

УДК 581.192 (571.54)

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ПЛОДОВ *MALUS DOMESTICA* (L.) BORKH. РАЗНЫХ СОРТОВ

© Н.Л. Наумова<sup>1\*</sup>, А.А. Лукин<sup>1</sup>, К.Н. Кудрявцев<sup>1</sup>, Т.Н. Слепнёва<sup>2</sup>, Е.А. Велисевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия, n.naumova@inbox.ru

<sup>2</sup> Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение Уральского федерального аграрного научно-исследовательского центра УрО РАН, ул. Щербакова, 147, Екатеринбург, 620076, Россия

Представлены результаты изучения элементного состава, содержания полифенолов и антиоксидантной активности плодов яблони районированных сортов Свердловской селекционной станции садоводства. Определен элементный состав образцов почвы, на которой выращивались растения. Установлено, что содержания As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn в почвенном горизонте соответствуют нормам СанПиН 1.2.3685-21. Выявленные количества Al, As, Ba, Ca, Cr, Fe, K, Li, Na, Sr, Ti, V имеют меньшие величины, чем кларки, а содержания B, Mg и P – большие. В плодах яблони уровни Cu, Fe, Mg (кроме яблок «Экранное»), Cr (кроме яблок «Благая весть») и Pb близки литературным данным. Содержания Co, Mn, Ni и Zn в яблоках находятся за пределом нижней границы интервалов сравнения, величины Ca и K в яблоках «Благая весть» и «Краса Свердловска» и содержание P в плодах «Благая весть» превосходят литературные данные. Выявлена значимая линейная зависимость между содержанием Al, Fe, Mg, Mn, P, Pb в почве и в плодах яблони независимо от сорта. Основной вклад в общее содержание полифенолов в яблоках вносят уровни Cd, Zn, Cu, As, B и Pb в почве, на величину АОА плодов влияют концентрации Co, B, Zn, As в почвенном покрове, однако содержания Mg, P, Cr, Fe, Mn, Ni не оказывают существенного влияния на эти показатели.

*Ключевые слова:* почва, яблоки, элементный состав, фенольные соединения, антиоксидантная активность.

---

**Для цитирования:** Наумова Н.Л., Лукин А.А., Кудрявцев К.Н., Слепнёва Т.Н., Велисевич Е.А. Изучение элементного состава и антиоксидантной активности плодов *Malus domestica* (L.) Borkh. разных сортов // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 245–256. DOI: 10.14258/jcprm.20240212563.

---

### Введение

Яблоня домашняя (*Malus domestica* (L.) Borkh.) относится к числу наиболее адаптивных плодовых культур, используемых в садоводстве. Широкое распространение яблони объясняется ее важными биологическими и производственными признаками: транспортабельностью и лежкостью плодов, хорошей урожайностью, десертными качествами плодов и удовлетворительной зимостойкостью [1–3].

Плоды яблони богаты фитонутриентами, обладающими биологической активностью и положительным влиянием на здоровье человека. Известно, что в зависимости от сорта и условий выращивания свежие плоды яблони содержат в среднем 12.5–16.0% сухих веществ, 11.5–14.5% углеводов, 2.0–3.0% клетчатки, 0.15–0.25% минеральных и 0.6–1.1% пектиновых веществ, до 1.2% различных кислот. Из моно- и дисахаридов на долю глюкозы приходится 1.7–2.8%, фруктозы 5.6–6.5%, сахарозы 0.8–2.5%. Из макроэлементов в сухом веществе яблок содержатся: К (808–3200 мг/кг), Р (90–230 мг/кг), Са (30–160 мг/кг), Mg (30–90 мг/кг), из микроэлементов – В (2.1–2.4 мг/кг), Al (0.8–1.1 мг/кг), Mn (0.27–0.85 мг/кг), Cu (0.08–0.65 мг/кг), Zn (0.35–1.40 мг/кг) и др. Содержание витаминов группы В составляет 0.10–175.0 мг/кг, аскорбиновой кислоты – 26.0–310.0 мг/кг, α-токоферола – 4.5–6.5 мг/кг [1, 4].

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

Присутствующие в плодах аскорбиновая кислота и полифенольные вещества (флаванолы, флавоноиды, фенольные кислоты, дигидрохалконы и антоцианы), обладают высокой антиоксидантной активностью (АОА), проявляя антиканцерогенное, противовирусное, мембранотропное и другие действия на организм человека [5–7]. В яблоках из Краснодарского края определено содержание полифенолов (антоцианов, танинов и катехинов) в пределах 168–234 мг/дм<sup>3</sup> в сортах «Флорина», «Голден Делишес» и «Интерпрайс» и до 285 мг/дм<sup>3</sup> в сорте «Джонатан» [8]. В девяти сортах итальянских яблок «Mela Rosa dei Monti Sibillini» выявлено количество полифенольных соединений в диапазоне от 8134.0 до 131149.4 до мг/кг [9]. Латвийские ученые установили, что наибольшее количество полифенолов содержится в плодоножке (6747.2–59335.4 мг/кг сухого веса), затем в семенах (3592.6–23606.8 мг/кг сухого веса) и мякоти (1654.8–5314.1 мг/кг сухого веса) яблок. Они же определили, что хлорогеновая кислота является основным полифенолом мякоти яблок, а флоризин – семян и плодоножки (2899.0–19600.3 мг/кг и 3017.7–40 488.3 мг/кг соответственно) [10]. Во всех перечисленных выше работах содержание полифенолов определяли спектрофотометрическим методом с помощью реактива Folin-Ciocalteu. Польские специалисты изучили 67 сортов яблок (старый сорт «Голден Делишес» и новые сорта, выращенные из него) и выявили с помощью ВЭЖХ с диодной матрицей содержание общих полифенолов на уровне 523.02–2723.96 мг/100 г сухой массы. Спектрофотометрическими методами (ABTS, FRAP и DPPH) они определили, что листья яблони и кожура яблок обладают большей антиоксидантной способностью, чем их мякоть, благодаря повышенному содержанию полифенолов [5]. Российские ученые, проанализировав водно-этанольные экстракты 17 сортов яблок с помощью кинетической модели окисления β-каротина пероксидом водорода, установили, что их высокая АОА обусловлена в большей степени присутствием флавоноидов и характерна для таких плодов как «Красная гроздь» (152%), «Папировка» (149%), «Красный сеянец» (147%), «Превосходное» (145%) и др. [11]. Несомненно, яблоки вызывают значительный научный интерес, поскольку многие независимые исследования подтвердили их профилактическое действие при сердечно-сосудистых и онкологических заболеваниях в большей степени благодаря высокому количеству полифенольных соединений, обладающих АОА [12–15].

Яблони относятся к биологическим объектам, участвующим в циркуляции химических элементов в системе «почва-растение». Одни из поглощаемых яблонями элементов (К, Р, N, С, О и др.) являются жизненно важными, поскольку необходимы для их биологических процессов, включая микроэлементы (Fe, Mn, Mo, Cu, Zn и др.). Другие элементы (Ag, Au, Al) оказывают стимулирующее влияние на рост растений, однако их биологическая роль точно не «установлена». Кроме того, яблони также поглощают тяжелые элементы (As, Cd, Cr, Hg, Pb), которые токсичны при низких концентрациях. Известно, что микроэлементы проявляют токсичный эффект при поглощении их выше определенных пороговых значений [16–18]. Два последних обстоятельства вызывают в плодах развитие окислительного стресса и провоцируют выработку полифенолов и других антиоксидантов в качестве ответной неспецифической реакции растения на такое воздействие [15, 19, 20]. Взаимосвязь элементного состава почвы и плодов яблони, процессы миграции-концентрации элементов, коэффициенты вариации содержания элементов, особенности накопления элементов в плодах в зависимости от сорта изучены во многих работах отечественных и зарубежных ученых с применением методов рентгенофлуоресцентного анализа, инверсионной вольтамперометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и др. [21–26]. Однако ни в одной из них не описана взаимосвязь между уровнями поглощения тяжелых элементов и(или) микроэлементов и накоплением различного рода антиоксидантов, в том числе полифенолов, относительно плодов яблони, что представляет определенный научный и практический интерес.

В крупных населенных пунктах с функционирующими промышленными предприятиями и высокой концентрацией автотранспорта доля поступления металлов в почвы из техногенных источников значительна. Содержание тяжелых металлов (ТМ) при этом характеризует общую загрязненность почвы, но не отражает степени доступности элементов для растений [27]. Повышенное содержание ТМ в окружающей среде способствует развитию, в том числе через пищевые цепи, патологий практически всех систем организма человека: репродуктивной, пищеварительной, выделительной и т. д. Избыточные концентрации, как и дефицит элементов в почвах являются фактором развития эндемических заболеваний [28]. В этой связи установление зависимостей между концентрацией химических элементов в почвенном покрове и их накоплением в плодах яблони и величинами содержания полифенольных соединений и проявлением антиоксидантных свойств является актуальным и необходимым.

Целью исследований явилось изучение элементного состава и антиоксидантной активности плодов *Malus domestica* (L.) Borkh. разных сортов.

### Экспериментальная часть

Объектами исследований послужили образцы дерново-подзолистой почвы и плодов выращиваемых на ней яблонь (*Malus domestica* (L.) Borkh.) районированных сортов: «Экранное» (осеннего срока созревания), «Благая весть» и «Краса Свердловска» (зимнего срока созревания) урожая 2022 г. Плодовые деревья произрастали в равных агротехнических и климатических условиях Свердловской селекционной станции садоводства (структурного подразделения ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН), яблоневые насаждения которой расположены на юго-западном склоне Уктусских гор. Территориально объекты исследований находятся в черте Чкаловского района г. Екатеринбурга Свердловской области и относятся к южно-таежному округу Зауральской холмисто-предгорной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области. Возраст яблонь составил более 10 лет, подвой у исследуемых сортов яблонь семенной – Ранетка Пурпуровая, агротехника возделывания – традиционная, экстенсивная, без орошения и применения удобрений.

Пробы почвы отбирали согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 методом конверта с глубины 10 см, масса пробы составляла не менее 2 кг. Образцы почвы просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм, затем высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре и измельчали до состояния мелко-дисперсной пыли с помощью шаровой мельницы РМ-100 (Retsch, Германия). Плоды яблонь отбирали с разных сторон полога в потребительской стадии зрелости, затем их промывали дистиллированной водой и измельчали в блендере.

Для всех объектов исследований проводили кислотное разложение в автоклавах под действием микроволнового излучения с контролем температуры с помощью микроволновой системы Milestone ETHOS (Италия). Для разложения проб почвы навеску массой 0.5 г помещали во фторопластовый контейнер, приливали 8 мл концентрированной  $\text{HNO}_3$  и 2.0 мл 30%-ного раствора  $\text{H}_2\text{O}_2$ , плотно закрывали крышками. Для разложения проб яблок навеску массой 3.0 г помещали во фторопластовый контейнер, приливали 7 мл концентрированной  $\text{HNO}_3$  и 0.5 мл дистиллированной воды, плотно закрывали крышками. Программа для микроволнового разложения анализируемых проб представлена в таблице 1.

По завершении программы разложения и охлаждения полученные растворы фильтровали через фильтр в мерную колбу на 100 мл (для почвы) или на 25 мл (для яблок) и доводили до метки бидистиллированной водой. Холостую пробу готовили параллельно с каждой отдельной партией анализируемых проб, проводя через все стадии пробоподготовки.

Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) посредством прибора iCAP 7200 DUO с программным обеспечением iTEVA iCAP Software (США) анализировали валовое содержание элементов (Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr, Ti, V, Zn) в подготовленных пробах почвы и яблок. Метод АЭС-ИСП основан на распылении пробы и переносе аэрозоля в плазменную горелку, в которой происходит возбуждение атомов элементов в аргоновой плазме, индуктивно возбуждаемой радиочастотным полем, приводящее к характеристическому эмиссионному спектру. Интенсивность спектральных линий в получаемом эмиссионном спектре регистрируется детектором, сигналы которого обрабатываются при помощи компьютерной программы. Для градуировки прибора применяли стандартные многоэлементные растворы: МЭС-1 (СОП 15608-2014); МЭС-2 (СОП 15615-2014); МЭС-3 (СОП 15616-2014); МЭС-4 (СОП 15617-2014). С помощью градуировочной характеристики находили значения массовых концентраций элементов в анализируемых растворах по среднему значению выходного сигнала. Стабильность градуировки проверяли анализом контрольных растворов перед началом измерений и в конце.

Изучение рН почвы осуществляли потенциометрическим методом на анализаторе жидкости «АНИОН 4100» (Россия).

Таблица 1. Программа микроволнового разложения проб

№ этапа	Время обработки		Температура внутри автоклава, °С, не более		Мощность излучения, Вт	
	почва	яблоки	почва	яблоки	почва	яблоки
1	5 мин	5 мин.	80	80	500	600
2	3 мин 30 с	3 мин. 30 с	165	160	1300	1500
3	5 мин 30 с	4 мин. 30 с	215	195	1700	1800
4	16 мин	14 мин	215	195	1700	1800
Вентиляция	Охлаждение до 20 °С					

Общее содержание полифенолов в яблоках определяли с реактивом Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, Германия) на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония). Метод основан на окислении фенолов с помощью молибдо-вольфрамо-фосфорного гетерополианионного реагента с образованием окрашенного продукта с максимумом поглощения в видимой области при длине волны 765 нм в модификации с использованием калибровки по галловой кислоте [29]. Оптическая плотность окрашенного продукта окисления прямо пропорциональна концентрации фенольных соединений в образце.

Антиоксидантную активность яблок определяли с помощью спиртового раствора радикала DPPH (Sigma-Aldrich, Германия) на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония) при длине волны 517 нм, измеряя оптическую плотность контрольного и опытных растворов [30]. Реакция со стабильным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом является стехиометрической и пропорциональна количеству атомов водорода, вступивших в реакцию с DPPH. Это означает, что количество восстановленного радикала пропорционально концентрации компонентов яблок с антиоксидантной активностью. В качестве контрольного использовали рабочий раствор DPPH. Антиоксидантную активность (% ингибирования DPPH) определяли по формуле

$$\% \text{ ингибирования} = \frac{D_{\text{контр}} - D_x}{D_{\text{контр}}} \times 100\% \quad (1)$$

где  $D_x$  – оптическая плотность опытного раствора яблок определенного сорта;  $D_{\text{контр}}$  – оптическая плотность контрольного раствора.

Пробоподготовку почв и яблок выполняли в двух параллелях, измерения вели в трех повторностях. Математическую обработку данных проводили с использованием пакета программы Microsoft Excel 2013. Коэффициенты корреляции рассчитывали с помощью библиотек Scipy и Statsmodels языка Python. Модели множественной линейной регрессии строили, используя программу анализа данных GRETLL.

### **Обсуждение результатов**

Таблица 2 представляет результаты определения элементов в почвенных образцах. Выявлено неравномерное распределение большинства элементов с высокой вариабильностью содержаний в верхнем горизонте почвы: > 170% (As), > 70% (Cu, K, P), > 60% (Cr), > 40% (Al, Ba, Ca, Pb, Sr), > 30% (B, Cd, Mg, Zn) и др.

Известно, что среди ТМ приоритетными загрязнителями экосистемы являются Hg, Pb, As, Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, Mn, Co и др. [31]. Одним из критериев оценки загрязнения почв ТМ выступают их предельно и ориентировочно допустимые концентрации (ПДК/ОДК). Поскольку исследуемые почвы характеризуются слабокислой реакцией среды, близкой к нейтральной (рН почвы у яблонь сортов «Экранное» и «Благая весть» составляет 5.71, у яблонь «Краса Свердловская» – 5.97), нами были взяты соответствующие значения ПДК/ОДК тяжелых металлов для таких типов почв. Установлено, что содержание таких элементов, как As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn во всех образцах почвы соответствует регламентированным нормам СанПиН 1.2.3685-21. В то же время уровни Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn в почвах яблоневых насаждений превышают их кларки, установленные для почв Земли в целом. Это обусловлено как высоким содержанием данных элементов в материнской породе, так и техногенной нагрузкой на почву. Для исследуемых почвенных участков характерно сложное геологическое строение с наличием зон (ультраосновных подстилающих горных пород) с высокой природной концентрацией Co, Cu, Ni, Zn [34], присутствием Северо-Уральского марганцеворудного бассейна с накоплением Mn и высоким уровнем P [35]. Повышенное содержание Cd, Pb в почве связано с атмосферным переносом выбросов промышленных предприятий, расположенных в черте г. Екатеринбург [36]. Анализ литературных данных [37–42] показал, что установленные уровни валового содержания Pb, As, Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, Mn, Co в почвенных участках данного агроценоза позволяют отнести их к незагрязненным почвам.

Остальные макро- и микроэлементы изучаемой почвы – Al, As, Ba, Ca, Cr, Fe, K, Li, Na, Sr, Ti, V имели уровни существенно меньшие, чем кларковые величины, а количества B, Mg и P – большие. Эти элементы унаследованы от почвообразующей породы и в процессе почвообразования перераспределены в верхнем почвенном горизонте [42].

Таблица 2. Содержание элементов в почвенных образцах из мест произрастания *Malus domestica* (L.) Borkh. (мг/кг воздушно-сухой массы)

Элемент	ПДК/ОДК* по СанПиН 1.2.3685-21 [32]	Кларк почв Земли [33]	Сорт яблони		
			«Экранное»	«Благая весть»	«Краса Свердловска»
Al	–	71300.0	28709.8±160.6	<b>39184.8±144.0</b>	27282.4±128.3
As	/10.0	5.0	1.8±0.1	<b>4.9±0.3</b>	2.1±0.1
B	–	10.0	50.2±1.7	<b>63.5±2.7</b>	48.4±1.5
Ba	–	500.0	121.3±5.7	<b>141.8±9.0</b>	95.7±4.0
Ca	–	13700.0	9598.8±47.3	<b>14121.7±59.8</b>	9842.3±28.0
Cd	/2.0	0.5	0.65±0.03	<b>0.84±0.02</b>	0.61±0.01
Co	–	8.0	<b>24.0±0.6</b>	19.2±0.7	<b>24.1±0.5</b>
Cr	–	200.0	96.2±1.7	114.0±5.0	<b>160.2±12.9</b>
Cu	/132.0	20.0	48.0±1.1	<b>56.7±0.9</b>	33.1±0.6
Fe	–	38000.0	25735.6±148.5	<b>30196.4±117.3</b>	25756.6±133.9
K	–	13600.0	2656.0±45.4	<b>3737.8±51.4</b>	2156.4±37.7
Li	–	30.0	12.9±0.3	<b>13.4±0.5</b>	10.8±0.4
Mg	–	6300.0	8284.2±69.0	8573.4±73.1	<b>11110.1±98.1</b>
Mn	1500.0/	850.0	<b>1172.8±19.0</b>	1019.6±22.1	950.7±24.6
Na	–	6300.0	482.3±6.9	<b>577.1±8.0</b>	507.1±6.4
Ni	/80.0	40.0	48.2±0.6	<b>56.8±0.6</b>	<b>58.0±0.8</b>
P	–	800.5	1468.7±16.5	<b>2437.9±18.6</b>	1355.7±25.8
Pb	/130.0	10.0	<b>16.8±0.6</b>	<b>17.2±0.7</b>	11.8±0.8
Si	–	330000.0	310106.7±701.8	310035.9±680.7	310055.2±720.5
Sr	–	300.0	57.2±1.5	<b>84.5±2.7</b>	55.7±0.7
Ti	–	4600.0	740.0±11.2	<b>937.5±25.6</b>	881.1±13.3
V	150.0/	100.0	88.1±1.0	<b>91.1±1.7</b>	83.1±1.1
Zn	/220.0	50.0	67.8±1.2	<b>75.9±1.5</b>	56.0±1.4

Примечание: здесь и далее «–» – данные отсутствуют; «\*» – данные для почв близких к нейтральным, нейтральным (суглинистым и глинистым),  $pH_{KCl} > 5.5$ .

При сравнении элементного состава почвенных образцов между собой определили, что почва, используемая для возделывания яблонь сорта «Благая весть», на фоне других отличается повышенным содержанием большинства (74% от общего числа) анализируемых элементов. Относительно высокие величины Co, Mn, Pb установлены в почвенных образцах яблонь «Экранное», Co, Cr, Mg, Ni – в пробах почвы яблонь «Краса Свердловска».

Таблица 3 представляет результаты определения элементного состава плодов яблони. Известно, что источником поступления элементов в растения являются их различные соединения в почвах. В большем количестве поглощаются те из них, которые необходимы для роста [38]. Важно отметить, что относительно высокое содержание большинства элементов в почве яблонь «Благая весть» не всегда способствовало их накоплению в плодах, что было характерно для B, Ca и Ni (табл. 3). В то же время при относительно низких содержаниях Ba, Ca и K в почвах яблонь «Краса Свердловска» наблюдаются значительные концентрации этих элементов в плодах, что согласуется с данным [43] и обусловлено, в первую очередь, соотношением концентраций других элементов в почве, которое влияет на потенциал их поступления в яблоки [44]. Содержание As, Cd, Li, Na, Ti, V в яблоках исследуемых сортов было ниже пределов обнаружения этих элементов методом АЭС-ИСП (табл. 3).

При сравнении содержания химических элементов в яблоках с литературными данными выявили, что уровни Cu, Fe, Mg (за исключением яблок «Экранное»), Cr (за исключением яблок «Благая весть») и Pb близки между собой; концентрации Co, Mn, Ni и Zn – несколько ниже нижней границы интервалов сравнения, а величины Ca и K в яблоках «Благая весть» и «Краса Свердловска» и содержание P в плодах «Благая весть» – наоборот, отклоняются в большую сторону. Пониженное содержание таких эссенциальных микроэлементов как Co, Mn и Zn снижает питательную ценность яблок. Известно, что Co участвует в процессах кроветворения, синтезе нуклеиновых кислот, поддерживает дыхание, Mn – активирует ферменты и некоторые металлоэнзимы, Zn – способствует нормальному развитию, пролиферации и дифференцировке клеток [45].

При изучении взаимосвязи между содержанием элементов в почвах и их уровнями в яблоках рассчитывали как коэффициент корреляции Пирсона, так и ранговые коэффициенты корреляции Спирмена и Кенделла. Результаты исследований отражены в таблице 4. Выявлена значимая линейная зависимость между количеством Al, Fe, Mg, Mn, P, Pb в почве и их содержанием в плодах яблони независимо от сорта. При этом

для Mn установлена обратная взаимосвязь между рассматриваемыми переменными. Отметим, что непараметрические меры ранговой корреляции (коэффициенты Спирмена и Кенделла) дополнительно подтвердили существование достоверной взаимосвязи лишь между содержаниями Al, Cu, Fe, Mg, Pb в почве и яблоках. Это подтверждает зависимость накопления данных элементов в плодах яблони от их концентраций в почвенном горизонте. Значимых корреляций между содержанием остальных элементов в почве и плодах яблони не выявлено.

Результаты исследований по содержанию полифенольных соединений и АОА в яблоках представлены в таблице 5. Установлено, что яблоки сортов «Экранное» и «Краса Свердловска» не имеют существенных различий в данных показателях, поскольку вариабельность их величин находится в пределах 2 и 6% соответственно. Яблоки сорта «Благая весть» содержат меньше полифенолов (на 15–20%) и обладают меньшей (на 14–16%) антиоксидантной способностью. Это может быть обусловлено как дисбалансом отдельных элементов в почве, так и уровнями в плодах антиоксидантов (витаминов С, Е). Для сравнения, величина АОА польских яблок, измеренной при аналогичных условиях, лежит в широком диапазоне – от 10.1–11.3% (для сортов «Топаз», «Элиза», «Рубин») до 74.5–129.0% (для сортов «Фиалка», «Озарк Голд», «Костела») [5].

Таблица 3. Содержание элементов в плодах *Malus domestica* (L.) Borkh. (мг/кг сырой массы)

Элемент	Литературные данные [23–26]	Сорт яблони		
		«Экранное»	«Благая весть»	«Краса Свердловска»
Al	–	0.46±0.03	<b>0.75±0.10</b>	0.36±0.02
As	0.124	< 0.005		
B	–	0.66±0.04	0.80±0.04	<b>1.28±0.02</b>
Ba	–	< 0.005	0.14±0.02	0.15±0.02
Ca	10.3–37.8	36.5±0.7	91.1±2.4	<b>126.4±6.2</b>
Cd	0.015–0.127	<0.0001		
Co	0.03–0.42	0.011±0.001	<0.001	
Cr	0.005–0.210	0.013±0.002	<0.001	<b>0.021±0.001</b>
Cu	0.05–3.5	0.15±0.04	0.18±0.03	0.14±0.01
Fe	0.7–2.5	0.62±0.02	<b>1.42±0.07</b>	0.93±0.04
K	330–880	726.3±11.0	<b>1259.2±28.8</b>	<b>1215.1±14.5</b>
Li	–	<0.001		
Mg	13.1–40.0	5.4±0.2	16.0±0.5	<b>18.5±0.4</b>
Mn	0.3–0.7	0.056±0.002	<b>0.160±0.010</b>	0.130±0.010
Na	0–6.9	<0.1		
Ni	0.05–0.30	0.027±0.001	<0.001	0.025±0.002
P	21.0–130.0	78.5±2.2	<b>162.2±5.3</b>	127.1±2.8
Pb	0.04–1.20	0.048±0.003	0.050±0.002	0.030±0.002
Si	10.3–14.1	12.2±1.0	12.3±1.0	11.6±1.0
Sr	–	0.031±0.001	<b>0.130±0.010</b>	0.110±0.010
Ti	2.1–3.2	<0.001		
V	–	<0.001		
Zn	0.9–4.5	0.22±0.02	<b>0.26±0.02</b>	<b>0.27±0.02</b>

Таблица 4. Степень зависимости (тесноты) между двумя множествами элементов в системе «почва-растение»

Элемент	Коэффициенты корреляции		
	Пирсона	Спирмена	Кенделла
Al	0.951****	0.883***	0.722***
Cu	0.541	0.729**	0.551**
Fe	0.916****	0.767**	0.556**
Mg	0.715**	0.900****	0.778***
Mn	–0.849***	–	–
P	0.753**	–	–
Pb	0.941****	0.613*	0.457*

Примечание: «–» – явление не установлено; «\*» – корреляция значима при  $p < 0.1$ ; «\*\*» – при  $p < 0.05$ ; «\*\*\*» – при  $p < 0.01$ ; «\*\*\*\*» – при  $p < 0.001$ .

Таблица 5. Содержание антиоксидантов в плодах *Malus domestica* (L.) Borkh.

Показатель	Сорт яблони		
	«Экранное»	«Благая весть»	«Краса Свердловска»
Содержание полифенолов, ммоль/л экв. галловой кислоты	0.61±0.02	0.52±0.02	0.65±0.02
Антиоксидантная активность, %	88.4±2.1	75.9±1.7	90.1±1.9

Для изучения зависимостей между концентрацией химических элементов в почвенном покрове и накоплением в плодах яблони полифенольных соединений и формированием антиоксидантных свойств использовали уравнения регрессии. При этом в образцах почв для всех сортов яблок учитывали содержание элементов, относящихся к группе ТМ, и повышенные уровни микро- (В, Со) и макроэлементов (Mg, Р). В результате были определены соответствующие зависимости (Y – количество полифенолов и Z – антиоксидантная активность) в виде уравнений множественной линейной регрессии, скорректированный коэффициент детерминации (R<sup>2</sup>) в которых составляет 0.9985 для уравнения (2) и 0.9998 для уравнения (3) соответственно:

$$Y = 0,582455 + 1,99938 \times Cd - 0,0101133 \times Cu + 0,0238506 \times Zn - 0,0234373 \times As - 0,0301328 \times B - 0,0542247 \times Pb \quad (2)$$

$$Z = 2,96247 \times Co - 0,259319 \times Zn - 2,35719 \times As + 0,785191 \times B \quad (3)$$

Отметим, что указанная величина коэффициентов R<sup>2</sup> говорит о хорошей аппроксимации данных с помощью полученных моделей.

Таким образом, модели показали, что основной вклад в общее содержание полифенолов в плодах *Malus domestica* (L.) Borkh вносят уровни Cd, Zn, Cu, As, B и Pb в почве, а на величину АОА плодов влияют концентрации Co, B, Zn, As, в то время как содержания Mg, P, Cr, Fe, Mn, Ni несущественно влияют на эти показатели.

### Выводы

В верхнем горизонте почвы, используемой для возделывания яблонь, установлено неравномерное распределение большинства элементов (As, Cu, K, P, Cr, Al, Ba, Ca, Pb, Sr, B, Cd, Mg, Zn и др.) с высокой количественной вариабильностью. Содержание As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn в почвенных образцах соответствует регламентированным нормам СанПиН 1.2.3685-21.

В плодах яблонь содержания Cu, Fe, Mg (за исключением яблок «Экранное»), Cr (за исключением яблок «Благая весть») и Pb близки к литературным данным. Содержания Co, Mn, Ni и Zn в яблоках находятся за пределом нижней границы интервалов сравнения, величины Ca и K в яблоках «Благая весть» и «Краса Свердловска» и содержание P в плодах «Благая весть» – превосходят литературные данные.

Выявлена значимая линейная зависимость между содержанием Al, Fe, Mg, Mn, P, Pb в почве и в плодах яблони независимо от сорта. Используя непараметрические меры ранговой корреляции, дополнительно подтвердили достоверную взаимосвязь между содержаниями Al, Cu, Fe, Mg, Pb в почве и яблоках.

Основной вклад в общее содержание полифенолов в яблоках вносят уровни Cd, Zn, Cu, As, B и Pb в почве, на величину АОА плодов влияют концентрации Co, B, Zn, As в почвенном покрове, однако содержания Mg, P, Cr, Fe, Mn, Ni не оказывают существенного влияния на эти показатели.

### Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Южно-Уральского государственного университета и Свердловской селекционной станции садоводства. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

**Список литературы**

1. Дулов М.И. Биохимический состав и производство яблок в странах мира // Наукосфера. 2022. №2–1. С. 90–96.
2. Клименко А.С., Шподарева Е.Н. Адаптация технологических приёмов возделывания интенсивных яблоневых садов применительно к условиям Центрального Черноземья // Научные исследования XXI века. 2022. №1(15). С. 90–95.
3. Левшаков Л.В., Волобуева Н.В., Смиренин О.А. Технологические приёмы регулирования питательного режима яблони, возделываемой на серых лесных почвах Средней полосы // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. №9. С. 31–40.
4. Мотылева С.М. Полиэлементный состав плодов некоторых сортов яблони селекции ГНУ «ВНИИСПК» // Аграрный вестник Урала. 2010. Т. 75, №9. С. 66–70.
5. Wojdyło A., Oszmiański J., Laskowski P. Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties // Journal of agricultural and food chemistry. 2008. Vol. 56, no. 15. Pp. 6520–6530. DOI: 10.1021/jf800510j.
6. Suárez-Jacobo Á., Rüfer C.E., Gervilla R., Guamis B., Roig-Sagués A.X., Saldo J. Influence of ultra-high pressure homogenisation on antioxidant capacity, polyphenol and vitamin content of clear apple juice // Food chemistry. 2011. Vol. 127, no. 2. Pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.152.
7. Konwarh R., Pramanik S., Kalita D., Mahanta C.L., Karak N. Ultrasonication – A complementary ‘green chemistry’ tool to biocatalysis: A laboratory-scale study of lycopene extraction // Ultrasonics sonochemistry. 2012. Vol. 19, no. 2. Pp. 292–299. DOI: 10.1016/J.ULTSONCH.2011.07.010.
8. Ширшова А.А., Агеева Н.М., Бирюкова С.А. Исследование химического состава яблок различных сортов, произрастающих в хозяйствах Краснодарского края // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82, №2. С. 131–136. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-2-131-136.
9. Nkuimi Wandjou J.G., Lancioni L., Barbalace M.C., Hrelia S., Papa F., Sagratini G., Vittori S., Dall'Acqua S., Caprioli G., Beghelli D., Angeloni C., Lupidi G., Maggi F. Comprehensive characterization of phytochemicals and biological activities of the Italian ancient apple «Mela Rosa dei Monti Sibillini» // Food research international. 2020. Vol. 137. 109422. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109422.
10. Gónas P., Mišina I., Olšteine A., Krasnova I. Phenolic compounds in different fruit parts of crab apple: Dihydrochalcones as promising quality markers of industrial apple pomace by-products // Industrial crops and products. 2015. Vol. 74. Pp. 607–612. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.030.
11. Раченко М.А., Шигарова А.М., Раченко Е.И. Антиоксидантная активность плодов рода *Malus* в условиях Южного Предбайкалья // Химия растительного сырья. 2013. №4. С. 97–101. DOI: 10.14258/jcprm.1304097.
12. Kschonsek J., Wolfram T., Stöckl A., Böhm V. Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the in vitro antioxidant capacity // Antioxidants. 2018. Vol. 7, no. 1. P. 20. DOI: 10.3390/antiox7010020.
13. Skinner R.C., Gigliotti J.C., Ku K.M., Tou J.C. A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace // Nutrition reviews. 2018. Vol. 76(12). Pp. 893–909. DOI: 10.1093/nutrit/nuy033.
14. Муродова М.М., Кароматов И.Д. Яблоки – лечебное и профилактическое средство // Биология и интегративная медицина. 2018. №1 (18). С. 119–129.
15. Michalak A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress // Polish journal of environmental studies. 2006. Vol. 15, no. 4. Pp. 523–530.
16. Alagic S.Č., Tošić S.B., Dimitrijević M.D., Petrović J.V., Medić D.V. Chemometric evaluation of trace metals in *Prunus persica* L. Batech and *Malus domestica* from Minicevo (Serbia) // Food chemistry. 2017. Vol. 217. Pp. 568–575. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.09.006.
17. Andresen E., Peiter E., Kupper H. Trace metal metabolism in plants // Journal of experimental botany. 2018. Vol. 69, no. 5. Pp. 909–954. DOI: 10.1093/jxb/erx465.
18. Kupper H., Andresen E. Mechanisms of metal toxicity in plants // Metallomics. 2016. Vol. 8. Pp. 269–285. DOI: 10.1039/C5MT00244C.
19. Skórzyńska-Polit E., Drązkiewicz M., Wianowska D. The influence of heavy metal stress on the level of some flavonols in the primary leaves of *Phaseolus coccineus* // Acta physiologiae plantarum. 2004. Vol. 26(3). Pp. 247–254. DOI: 10.1007/s11738-004-0014-y.
20. Edelstein M., Ben-Hur M. Heavy metals and metalloids: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops // Scientia Horticulturae. 2018. Vol. 234. Pp. 431–444. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.12.039.
21. Чупарина Е.В., Баханова М.В., Ширапова С.Д. Характеристика элементных составов плодов яблони ягодной в условиях произрастания на почвах Республики Бурятия // Химия растительного сырья. 2019. №3. С. 185–195. DOI: 10.14258/jcprm.2019031911.
22. Баханова М.В., Чупарина Е.В., Багуева Ю.М., Ловцова Н.М., Утенкова А.А. Особенности элементного состава у различных форм яблони ягодной в зависимости от условий произрастания // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2018. №6(68). С. 5–17. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21797.
23. Чалдаев П.А. Изучение минерального состава яблок Самарской области // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2019. С. 587–589.



24. Кенжеханова М.Б., Мамаева Л.А., Ветохин С.С., Тулекбаева А.К., Кайсарова А.А. Минеральный состав и показатели безопасности яблок различных сортов, выращиваемых в Южном Казахстане // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. №5-6 (383-384). С. 12–14. DOI: 10.26297/0579-3009.2021.5-6.2.
25. Naimi N., Pilevar Z., Ranaei V., Mahmudiono T., Fakhri Y., Paseban A., Atamaleki A., Janghorban F., Khaneghah A.M. The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in apple fruit: a global systematic review, meta-analysis, and health risk assessment // Environmental science and pollution research. 2022. Vol. 29. Pp. 54013–54024. DOI: 10.1007/s11356-022-21158-1.
26. Prundeanu I.-M., Chelariu C., Balaban S.-I., Iancu O.-G. Distribution and behaviour of some trace elements as a function of apple varieties in Northeastern Romania // International journal of environmental research and public health. 2020. Vol. 17, no. 7. P. 2607. DOI: 10.3390/ijerph17072607.
27. Русанов А.М., Тесля А.В., Прихожай Н.И., Турлибекова Д.М. Содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах г. Орска // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. №4(140). С. 226–230.
28. Li Z., Ma Z., van der Kuijp T.J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment // Science of the total environment. 2014. Vol. 468–469. Pp. 843–853. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090.
29. Cicco N., Lanorte M.T., Paraggio M., Viggiano M. A reproducible, rapid and inexpensive Folin-Ciocalteu micro-method in determining phenolics of plant methanol extracts // Microchemical journal. 2009. Vol. 91, no. 1. Pp. 107–110. DOI: 10.1016/j.microc.2008.08.011.
30. Öztürk H., Kolak U., Meric C. Antioxidant, anticholinesterase and antibacterial activities of *Jurinea consanguinea* DC // Records of natural products. 2011. Vol. 5(1). Pp. 43–51.
31. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск, 2012. 220 с.
32. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 469 с.
33. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов-на-Дону, 2013. 388 с.
34. Байтимерова Е.А., Михеева Е.В., Беспамятных Е.Н., Донник И.М., Кривоногова А.С. Оценка загрязнения рекреационных зон мегаполиса тяжелыми металлами (на примере Екатеринбурга) // Аграрный вестник Урала. 2016. №4. С. 71–77.
35. Кулешов В.Н., Брусницын А.И., Старикова Е.В. Месторождения марганца на северо-востоке европейской части России и Урала: геохимия изотопов, генезис, эволюция рудогенеза // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56, №5. С. 423. DOI: 10.7868/S0016777014050062.
36. Харина Г.В., Алешина Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, №2. С. 173–183. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3330.
37. Пузанов А.В., Бабошкина С.В. Мышьяк в системе почва – природные воды – растения Алтая // Почвоведение. 2009. №9. С. 1073–1082.
38. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. 548 p.
39. Колесников С.И., Мощенко Д.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Меженков А.А., Литвинов Ю.А. Оценка и прогноз состояния почв Центрального Предкавказья и Кавказа при загрязнении хромом // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, №9. С. 48–53. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-9-48-53.
40. Климова Е.В. Тяжелые металлы в системе почва – растение // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 1999. №4. С. 770.
41. Жуйков Д.В. Мониторинг содержания марганца в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, №3. С. 19–22. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10304.
42. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М., 1957. 259 с.
43. Русанов А.М., Савин Е.З., Нигматянова С.Э. Содержание тяжелых металлов в плодах яблони в городских условиях // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. №1(120). С. 148–151.
44. Пакшина С.М., Белоус Н.М., Малявко Г.П., Белоус И.Н. Механизмы поглощения элементов питания корневыми системами культур разных видов // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №6 (94). С. 18–26. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-18-26.
45. Нутрициология и клиническая диетология: национальное руководство / под ред. В.А. Тутельяна, Д.Б. Никитюка. М., 2022. 1008 с.

*Поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.*

*После переработки 25 сентября 2023 г.*

*Принята к публикации 16 января 2024 г.*

Naumova N.L.<sup>1\*</sup>, Lukin A.A.<sup>1</sup>, Kudryavtsev K.N.<sup>1</sup>, Slepneva T.N.<sup>2</sup>, Velisevich E.A.<sup>1</sup> ELEMENTAL COMPOSITION AND ANTIOXIDANT POTENTIAL OF FRUITS OF MALUS DOMESTICA (L.) BORKH.

<sup>1</sup> South Ural State University, Lenina av., 76, Chelyabinsk, 454080, Russia, n.naumova@inbox.ru

<sup>2</sup> Sverdlovsk Horticulture Breeding Station – a structural subdivision of the Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Shcherbakova st., 147, Ekaterinburg, 620076, Russia

The results of studying the elemental composition, polyphenol content and antioxidant activity of apple fruits of zoned varieties of the Sverdlovsk Horticultural Breeding Station are presented. The elemental composition of the soil samples on which the plants were grown was determined. It was established that the contents of As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn in the soil horizon correspond to the standards of SanPiN 1.2.3685-21. The detected amounts of Al, As, Ba, Ca, Cr, Fe, K, Li, Na, Sr, Ti, V are smaller than the clarkes, and the contents of B, Mg and P are higher. In apple fruits, the levels of Cu, Fe, Mg (except for Screen apples), Cr (except for Good News apples) and Pb are close to the literature data. The contents of Co, Mn, Ni and Zn in apples are beyond the lower limit of the comparison intervals, the values of Ca and K in the “Good News” and “Beauty of Sverdlovsk” apples and the P content in the “Good News” fruits exceed the literature data. A significant linear relationship was revealed between the content of Al, Fe, Mg, Mn, P, Pb in the soil and in apple fruits, regardless of the variety. The main contribution to the total content of polyphenols in apples is made by the levels of Cd, Zn, Cu, As, B and Pb in the soil; the AOA value of fruits is influenced by the concentrations of Co, B, Zn, As in the soil cover, but the contents of Mg, P, Cr, Fe, Mn, Ni do not have a significant effect on these indicators.

**Keywords:** soil, apples, elemental composition, phenolic compounds, antioxidant activity.

**For citing:** Naumova N.L., Lukin A.A., Kudryavtsev K.N., Slepneva T.N., Velisevich E.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 245–256. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240212563.

### References

- Dulov M.I. *Naukosfera*, 2022, no. 2–1, pp. 90–96. (in Russ.).
- Klimenko A.S., Shpodareva Ye.N. *Nauchnyye issledovaniya XXI veka*, 2022, no. 1(15), pp. 90–95. (in Russ.).
- Levshakov L.V., Volobuyeva N.V., Smirenin O.A. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2020, no. 9, pp. 31–40. (in Russ.).
- Motyleva S.M. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2010, vol. 75, no. 9, pp. 66–70. (in Russ.).
- Wojdyło A., Oszmiański J., Laskowski P. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2008, vol. 56, no. 15, pp. 6520–6530. DOI: 10.1021/jf800510j.
- Suárez-Jacobo Á., Rüfer C.E., Gervilla R., Guamis B., Roig-Sagués A.X., Saldo J. *Food chemistry*, 2011, vol. 127, no. 2, pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.152.
- Konwarh R., Pramanik S., Kalita D., Mahanta C.L., Karak N. *Ultrasonics sonochemistry*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 292–299. DOI: 10.1016/J.ULTSONCH.2011.07.010.
- Shirshova A.A., Ageyeva N.M., Biryukova S.A. *Vestnik VGUIT*, 2020, vol. 82, no. 2, pp. 131–136. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-2-131-136. (in Russ.).
- Nkuimi Wandjou J.G., Lancioni L., Barbalace M.C., Hrelia S., Papa F., Sagratini G., Vittori S., Dall'Acqua S., Caprioli G., Beghelli D., Angeloni C., Lupidi G., Maggi F. *Food research international*, 2020, vol. 137, 109422. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109422.
- Górnaś P., Mišina I., Olšteine A., Krasnova I. *Industrial crops and products*, 2015, vol. 74, pp. 607–612. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.030.
- Rachenko M.A., Shigarova A.M., Rachenko Ye.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 4, pp. 97–101. DOI: 10.14258/jcprm.1304097. (in Russ.).
- Kschonsek J., Wolfram T., Stöckl A., Böhm V. *Antioxidants*, 2018, vol. 7, no. 1, p. 20. DOI: 10.3390/antiox7010020.
- Skinner R.C., Gigliotti J.C., Ku K.M., Tou J.C. *Nutrition reviews*, 2018, vol. 76(12), pp. 893–909. DOI: 10.1093/nutrit/nuy033.
- Murodova M.M., Karomatov I.D. *Biologiya i integrativnaya meditsina*, 2018, no. 1 (18), pp. 119–129. (in Russ.).
- Michalak A. *Polish journal of environmental studies*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 523–530.
- Alagic S.Č., Tošić S.B., Dimitrijević M.D., Petrović J.V., Medić D.V. *Food chemistry*, 2017, vol. 217, pp. 568–575. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.09.006.
- Andresen E., Peiter E., Kupper H. *Journal of experimental botany*, 2018, vol. 69, no. 5, pp. 909–954. DOI: 10.1093/jxb/erx465.
- Kupper H., Andresen E. *Metallomics*, 2016, vol. 8, pp. 269–285. DOI: 10.1039/C5MT00244C.
- Skórzyńska-Polit E., Drazkiewicz M., Wianowska D. *Acta physiologiae plantarum*, 2004, vol. 26(3), pp. 247–254. DOI: 10.1007/s11738-004-0014-y.
- Edelstein M., Ben-Hur M. *Scientia Horticulturae*, 2018, vol. 234, pp. 431–444. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.12.039.
- Chuparina Ye.V., Bakhanova M.V., Shirapova S.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 185–195. DOI: 10.14258/jcprm.2019031911. (in Russ.).
- Bakhanova M.V., Chuparina Ye.V., Batuyeva Yu.M., Lovtsova N.M., Utenkova A.A. *Vestnik Severo-Vostochnogo Federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*, 2018, no. 6(68), pp. 5–17. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21797. (in Russ.).

\* Corresponding author.

23. Chaldayev P.A. *Tekhnologii i oborudovaniye khimi-cheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti: materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. [Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: materials of the XII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. 2019, pp. 587–589. (in Russ.).
24. Kenzhekhanova M.B., Mamayeva L.A., Vetokhin S.S., Tulekbayeva A.K., Kaysarova A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2021, no. 5-6 (383-384), pp. 12–14. DOI: 10.26297/0579-3009.2021.5-6.2. (in Russ.).
25. Naimi N., Pilevar Z., Ranaei V., Mahmudiono T., Fakhri Y., Paseban A., Atamaleki A., Janghorban F., Khaneghah A.M. *Environmental science and pollution research*, 2022, vol. 29, pp. 54013–54024. DOI: 10.1007/s11356-022-21158-1.
26. Prundeanu I.-M., Chelariu C., Balaban S.-I., Iancu O.-G. *International journal of environmental research and public health*, 2020, vol. 17, no. 7, p. 2607. DOI: 10.3390/ijerph17072607.
27. Rusanov A.M., Teslya A.V., Prikhozhay N.I., Turlibekova D.M. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4(140), pp. 226–230. (in Russ.).
28. Li Z., Ma Z., van der Kuijp T.J., Yuan Z., Huang L. *Science of the total environment*, 2014, vol. 468–469, pp. 843–853. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090.
29. Cicco N., Lanorte M.T., Paraggio M., Viggiano M. *Microchemical journal*, 2009, vol. 91, no. 1, pp. 107–110. DOI: 10.1016/j.microc.2008.08.011.
30. Öztürk H., Kolak U., Meric C. *Records of natural products*, 2011, vol. 5(1), pp. 43–51.
31. Il'in V.B. *Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva – rasteniye*. [Heavy metals and non-metals in the soil-plant system]. Novosibirsk, 2012, 220 p. (in Russ.).
32. *SanPiN 1.2.3685-21. Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya*. [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and harmlessness of environmental factors to humans]. Moscow, 2021, 469 p. (in Russ.).
33. Alekseyenko V.A., Alekseyenko A.V. *Khimicheskiye elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selibnykh landshaftov*. [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes]. Rostov-on-Don, 2013, 388 p. (in Russ.).
34. Baytimirova Ye.A., Mikheyeva Ye.V., Bespamyatnykh Ye.N., Donnik I.M., Krivonogova A.S. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2016, no. 4, pp. 71–77. (in Russ.).
35. Kuleshov V.N., Brusnitsyn A.I., Starikova Ye.V. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2014, vol. 56, no. 5, p. 423. DOI: 10.7868/S0016777014050062. (in Russ.).
36. Kharina G.V., Aleshina L.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 173–183. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3330. (in Russ.).
37. Puzanov A.V., Baboshkina S.V. *Pochvovedeniye*, 2009, no. 9, pp. 1073–1082. (in Russ.).
38. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants. 4th Edition*. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p.
39. Kolesnikov S.I., Moshchenko D.I., Kuzina A.A., Kazeyev K.Sh., Mezhenkov A.A., Litvinov Yu.A. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2022, vol. 26, no. 9, pp. 48–53. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-9-48-53. (in Russ.).
40. Klimova Ye.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal*, 1999, no. 4, p. 770. (in Russ.).
41. Zhuykov D.V. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, vol. 33, no. 3, pp. 19–22. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10304. (in Russ.).
42. Vinogradov A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh*. [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. Moscow, 1957, 259 p. (in Russ.).
43. Rusanov A.M., Savin Ye.Z., Nigmatyanova S.E. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1(120), pp. 148–151. (in Russ.).
44. Pakshina S.M., Belous N.M., Malyavko G.P., Belous I.N. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2022, no. 6 (94), pp. 18–26. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-18-26. (in Russ.).
45. *Nutritsiologiya i klinicheskaya diyetologiya: natsional'noye rukovodstvo* [Nutritionology and clinical dietology: national guidelines], ed. V.A. Tutel'yan, D.B. Nikityuk. Moscow, 2022, 1008 p. (in Russ.).

Received February 15, 2023

Revised September 25, 2023

Accepted January 16, 2024

**Сведения об авторах**

*Наумова Наталья Леонидовна* – доктор технических наук, профессор кафедры Экология и химическая технология, n.naumova@inbox.ru

*Лукин Александр Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры Пищевые и биотехнологии, lukin3415@gmail.com

*Кудрявцев Константин Николаевич* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического обеспечения информационных технологий, n.naumova@inbox.ru

*Слепнёва Татьяна Николаевна* – руководитель, sadovodstvo@list.ru

*Велисевич Евгений Александрович* – аспирант, boode0114@gmail.com

**Information about authors**

*Naumova Natalya Leonidovna* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ecology and Chemical Technology, n.naumova@inbox.ru

*Lukin Alexander Anatolyevich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, lukin3415@gmail.com

*Kudryavtsev Konstantin Nikolaevich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Support of Information Technologies, n.naumova@inbox.ru

*Slepneva Tatyana Nikolaevna* – director, sadovodstvo@list.ru

*Velisevich Evgeniy Aleksandrovich* – graduate student, boode0114@gmail.com