.

1. В пределах агроселитебных территорий г. Горки наиболее загрязнены тяжелыми металлами корнеплоды свеклы столовой,

а в качестве потенциально опасных по уровню загрязнения получаемой товарной продукции картофеля и овощей определены территория в районе ул. Соловьинной, Дружной, Северной, Гаражной, В. Чапаева, О. Кошевого, К. Циол-

ковского, Озерной, М. Горецкого, П. Машерова, Железнодорожной, части садоводческого товарищества «Садовод», находящейся в районе полигона БГСХА, западной и южной окраины садоводческого товарищества «Труд», северной части микрорайона Слобода и восточной части микрорайона Заречье.

2. Для моделирования пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, целесообразно использовать детерминированный метод интерполирования с применением таких радиальных базисных функций, как полностью регуляризованный сплайн и сплайн с натяжением, а в отдельных случаях – мультиквадратичной функции.

3. Использование нейронных сетей эффективно для создания моделей прогноза накопления тяжелых металлов в картофеле и овощах в зависимости от содержания поллютантов в почве, биологических особенностей сель-

скохозяйственных культур и агрохимических свойств почвы, однако создание адекватных прогнозных моделей накопления в растениях Pb и Cd в условиях реальных агроселитебных территорий не всегда возможно, так как довольно трудно спрогнозировать уровень их антропогенного привнесения.

4. Необходимо принятие соответствующих управленческих решений, в первую очередь информирование жителей г. Горки об опасности выращивания картофеля и овощей в пределах зон, определенных в качестве потенциально опасных по получению загрязненной товарной продукции, а также обеспечение мониторинга качества растениеводческой продукции, выращиваемой населением в пределах агроселитебных территорий г. Горки.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении определения канцерогенного и неканцерогенного рисков для здоровья населения от употребления в пищу картофеля и овощей.

#### Библиографический список

1. Мыслыва, Т. Н. Тяжелые металлы в агроселитебных ландшафтах г. Горки / Т. Н. Мыслыва, О. Н. Левшук // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2019. – № 2. – С. 211–216.
2. Социальное положение и уровень жизни населения Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь; Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – 264 с.
3. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 179 с.
4. Мыслыва, Т. Н. Загрязнение тяжелыми металлами овощных культур, выращиваемых в пределах 15-км пригородной зоны г. Житомир / Т. Н. Мыслыва // Молодежь и инновации – 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Горки, 29–31 мая 2013 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2013. – С. 201–204.
5. Öztürk, E. Variation in heavy metal concentrations of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars / E. Öztürk, E. Atsan, T. Polat, K. Kara // Journ. of Animal and Plant Sciences. – 2011. – Vol. 21 (2). – P. 235–239.
6. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 872–881.
7. Станченко, Л. Ю. Распределение тяжелых металлов в почвах и растительности городских экосистем Калининградской области / Л. Ю. Станченко // Вестн. Рос. гос. ун-та имени И. Канта. – 2009. – № 1. – С. 81–85.
8. Дабахов, М. В. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования : монография / М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова, В. И. Титова. – Н. Новгород : Изд-во ВВАГС, 2005. – 165 с.
9. Боровиков, В. П. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
10. Kugonic, N. The accumulation of cadmium, lead and zinc by different vegetables from Zasavje (Slovenia) / N. Kugonic, H. Grcman // Plant Physiology. – 1999. – Vol. 39. – P. 161–165.

11. Sady, W. The effect of physical and chemical soil properties on the accumulation of cadmium in carrot / W. Sady, S. Rozek // *Acta Horticulturae*. – 2002. – Vol. 571. – P. 73–77. <https://doi/10.17660/ActaHortic.2002.571.7>.
12. Balafrej, H. Zinc hyperaccumulation in plants: a review / H. Balafrej, D. Bogusz, Z.-E. A. Triqui, A. Guedira, N. Bendaou, A. Smouni, M. Fahr // *Plants (Basel)*. – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 562. <https://doi.org/10.3390/plants9050562>.
13. Kusznerewicz, B. The dose-dependent influence of zinc and cadmium contamination of soil on their uptake and glucosinolate content in white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) / B. Kusznerewicz, R. Bączek-Kwinta, A. Bartoszek, A. Piekarska, A. Huk, A. Manikowska, J. Antonkiewicz, J. Namieśnik, P. Konieczka // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2012. – Vol. 31 (11). – P. 2482–2489. Doi: 10.1002/etc.1977.
14. Boamponsem, G. A. Heavy metals accumulation in cabbage, lettuce and carrot irrigated with wastewater from Nagodi mining site in Ghana / G. A. Boamponsem, M. Kumi, I. Debrah // *International Journ. of Scientific and Technology Research*. – 2012. – Vol. 1, iss. 11. – P. 124–129.
15. Rajan, Sh. Accumulation and health risk of heavy metals in cabbage due to long-term mineral fertilization from vegetable production systems in Kundasang, Sabah / Sh. Rajan, Kh. E. Wakimin, N. S. M. Shahid, A. Azmi // *Malaysian Journ. of Medicine and Health Sciences*. – 2021. – Vol. 17. – P. 105–110.
16. Мислива, Т. М. Важкі метали в урбаноземах агроселітебних ландшафтів південно-західної частини м. Житомира / Т. М. Мислива, Л. О. Герасимчук // *Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Агрономія*. – 2011. – Вип. 162. – Ч. 1. – С. 155–165.
17. Renildes, L. F. Fontes Uptake and translocation of Cd and Zn in two lettuce cultivars / L. F. Renildes, R. L. F. Fontes, J. M. N. Pereira, J. C. L. Neves // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. – 2014. – Vol. 86 (2). – P. 907–922. Doi: 10.1590/0001-37652014117912.
18. Ильин, В. Б. Содержание тяжелых металлов в почвах и растения Новосибирска / В. Б. Ильин, Н. Л. Байдина, Г. А. Конарбаева, Г. А. Черевко // *Агрохимия*. – 2000. – № 1. – С. 66–73.
19. Agbenin, J. O. Competitive adsorption of copper and zinc by a Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter / J. O. Agbenin, L. A. Olojo // *Geoderma*. – 2004. – Vol. 119. – P. 85–95. Doi: 10.1016/S0016-7061(03)00242-8.

Поступила 27 июля 2021 г.