

DOI 10.35694/YARCX.2021.53.1.002



ТЯЖЁЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЕ – ПРОДУКТ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТЕНИЯ»

М. А. Сенченко (фото)

канд. с.-х. наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции

М. В. Степанова

канд. биол. наук, доцент кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы

ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

*Тяжёлые металлы,
миграция,
функциональные
ингредиенты,
макроэлементы,
микроэлементы, почва,
ревень, квас*

*Heavy metals, migration,
functional ingredients,
macroelements,
microelements, soil,
rhubarb, kvass*

С ростом техногенного воздействия на окружающую среду увеличилось содержание опасных соединений, в том числе и тяжёлых металлов в объектах ветеринарного надзора. Этот вопрос изучался давно, и механизмы биогеохимического поведения в целом понятны, но до сих пор нет единого мнения о предельно допустимом содержании их в разных типах почв. Поэтому изучение содержания в почве макро- и микроэлементов, тяжёлых металлов давно привлекает как зарубежных, так и отечественных учёных [1–3].

Многочисленными исследованиями установлено, что уровень содержания минеральных веществ в почве отражает техногенную нагрузку на территорию и передаётся в системе «почва – растение – человек» через продукцию растительного происхождения. Но комплексных работ по изучению особенностей накопления, перехода микроэлементов и тяжёлых металлов из поверхностных слоёв почвы в продукцию растительного происхождения имеется недостаточно. В России при производстве национальных напитков и продуктов питания используют сырьё растительного происхождения. Многие участки для возделываемых культур расположены вблизи урбанизированных районов, нефтеперерабатывающих и машиностроительных заводов. Поэтому становится актуальным изучение спектра химических элементов и проведение оценки уровня их содержания в сравнении с их фоновыми концентрациями в почве, а также особенностей перехода в водную растворимую фазу, накопления растениями и передачи в продукцию растительного происхождения.

Цель данного исследования – определение содержания некоторых микроэлементов и тяжёлых металлов в почве, ревене и продукте его переработки – квасе, произведённом разными способами.

Материал и методы

Исследование проведено в 2019–2020 гг. с применением комплексного подхода – сочетание современных экологических, биохимических и статистических методов.

Отбор проб почв осуществляли осенью на территории исследуемых районов. Степень загрязнения почвы оценивали по содержанию валовых, водорастворимых и подвижных форм микроэлементов и токсичных тяжёлых металлов. Оценку уровня химического загрязнения почв проводили в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве» № 3174-90 и ГН 2.1.7.020-94 по коэффициентам концентрации химических веществ, по отношению к региональному фоновому показателю и суммарному показателю загрязнения.

Отбор проб растений и продукции переработки сырья растительного происхождения производили в соответствии с «Методическими рекомендациями по отбору проб пищевой продукции животного и растительного происхождения, кормов, кормовых добавок с целью лабораторного контроля их качества безопасности». Исследования по определению тяжёлых металлов проводили на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ-2АТ».

При расчёте концентраций определяемых элементов в пробах осуществлялась метрологическая обработка результатов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» [4].

Основные компоненты для разработки рецептуры (растительное сырьё) были выращены по технологии органического производства в условиях Ярославской области. Компонентами для разработки рецептуры традиционных безалкогольных

напитков явились: сухая трава мяты перечной, мелиссы, лист смородины красной, лист смородины чёрной, лист малины, ревень, сахар, вода, дрожжи. Для расчёта рецептур был использован алгебраический метод. Для ускорения процесса расчёта использован метод обратной матрицы табличного процессора Microsoft Excel. В процессе исследования были изучены две модификации технологии производства кваса: технология с дополнительной операцией «вымачивание стеблей ревеня» и «настаивание стеблей ревеня и дополнительных ингредиентов» и технология с дополнительной операцией «варка стеблей ревеня и дополнительных ингредиентов». Технологические режимы термической и механической обработки растительного сырья были разработаны с целью наименьшего воздействия, вызывающего изменения составных частей сырья.

Всего была отобрана 21 проба почвы из города (Заволжский район города Ярославля), села (Тутаевский район Ярославской области) и «фоновый» района (Угличского района Ярославской области – на расстоянии 1,5 км от ближайшей дороги) для исследования количественного содержания таких микроэлементов, как цинк, медь, свинец и кадмий, железо и мышьяк. Выполнено 2592 количественных атомно-абсорбционных измерения. Все отобранные почвы относились к типу почв песчаные и супесчаные.

Результаты и обсуждение

Содержание исследуемых водорастворимых подвижных форм металлов в почве представлено в таблице 1, а суммарные показатели загрязнения почвы на исследуемых территориях – в таблице 2.

Таблица 1 – Содержание исследуемых водорастворимых подвижных форм металлов в почве, мг/кг

Тип населённого пункта	Расстояние от дороги, м	Концентрация					
		Цинк, М±δ	Медь, М±δ	Железо, М±δ	Кадмий, М±δ	Свинец, М±δ	Мышьяк, М±δ
Село	0–10	0,0046±0,0009*	0,0060±0,0014*	0,3146±0,0046*	0,0002±0,0000*	0,1257±0,0231*	0,0008±0,0001*
	10–50	0,0031±0,0006*	0,0033±0,0001	0,2379±0,0001*	0,0017±0,0005	0,0119±0,0001*	0,0007±0,0001*
	50–100	0,0026±0,0011	0,0028±0,0003	0,1580±0,0002*	0,0006±0,0001	0,0103±0,0053	0,0005±0,0001*
Город	0–10	0,0075±0,0005*	0,0034±0,0002*	0,7747±0,0023*	0,0015±0,0003*	0,2861±0,0112*	0,0076±0,0004*
	10–50	0,0061±0,0014*	0,0024±0,0011	0,0028±0,0006*	0,0013±0,0003	0,1420±0,0057*	0,0020±0,0005*
	50–100	0,0032±0,0008	0,0021±0,0009	0,4707±0,0132*	0,0005±0,0001	0,0326±0,0073	0,0012±0,0002*
ФОН		0,0019±0,0001	0,0007±0,0001	0,1565±0,0001	0,0003±0,0001	0,0074±0,0003	0,0001±0,0000
ПДК		23,0	3,0	***	0,5**	6,0	2,0**

Примечание: * – отличия между сельской и городской территорией достоверны ($p < 0,005$); ** – указаны нормативы для валового содержания элемента; *** – норматив не установлен.

Таблица 2 – Суммарные показатели загрязнения почвы на исследуемых территориях

Тип населённого пункта	Расстояние от дороги, м	Коэффициенты концентрации МЭ и ТТМ						Суммарный показатель загрязнения
		Цинк	Железо	Медь	Кадмий	Свинец	Мышьяк	
Село	0–10	2,43	2,01	8,57	0,67	16,99	8,00	33,67
	10–50	1,63	1,52	4,71	5,57	1,61	7,00	17,04
	50–100	1,37	1,37	4,00	2,00	1,39	5,00	10,13
Город	0–10	3,94	4,95	4,79	4,99	38,66	76	127,33
	10–50	3,19	3,98	3,47	4,17	19,19	20	49,00
	50–100	1,70	3,01	2,94	1,76	4,40	12	20,81
Фоновый уровень		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

По результатам проведённых исследований установлено, что по величине среднего содержания в водной вытяжке почвы исследуемые элементы на всех рассмотренных территориях образуют следующий убывающий ряд: железо > свинец > цинк > медь > мышьяк > кадмий.

При исследовании загрязнения почвы микроэлементами и тяжёлыми металлами на всех территориях превышения предельно допустимых концентраций не выявлено (табл. 2). Более высокие концентрации цинка, железа, кадмия, свинца и мышьяка выявлены в урбанизированной территории, а меди – в сельской территории.

Для проверки возможного взаимозависимого накопления металлов в почве был проведён корреляционный анализ, в ходе которого выявлена сильная обратная связь между уровнями свинца и цинка, железа и меди, кадмия и свинца, мышьяка и железа ($r = -0,94; -0,98; -0,77$ и $0,99$ соответственно; $p < 0,05$), сильная прямая – между кадмием и цинком, мышьяком и медью ($r = 0,92$ и $0,997$ соответственно; $p < 0,05$), что подтверждает данные литературных источников о взаимосвязанном накоплении в среде этих микроэлементов.

При анализе перехода и особенностей аккумуляции микроэлементов в системе «почва – растение» установлена достоверная сильная связь между уровнем Pb, Cd в почве и растении ($r = 0,81$ и $0,71$ соответственно). В ходе исследования нами была обнаружена симбатность между содержанием микроэлементов в почвенном покрове и в ревене: достоверная очень сильная, близкая к функциональной, прямая связь между уровнем Zn, Pb и Cu ($r = 0,97; 0,90$ и $0,67$ соответственно; при $p < 0,05$). При изучении межсредового перехода микроэлементов из почвы в растения установлена достоверно значимая прямая

слабая связь только для Cu ($r = 0,31$), Zn ($r = 0,33$) и Pb ($r = 0,35$). В системе «сырьё – продукция» установлено наличие достоверной симбатности между уровнем металла в квасе и концентрацией в овощных культурах в отношении Zn ($r = 0,32$), Cu ($r = 0,46$) и Cd ($r = 0,38$). Других достоверно значимых связей не установлено. Это говорит о синергизме микроэлементов, поступающих из объекта окружающей среды и накапливающихся в живых объектах и передающихся по цепям питания. Выявленные закономерности подтверждают наше предположение и сведения литературы о том, что металлы при загрязнении окружающей среды поступают через воздух в депонирующие среды, водорастворимая форма поступает в растения, где они накапливаются и передаются дальше по пищевой цепи [5].

Полученные данные согласуются с результатом Sola и др. (2003), которые изучали загрязнение тяжёлыми металлами различных трав в городских и пригородных центрах Нигерии [6].

Анализ миграционной способности элементов в системе «почва – растение – продукция растительного происхождения» показал наличие плохой миграционной способности для цинка и железа. Zubero Oleagoitia и др. (2008) отмечал более высокие уровни Cd и Pb у постоянного населения в городских районах, вызванные постоянным потреблением продукции растениеводства, выращенной в загрязнённых городских районах [7]. Sola и др. в 2003 году сделали вывод о том, что концентрация свинца в тканях растений линейно и достоверно увеличивалась с увеличением концентрации Pb в почвах при изучении загрязнения тяжёлыми металлами различных трав в городских и пригородных центрах Нигерии. В то же время Turner (1973) сообщил об уровне Cd в тканях растений выше, чем в почве, что согласуется

с работой Sola и др [6; 8]. Содержание микроэлементов и тяжёлых металлов в образцах почвы и ревеня представлено в таблице 3.

Результаты определения тяжёлых металлов и микроэлементов в квасе, произведённом по двум технологиям (1 – технология с дополнительной

Таблица 3 – Содержание микроэлементов и тяжёлых металлов в исследуемых объектах, мг/кг

Объект исследования	Концентрация					
	Цинк, М±δ	Медь, М±δ	Железо, М±δ	Кадмий, М±δ	Свинец, М±δ	Мышьяк, М±δ
Почва	0,0031±0,0004	0,004±0,0005	0,2664±0,0002	0,0016±0,0003	0,0781±0,0048	0,0005±0,0001
Ревень	21,1148±0,6831	2,1874±0,0654	25,8752±3,8308	0,0049±0,0001	0,0012±0,0001	0,0203±0,0001

операцией «вымачивание стеблей ревеня» и «настаивание стеблей ревеня и дополнительных ингредиентов» и 2 – технология с дополнительной операцией «варка стеблей ревеня и дополнительных ингредиентов»), представлены в таблице 4.

Результаты исследований показали, что уровень меди и свинца в почвах, отобранных на территориях сельской местности, достоверно выше, чем в почвенном покрове города. Концентрация кадмия и цинка выше на урбанизированной тер-

Таблица 4 – Содержание макро- и микроэлементов в квасе [9]

Макро- и микро-элемент	Результат		Рекомендуемое суточное потребление, мг	Содержание от рекомендуемого суточного потребления в разовой порции объекта (237 мл), %	
	1	2		1	2
Zn, мг/л	0,10	0,15	10...15	0,237	0,356
Cu, мг/л	0,08	Следы	2	0,948	-
Mn, мг/л	0,106	0,084	5...10	0,502	0,398
Fe, мг/л	0,69	1,97	10...18	1,635	4,67
K, мг/л	0,56	0,79	3000...5000	0,004	0,006
Mg, мг/л	0,23	0,29	400...500	0,013	0,017
Ca, мг/л	0,085	0,085	500...1000	0,004	0,004

ритории. В почвах сельской и урбанизированной территорий, по сравнению с фоновыми уровнями, достоверно выше концентрация всех исследованных металлов. Это свидетельствует о том, что загрязнение почв связано не только с природным содержанием элементов, но и с загрязнением, носящим антропогенный характер. В ходе исследований выявлена симбатность между содержанием элементов в среде, сырье и продукции переработки, что подтверждает способность микроэлементов и тяжёлых металлов накапливаться и мигрировать по биологическим цепям в водорастворимой форме.

При определении токсикологических показателей кваса, произведённого по двум различным технологиям, содержание свинца составило менее 0,02 мг/кг (при величине допустимого уровня не более 0,3 мг/кг), мышьяка – менее 0,001 мг/кг

(при величине допустимого уровня не более 0,1 мг/кг), кадмия – менее 0,005 мг/кг (при величине допустимого уровня не более 0,03 мг/кг), ртути – менее 0,0002 мг/кг (при величине допустимого уровня не более 0,005 мг/кг).

Использование растительного сырья, произведённого по технологии органического производства и разработанной технологии переработки растительного сырья, способствуют наименьшему воздействию на его составные части, увеличению содержания макро- и микроэлементов. При этом содержание токсичных элементов остаётся в пределах действующих нормативных документов. Превышения предельно допустимых норм не выявлено. Технология, включающая дополнительную операцию «варка», обеспечила наибольшую экстракцию макро- и микроэлементов из ревеня в квас.

Вывод

Выявленные закономерности подтверждают предположения и сведения других отечественных и зарубежных учёных в исследованиях подобного рода. Тяжёлые металлы при загрязнении окружающей среды поступают и через воздух,

водорастворимая их форма поступает в растения, где они накапливаются и передаются дальше по пищевой цепи. Результаты исследований Sola et al. (2003) и Salama (2005) также подтверждают значимость осаждения тяжёлых металлов из воздуха [6; 10].

Литература

1. Шитова, Е. В. Содержание тяжелых металлов в биосубстратах детей в условиях промышленного города : специальность 03.00.16 – «Экология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Елена Валерьевна Шитова ; Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова. – Ярославль, 2005. – 19 с. – Текст : непосредственный.
2. Бакаева, Е. А. Влияние экологических факторов на микроэлементный статус новорожденных и детей дошкольного возраста в условиях Европейского севера и средней полосы России : специальность 03.02.08 «Экология (биологические науки)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Евгения Александровна Бакаева; Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2016. – 200 с. – Текст : непосредственный.
3. Степанова, М. В. Содержание некоторых микроэлементов и токсичных тяжелых металлов в окружающей среде и биосубстратах детей-дошкольников на сельских и промышленных территориях (на примере Ярославской области) : специальность 03.02.08 «Экология (биология)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Марина Вячеславовна Степанова ; Оренбург. гос. мед. акад. – Оренбург, 2012. – 23 с. – Текст : непосредственный.
4. Степанова, М. В. Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почвах сельскохозяйственного назначения / М. В. Степанова, В. А. Остапенко, А. П. Каледин. – Текст : непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 6 (86). – С. 15–21. – ISSN 2073-0853.
5. Фираго, А. Л. Содержание тяжелых металлов в биосубстратах детей от 1 до 3 лет, проживающих в условиях антропогенной нагрузки (на примере Ярославской области) : специальность 03.02.08 «Экология (биология)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Анна Львовна Фираго ; Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. – Ярославль, 2012. – 200 с. – Текст : непосредственный.
6. Sola, O. Urban agricultural production: heavy metal contamination of *Amaranthus cruentus* L. grown on domestic refuse landfill soils in Ibadan, Nigeria / O. Sola, Rasheed O. Awodoyin, T. Opadeji. – Text : unmediated // Emir. J. Agric. Sci. – 2003. – № 15 (2). – P. 87–94.
7. Zubero Oleagoitia, M. B. Metales pesados (Pb, Cd, Cr y Hg) en població n general adulta pró xima a una planta de tratamiento de residuos urbanos de Bizkaia / M. B. Zubero Oleagoitia at al. – Text : unmediated // Revista Espanola de Salud Publica. – 2008. – № 82. – P. 481–492.
8. Turner, M. A. Effect of Cadmium treatment on Cadmium and Zinc uptake by selected vegetable species / M. A. Turner. – Text : unmediated // Journal of Environmental Quality. – 1973. – № 2. – P. 118–119.
9. Позднякова, В. Ф. Производство кваса с использованием заменителей сахара из растительного сырья, выращенного в условиях Ярославской области / В. Ф. Позднякова, М. А. Сенченко. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7. – № 4. – С. 55–63. – ISSN 2310-2748.
10. Salama, A. K. Heavy metals (Cd, Pb) and trace elements (Cu, Zn) contents in some foodstuffs from the Egyptian market / A. K. Salama, M. A. Radwan. – Text : unmediated // Emir. J. Agric. Sci. – 2005. – № 17 (1). – С. 34–42.

References

1. Shitova, E. V. Soderzhanie tjazhelyh metallov v biosubstratah detej v uslovijah promyshlennogo goroda : special'nost' 03.00.16 – «Jekologija» : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskikh nauk / Elena Valer'evna Shitova ; Jaroslavskij gosudarstvennyj universitet im. P. G. Demidova. – Jaroslavl', 2005. – 19 s. – Tekst : neposredstvennyj.
2. Bakaeva, E. A. Vlijanie jekologicheskikh faktorov na mikrojelementnyj status novorozhdennyh i detej doshkol'nogo vozrasta v uslovijah Evropejskogo severa i srednej polosy Rossii : special'nost' 03.02.08 «Jekologija (biologicheskije nauki)» : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskikh nauk /

Evgeniya Aleksandrovna Bakaeva; Nacional'nyj issledovatel'skij Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N. I. Lobachevskogo. – Nizhnij Novgorod, 2016. – 200 s. – Tekst : neposredstvennyj.

3. Stepanova, M. V. Soderzhanie nekotoryh mikrojelementov i toksichnyh tjazhelyh metallov v okruzhajushhej srede i biosubstratah detej-doshkol'nikov na sel'skix i promyshlennyh territorijah (na primere Jaroslavskoj oblasti) : special'nost' 03.02.08 «Jekologija (biologija)» : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskix nauk / Marina Vyacheslavovna Stepanova ; Orenburg. gos. med. akad. – Orenburg, 2012. – 23 s. – Tekst : neposredstvennyj.

4. Stepanova, M. V. Soderzhanie tjazholyh metallov i mysh'jaka v pochvah sel'skohozjajstvennogo naznachenija / M. V. Stepanova, V. A. Ostapenko, A. P. Kaledin. – Tekst : neposredstvennyj // Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – № 6 (86). – S. 15–21. – ISSN 2073-0853.

5. Firago, A. L. Soderzhanie tjazhelyh metallov v biosubstratah detej ot 1 do 3 let, prozhivajushhih v uslovijah antropogennoj nagruzki (na primere Jaroslavskoj oblasti) : special'nost' 03.02.08 «Jekologija (biologija)» : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskix nauk / Anna L'vovna Firago ; Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N. I. Lobachevskogo. – Jaroslavl', 2012. – 200 s. – Tekst : neposredstvennyj.

6. Sola, O. Urban agricultural production: heavy metal contamination of *Amaranthus cruentus* L. grown on domestic refuse landfill soils in Ibadan, Nigeria / O. Sola, Rasheed O. Awodoyin, T. Opadeji. – Text : unmediated // Emir. J. Agric. Sci. – 2003. – № 15 (2). – P. 87–94.

7. Zubero Oleagoitia, M. B. Metales pesados (Pb, Cd, Cr y Hg) en població n general adulta pró xima a una planta de tratamiento de residuos urbanos de Bizkaia / M. B. Zubero Oleagoitia et al. – Text : unmediated // Revista Espanola de Salud Publica. – 2008. – № 82. – P. 481–492.

8. Turner, M. A. Effect of Cadmium treatment on Cadmium and Zinc uptake by selected vegetable species / M. A. Turner. – Text : unmediated // Journal of Environmental Quality. – 1973. – № 2. – P. 118–119.

9. Pozdnyakova, V. F. Proizvodstvo kvasa s ispol'zovaniem zamenitelej sahara iz rastitel'nogo syr'ja, vyrashhennogo v uslovijah Jaroslavskoj oblasti / V. F. Pozdnyakova, M. A. Senchenko. – Tekst : neposredstvennyj // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Pishhevye i biotekhnologii. – 2019. – T. 7. – № 4. – S. 55–63. – ISSN 2310-2748.

10. Salama, A. K. Heavy metals (Cd, Pb) and trace elements (Cu, Zn) contents in some foodstuffs from the Egyptian market / A. K. Salama, M. A. Radwan. – Text : unmediated // Emir. J. Agric. Sci. – 2005. – № 17 (1). – C. 34–42.