

Читать
онлайн
Read
onlineПанов А.В.¹, Трапезников А.В.², Коржавин А.В.², Сидорова Е.В.¹, Корнеев Ю.Н.¹

Тяжёлые металлы и мышьяк в пищевой продукции района размещения промышленных предприятий и атомной электростанции

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», 249032, Обнинск, Россия;²ФГБНУ «Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук», 620144, Екатеринбург, Россия

Введение. Дана оценка содержания 17 химических элементов в местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах тридцатиклометровой зоны влияния Белоярской АЭС, расположенной в промышленно развитом регионе Свердловской области.

Материалы и методы. Исследование проведено в 2013 и 2019 гг. Отбор проб производили в частном секторе 27 населённых пунктов, на 20 сельскохозяйственных предприятиях и в лесах тридцатиклометровой зоны вокруг Белоярской АЭС, а также в водоёме-охладителе атомной станции. В продукции растениеводства (зерно, картофель, корнеплоды, овощи), животноводства (молоко, мясо, птица) и в природных продуктах (грибы, ягоды, рыба) оценивали содержание Pb, Zn, Cd, As, Hg, Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb, Sr, Mn, V, W, Ba и Fe. Содержание элементов определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионным методами анализа. Полученные результаты по наиболее токсичным Pb, Cd, As и Hg сравнивали с нормативами СанПиН 2.3.2.1078–01.

Результаты. Представлена динамика содержания тяжёлых металлов и мышьяка в местных продуктах питания до и после ввода в эксплуатацию реактора БН-800. Выделены виды пищевой продукции с максимальным накоплением загрязнителей. В большинстве продуктов питания, произведённых в районе Белоярской АЭС, превышения установленных санитарно-гигиенических нормативов по содержанию наиболее токсичных элементов не обнаружено. Отмечено превышение нормативов СанПиН по содержанию мышьяка в 10–30% проб зерна, по содержанию кадмия – в 15–20% проб лесных ягод.

Ограничения исследования. Содержание токсикантов оценивали в основных группах местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов, имевшихся в наличии в период отбора проб. Расширение перечня анализируемой продукции и количества элементов может стать направлением дальнейших исследований.

Заключение. Оценка безопасности сельскохозяйственной и природной пищевой продукции в зоне влияния Белоярской АЭС показала, что эксплуатация реакторов БН-600 и БН-800 не оказывает значимого влияния на увеличение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах местного производства, а накопление в них загрязнителей происходит за счёт многолетних выбросов промышленных предприятий Свердловской области.

Ключевые слова: техногенез; тяжёлые металлы; сельскохозяйственная продукция; природные продукты; мониторинг; токсичные элементы; санитарно-гигиеническая оценка

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Сидорова Е.В., Корнеев Ю.Н. Тяжёлые металлы и мышьяк в пищевой продукции района размещения промышленных предприятий и атомной электростанции. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(1): 70–76. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-1-70-76>
<https://elibrary.ru/lkogfg>

Для корреспонденции: Панов Алексей Валерьевич, гл. науч. сотр. лаб. математического моделирования ФГБНУ ВНИИРАЭ, 249032, Обнинск. E-mail: riar@mail.ru

Участие авторов: Панов А.В. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Трапезников А.В., Коржавин А.В. – написание текста; Сидорова Е.В., Корнеев Ю.Н. – сбор и обработка материала. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 20.09.2022 / Принята к печати: 08.12.2022 / Опубликована: 15.02.2023

Aleksei V. Panov¹, Alexander V. Trapeznikov², Aleksandr V. Korzhavin², Elena V. Sidorova¹,
Yuri N. Korneev¹

Heavy metals and arsenic in foodstuffs in the vicinity of industrial enterprises and nuclear power plant

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, 249032, Russian Federation;²Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

Introduction. There is evaluated the content of seventeen elements in local agricultural and natural foodstuffs of the 30-km zone of influence of the Beloyarsk NPP, located in the industrially developed area of the Sverdlovsk region.

Materials and methods. The study was conducted in 2013 and 2019 in the private sector of 27 settlements, 20 collective farms and forests of the 30-km zone around the Beloyarsk NPP, and a cooling reservoir. In crop products (grain, potatoes, roots, vegetables), animal husbandry (milk, meat, poultry) and natural foods (mushrooms, berries, fish) the content of Pb, Zn, Cd, As, Hg, Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb, Sr, Mn, V, W, Ba and Fe was estimated. Elements in the samples were detected by atomic absorption and plasma emission methods of analysis. The results obtained for the most toxic Pb, Cd, As and Hg were compared with sanitary-hygienic standards (SanPiN 2.3.2.1078–01).

Results. The trend in the content of heavy metals and arsenic in local foodstuffs before and after the commissioning of the BN-800 reactor is presented. The types of foods with the maximum accumulation of pollutants are identified. In the majority of local foodstuffs in the vicinity of the Beloyarsk NPP there was shown no risk of exceeding the sanitary-hygienic standards for the content of the most toxic elements. An excess of SanPiN standards was noted for arsenic content in 10–30% of grain samples, for cadmium in 15–20% of wild berry samples.

Limitations. The content of toxicants was assessed in the main groups of local agricultural and natural foods available during the sampling period, and expanding the list of analyzed products and the number of elements may be the subject of further research.

Conclusion. The assessment of the safety of foodstuffs in the vicinity of the Beloyarsk NPP showed that the operation of the BN-600 and BN-800 reactors doesn't significantly affect the increase in the content of toxic elements in locally produced foods, and the accumulation of pollutants in them is determined by long-term emissions of industrial enterprises of Sverdlovsk region.

Keywords: technogenesis; heavy metals; agricultural products; natural products; toxic elements; monitoring; sanitary and hygienic assessment

Compliance with ethical standards. The study does not require submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Sidorova E.V., Korneev Yu.N. Heavy metals and arsenic in foodstuffs in the vicinity of industrial enterprises and nuclear power plant. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(1): 70-76. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-1-70-76> <https://elibrary.ru/lkogfg> (In Russian)

For correspondence: Aleksei V. Panov, chief researcher of the Laboratory mathematical modelling of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation. E-mail: riar@mail.ru

Information about authors:

Panov A.V., <https://orcid.org/0000-0002-9845-7572>

Trapeznikov A.V., <https://orcid.org/0000-0001-5676-7807>

Korzhavin A.V., <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Sidorova E.V., <https://orcid.org/0000-0002-3247-496X>

Contribution: Panov A.V. – research concept and design, writing a text, editing; Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V. – writing a text; Sidorova E.V., Korneev Yu.N. – the collection and processing of the material. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: September 9, 2022 / Accepted: December 8, 2022 / Published: February 15, 2023

Введение

Загрязнение тяжёлыми металлами и мышьяком почвенного покрова и, как следствие, пищевых продуктов является значимым антропогенным фактором, оказывающим негативное влияние на здоровье человека [1–4]. Особенно велик вклад поллютантов в контаминацию продуктов питания местного производства на промышленно развитых территориях, где ведётся добыча и переработка полиметаллических руд [5–7]. В России большое количество месторождений железа, меди, никеля и других металлов находится в Уральском федеральном округе. Урал с его мощным горно-металлургическим комплексом является крупнейшим в стране регионом по переработке минерального сырья. Здесь добывают колчеданные руды, содержащие до 30 химических элементов, включая наиболее токсичные свинец, кадмий, мышьяк и ртуть [8]. Многие опасные поллютанты (ртуть, мышьяк и др.) обладают высокой летучестью, легко распространяясь с пылью в приземной атмосфере [9]. Поэтому промышленная разработка рудных месторождений приводит к рассеиванию тяжёлых металлов и мышьяка в аграрных и природных (наземных и водных) экосистемах, накоплению их в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции, повышая риски возникновения заболеваний у населения, особенно у детей [10–12].

Свердловская область Уральского федерального округа входит в пять наиболее неблагоприятных по экологической ситуации регионов России. Так, в 2020 г. максимальные выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников зафиксированы в Рефтинском (229,7 тыс. т), Нижнем Тагиле (122 тыс. т) и Качканаре (82,3 тыс. т). За последние десять лет на Урале отмечено увеличение поступления в окружающую среду марганца, кадмия и свинца в составе выбросов [13]. На экологию Уральского региона оказывает влияние и радиационный фактор. Он включает загрязнение территорий радионуклидами при испытаниях ядерного оружия и проведении ядерных взрывов в мирных целях; вследствие добычи урановой руды, многолетних сбросов и выбросов, работы Белоярской АЭС, а также аварий на ПО «Маяк» при производстве ядерных материалов [8]. Белоярская атомная станция является старейшей в России. Её первые реакторы на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200) остановлены более 30 лет назад и сейчас находятся на стадии вывода из эксплуатации. Реакторы на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 эксплуатируются в настоящее время [14, 15].

Выбросы промышленных предприятий Урала и Белоярской АЭС через воздушный бассейн поступают в почву наземных экосистем и далее в местную пищевую продукцию. Кроме этого, в планктоне сбросных вод водоёма-охладителя Белоярской АЭС в 1980-х годах отмечались повышенные до 4–20 раз по сравнению с гидробионтами из водозабора концентрации тяжёлых металлов. Схожие закономерности в акваториях водоёмов-охладителей получены для Курской и Ингалинской АЭС [16]. Загрязнение тяжёлыми металлами планктона может приводить к накоплению поллютантов в рыбе, входящей в рацион населения. Важно отметить, что местная сельскохозяйственная и природная пищевая продукция, которую производит или добывает для собственных нужд население, как правило, не проходит в полном объёме санитарно-гигиенического контроля на содержание тяжёлых металлов. Поэтому в промышленных регионах поступление в организм человека с продуктами питания поллютантов от выбросов предприятий может являться значимым, но слабо контролируемым фактором, негативно влияющим на здоровье.

Для оценки экологической обстановки в районе Белоярской АЭС, являющейся наиболее крупным радиационно опасным промышленным объектом Свердловской области, в 2013 г. была создана сеть мониторинга природных и аграрных экосистем [17, 18], а в более ранний период – водных [15]. Проанализировано многолетнее влияние атомной станции на радиозэкологическую обстановку в тридцатикиллометровой зоне её влияния.

Цель работы – санитарно-гигиеническая оценка безопасности пищевой продукции, производимой в промышленно развитом районе размещения Белоярской АЭС, с учётом поступления в организм человека с местными продуктами питания не только радионуклидов, но и тяжёлых металлов.

Материалы и методы

Исследование проводилось в 2013 г., на этапе завершения строительства самого крупного в мире реактора на быстрых нейтронах БН-800 Белоярской АЭС, и через три года после начала его эксплуатации – в 2019 г. Это дало возможность оценить техногенный фон, сформировавшийся в промышленном регионе за годы работы атомной станции (реакторы АМБ-100, АМБ-200 и БН-600), а также учесть возможное влияние нового энергоблока БН-800 на накопление поллютантов в местной пищевой продукции.

Образцы сельскохозяйственных и природных продуктов питания отбирали на сети мониторинга в частном секторе 27 населённых пунктов (НП), расположенных в разных направлениях и на разном расстоянии от Белоярской АЭС [17]:

- в ближней зоне атомной станции (0–5 км) – НП Заречный и Режик;
- в зоне наблюдения (5–15 км) – НП Шеелит, Муранитный, Ялунина, Гагарка, Малиновка, Мезенское, Белоярский, Баженово, Сарапулка;
- в зоне влияния (15–30 км) – НП Малобрусанское, Асбест, Становая, Верхнее Дуброво, Рассоха, Бобровка, Измоденово, Изумруд, Большебрусанское, Косулино, Грязновское, Кочнево, Исток, Орлово, Малышева, Бараба.

Пробы аграрной продукции отбирали также на 11 сельскохозяйственных предприятиях и в 9 крестьянско-фермерских хозяйствах, расположенных на территории Белоярского и Богдановичского районов Свердловской области и входящих в тридцатикилометровую зону влияния Белоярской АЭС [18]. Природную продукцию (грибы и ягоды) собирали в лесах вблизи обследуемых населённых пунктов, рыбу ловили в водоёме-охладителе атомной станции. Населённые пункты, хозяйства и леса для сети мониторинга выбирали так, чтобы они были равномерно распределены в зоне влияния Белоярской АЭС. Количество точек пробоотбора и их размещение являлось достаточным для пространственной характеристики уровней содержания тяжёлых металлов и мышьяка в производимой местной пищевой продукции. Таким образом была обеспечена оценка максимально возможного воздействия Белоярской АЭС на загрязнение поллютантами местных продуктов питания.

Исследуемая продукция растениеводства включала зерно (овёс, озимая пшеница, ячмень), картофель, корнеплоды (морковь, свёкла) и овощи (кабачки, капуста, лук, огурцы, томаты, тыква, цукини). Продукты животного происхождения были представлены пробами молока, говядины, свинины и куриного мяса. Природная продукция включала смешанные пробы грибов, лесных и садовых ягод (земляника, малина, черника, смородина, крыжовник), а также рыбы (плотва, окунь).

Отбор образцов пищевой продукции, пробоподготовку и анализ на содержание тяжёлых металлов проводили по аттестованным методикам^{1,2,3} в сертифицированной испытательной лаборатории агроэкологии ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.513078). Для подготовки проб к измерениям использовали методы холодного пара, а также мокрого озоления с помощью микроволновой системы MARS-5 (СЕМ, США). Валовое содержание тяжёлых металлов и мышьяка в образцах определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионными методами. Измерения проводили на аксиальном атомно-эмиссионном (оптическом) спектрометре с атомизацией проб в индуктивно-связанной плазме (ИСП-ОЭС) Liberty II (Varian, Австралия – США) и спектрометре «КВАНТ-Z. ЭТА-1» с генератором ртутно-гидридным ГРГ-3. Используемые средства измерений и методические обеспечение позволили достоверно определять содержание химических элементов в пищевой продукции на уровне регионального техногенного фона. Санитарно-гигиеническую оценку безопасности пищевых продуктов проводили, сопоставляя результаты измерений содержания в них поллютантов с

нормативами СанПиН 2.3.2.1078–01⁴, ТР ТС 021/2011⁵ и ТР ТС 027/2012⁶. Статистическая обработка данных включала в себя оценку среднего и стандартного отклонения с использованием Microsoft Excel. Данные по зерну представлены в расчёте на воздушно-сухую массу, по остальным продуктам – на сырой вес, как это принято в научной литературе.

Результаты

Содержание 17 элементов в полевых культурах района размещения Белоярской АЭС представлено в диапазоне шести порядков величин (табл. 1). Максимальными уровнями накопления в продукции растениеводства характеризуются железо (3–83 мг/кг) и цинк (1–22 мг/кг), минимальными – наиболее токсичные свинец, кадмий и ртуть (0,02–60 мкг/кг). По снижению среднего содержания в продукции растениеводства элементы представляют ряд: Fe (67% от общего количества) > Zn (17%) > Sr (3,9%) > Cu (3,8%) > Sb (2,8%) > Mn (1,6%) > Ba (1,5%) > W (1,2%) > V (0,4%) > Ni (0,3%) > Mo (0,2%) > Cr (0,15%) > As (0,1%) > Co (0,05%) > Pb (0,04%) > Cd (0,03%) > Hg (0,0003%). За исследуемый период (2013–2019 гг.) соотношение большинства элементов в сельскохозяйственных культурах было достаточно стабильным. В течение шести лет в продукции растениеводства отмечено некоторое увеличение содержания ванадия (до 2,5 раза), стронция (2,2 раза) и молибдена (1,7 раза), а также сниженные концентрации мышьяка (2,2 раза). Эти изменения в накоплении сельскохозяйственными культурами химических элементов обусловлены не только их содержанием в почвенном покрове, но и динамикой почвенных характеристик агроценозов вследствие изменения объёмов применяемых агроулучшителей, а также видовыми особенностями растений. В большей степени элементы накапливаются в зерне (около 113 мг/кг по общему количеству), в меньшей – в картофеле (20–24 мг/кг) и корнеплодах (11–16 мг/кг), а минимально – в овощах (7–8 мг/кг). На вынос элементов с урожаем в определённой степени влияют и климатические условия, например, ежегодные объёмы осадков и температура.

При исследовании продуктов животноводства наибольшее накопление элементов (30–80 мг/кг) обнаружено в свинине и говядине, в мясе птицы – на уровне 25–50 мг/кг. В молоке накопление было минимальным – 3,5–7,2 мг/кг. Такие уровни содержания тяжёлых металлов обусловлены преимущественно Zn и Fe, которые составляют более 80% от общего количества элементов в продуктах (табл. 2).

Все элементы по снижению уровня их содержания в продукции животного происхождения представляют собой ряд: Zn (54%) > Fe (33%) > Sr (5,3%) > Cu (4,2%) > Mn (1,0%) > Ba (0,8%) > Sb (0,7%) > W (0,3%) > Ni (0,15%) > Cr (0,14%) > Mo (0,12%) > Pb (0,11%) > V (0,09%) > Cd (0,03%) > As (0,02%) > Co (0,01%) > Hg (0,0003%).

Уровни накопления химических элементов в различных природных продуктах питания различаются незначительно: 20–40 мг/кг в грибах; 15–30 мг/кг – в ягодах и в пределах 27 мг/кг по общему содержанию – в рыбе (табл. 3). Закономерности накопления элементов в природных продуктах представляют ряд по снижению: Fe (51%) > Zn (22%) > Mn (7,9%) > Sr (5,3%) > Cu (4,5%) > Ba (3,9%) > Sb (1,9%) > Ni (1,3%) > W (1,1%) > V (0,3%) > Cr (0,28%) > Pb (0,27%) > Mo (0,24%) > Cd (0,12%) > As (0,09%) > Co (0,08%) > Hg (0,0002%).

¹ ГОСТ 26929–94. Сырьё и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Стандартинформ; 2010.

² ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: Госкомэкология России; 2005.

³ ГОСТ 30178–96. Сырьё и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М.: Стандартинформ; 2010.

⁴ Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078–01. *Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора*. 2002; 4(10): 9-144.

⁵ ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (с изменениями на 14 июля 2021 года).

⁶ ТР ТС 027/2012 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания».

Original article

Таблица 1 / Table 1

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка (мг/кг; Hg (мкг/кг)) в продукции полеводства района размещения Белоярской АЭС, $M \pm m$

The content of heavy metals and arsenic in the field crops in the vicinity of the Beloyarsk NPP, mg/kg (Hg, µg/kg), $M \pm m$

Элемент Element	Год Year	Вид продукции / Product range			
		Зерно Grain	Картофель Potato	Корнеплоды Root vegetables	Овощи Vegetables
Pb	2013	0.06 ± 0.04	0.004 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.009 ± 0.004
	2019	0.05 ± 0.03	0.015 ± 0.004	0.005 ± 0.002	0.004 ± 0.002
Zn	2013	19.5 ± 5.51	1.95 ± 0.34	2.21 ± 1.49	1.03 ± 0.29
	2019	21.7 ± 3.32	1.94 ± 0.37	2.06 ± 1.01	1.13 ± 0.35
Cd	2013	0.02 ± 0.01	0.004 ± 0.002	0.01 ± 0.008	0.005 ± 0.002
	2019	0.03 ± 0.01	0.002 ± 0.001	0.02 ± 0.007	0.009 ± 0.004
As	2013	0.19 ± 0.07	0.043 ± 0.002	0.03 ± 0.016	0.019 ± 0.01
	2019	0.10 ± 0.06	0.013 ± 0.005	0.01 ± 0.008	0.007 ± 0.04
Hg	2013	0.32 ± 0.07	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02	0.021 ± 0.005
	2019	0.36 ± 0.27	0.02 ± 0.01	0.07 ± 0.05	0.018 ± 0.009
Mo	2013	0.16 ± 0.11	0.12 ± 0.07	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02
	2019	0.23 ± 0.12	0.22 ± 0.16	0.07 ± 0.05	0.07 ± 0.04
Cu	2013	4.22 ± 1.32	0.91 ± 0.19	0.77 ± 0.58	0.25 ± 0.09
	2019	4.44 ± 1.07	0.70 ± 0.27	0.41 ± 0.16	0.24 ± 0.08
Ni	2013	0.30 ± 0.19	0.04 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.04
	2019	0.51 ± 0.18	0.11 ± 0.06	0.05 ± 0.04	0.05 ± 0.03
Co	2013	0.04 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.004
	2019	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.01 ± 0.001
Cr	2013	0.13 ± 0.09	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.018 ± 0.01
	2019	0.12 ± 0.08	0.04 ± 0.02	0.08 ± 0.04	0.013 ± 0.01
Sb	2013	1.21 ± 0.42	1.48 ± 1.08	0.16 ± 0.13	0.15 ± 0.13
	2019	1.90 ± 1.21	2.54 ± 0.51	0.72 ± 0.24	0.51 ± 0.36
Sr	2013	1.48 ± 0.51	0.42 ± 0.14	1.37 ± 0.58	0.57 ± 0.17
	2019	4.71 ± 2.59	0.86 ± 0.21	1.92 ± 1.11	0.84 ± 0.46
Mn	2013	0.24 ± 0.11	0.64 ± 0.47	0.82 ± 0.19	0.62 ± 0.13
	2019	0.27 ± 0.12	1.18 ± 0.21	0.73 ± 0.17	0.53 ± 0.18
V	2013	0.25 ± 0.09	0.05 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.004
	2019	0.75 ± 0.53	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.02 ± 0.01
W	2013	1.28 ± 0.61	0.19 ± 0.06	0.05 ± 0.02	0.06 ± 0.04
	2019	1.17 ± 0.80	0.88 ± 0.29	0.04 ± 0.02	0.21 ± 0.14
Ba	2013	1.43 ± 0.92	0.11 ± 0.07	0.58 ± 0.41	0.14 ± 0.08
	2019	0.97 ± 0.53	0.55 ± 0.15	0.91 ± 0.27	0.21 ± 0.09
Fe	2013	82.5 ± 14.1	17.9 ± 0.57	10.04 ± 6.93	5.38 ± 2.99
	2019	76.3 ± 16.6	10.8 ± 0.98	4.13 ± 2.24	2.68 ± 0.91
n	2013	7	3	4	10
	2019	9	6	4	11

Таблица 2 / Table 2

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка (мг/кг; Hg (мкг/кг)) в продукции животноводства района размещения Белоярской АЭС, $M \pm m$

The content of heavy metals and arsenic in animal products in the vicinity of the Beloyarsk NPP, mg/kg (Hg, µg/kg), $M \pm m$

Элемент Element	Год Year	Вид продукции / Product range		
		Молоко Milk	Мясо Meat	Птица Poultry
Pb	2013	0.024 ± 0.014	0.07 ± 0.02	0.027 ± 0.008
	2019	0.016 ± 0.009	0.05 ± 0.01	0.026 ± 0.009
Zn	2013	1.76 ± 0.43	14.7 ± 3.67	9.56 ± 2.9
	2019	2.51 ± 0.61	57.1 ± 14.3	19.6 ± 5.9
Cd	2013	0.003 ± 0.001	0.008 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	2019	0.002 ± 0.001	0.005 ± 0.001	0.02 ± 0.005
As	2013	0.021 ± 0.004	0.001 ± 0.0003	0.001 ± 0.0003
	2019	0.016 ± 0.011	0.003 ± 0.001	0.001 ± 0.0003
Hg	2013	0.021 ± 0.003	0.001 ± 0.0003	0.002 ± 0.0001
	2019	0.029 ± 0.011	0.001 ± 0.0003	0.002 ± 0.0001
Mo	2013	0.04 ± 0.02	0.097 ± 0.03	0.01 ± 0.004
	2019	0.02 ± 0.01	0.037 ± 0.01	0.03 ± 0.009
Cu	2013	0.32 ± 0.03	2.81 ± 0.71	2.62 ± 0.81
	2019	0.64 ± 0.52	1.09 ± 0.31	0.74 ± 0.2
Ni	2013	0.036 ± 0.031	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.03
	2019	0.039 ± 0.021	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.02
Co	2013	0.002 ± 0.001	0.01 ± 0.003	0.001 ± 0.0003
	2019	0.003 ± 0.002	0.007 ± 0.002	0.002 ± 0.0005
Cr	2013	0.021 ± 0.009	0.024 ± 0.005	0.042 ± 0.02
	2019	0.057 ± 0.032	0.093 ± 0.02	0.038 ± 0.01
Sb	2013	0.024 ± 0.012	0.11 ± 0.03	0.13 ± 0.04
	2019	0.093 ± 0.035	0.83 ± 0.02	0.15 ± 0.05
Sr	2013	0.51 ± 0.08	1.94 ± 0.47	2.84 ± 0.85
	2019	0.87 ± 0.11	2.41 ± 0.62	1.68 ± 0.51
Mn	2013	0.05 ± 0.01	0.29 ± 0.07	0.28 ± 0.09
	2019	0.23 ± 0.19	0.51 ± 0.13	0.58 ± 0.18
V	2013	0.014 ± 0.003	0.07 ± 0.02	0.006 ± 0.002
	2019	0.035 ± 0.015	0.04 ± 0.01	0.007 ± 0.002
W	2013	0.097 ± 0.029	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.02
	2019	0.046 ± 0.024	0.21 ± 0.05	0.17 ± 0.05
Ba	2013	0.05 ± 0.003	0.01 ± 0.003	0.15 ± 0.05
	2019	0.33 ± 0.26	0.09 ± 0.023	0.83 ± 0.25
Fe	2013	0.54 ± 0.02	9.5 ± 2.4	9.6 ± 2.9
	2019	2.29 ± 1.35	15.7 ± 3.9	26.8 ± 8.1
n	2013	6	2	2
	2019	7	2	2

Таблица 3 / Table 3

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка (мг/кг; Hg (мкг/кг)) в природной продукции района размещения Белоярской АЭС, $M \pm m$

The content of heavy metals and arsenic in the natural products in the vicinity of the Beloyarsk NPP, mg/kg (Hg, µg/kg), $M \pm m$

Элемент Element	Год Year	Вид продукции / Product range		
		Рыба Milk	Грибы Meat	Ягоды Poultry
Pb	2013	–	0.08 ± 0.05	0.07 ± 0.05
	2019	0.04	0.05 ± 0.03	0.11 ± 0.07
Zn	2013	–	8.11 ± 2.86	2.71 ± 1.54
	2019	10.7	5.61 ± 3.17	1.01 ± 0.45
Cd	2013	–	0.02 ± 0.01	0.021 ± 0.017
	2019	0.062	0.03 ± 0.01	0.019 ± 0.009
As	2013	–	0.011 ± 0.001	0.035 ± 0.013
	2019	0.029	0.012 ± 0.004	0.029 ± 0.014
Hg	2013	–	0.044 ± 0.027	0.047 ± 0.032
	2019	0.09	0.016 ± 0.012	0.019 ± 0.004
Mo	2013	–	0.019 ± 0.016	0.05 ± 0.03
	2019	0.046	0.009 ± 0.049	0.18 ± 0.07
Cu	2013	–	2.44 ± 0.78	1.03 ± 0.58
	2019	0.17	1.61 ± 0.44	0.51 ± 0.23
Ni	2013	–	0.25 ± 0.08	1.11 ± 0.93
	2019	0.014	0.06 ± 0.01	0.26 ± 0.21
Co	2013	–	0.013 ± 0.011	0.036 ± 0.029
	2019	0.0097	0.015 ± 0.002	0.029 ± 0.017
Cr	2013	–	0.13 ± 0.09	0.056 ± 0.034
	2019	0.007	0.12 ± 0.08	0.042 ± 0.027
Sb	2013	–	0.15 ± 0.08	0.64 ± 0.35
	2019	0.097	0.46 ± 0.11	1.08 ± 0.65
Sr	2013	–	0.16 ± 0.05	2.08 ± 1.36
	2019	3.18	0.36 ± 0.03	1.11 ± 0.62
Mn	2013	–	2.16 ± 1.04	5.1 ± 3.9
	2019	0.29	0.88 ± 0.62	1.8 ± 1.4
V	2013	–	0.07 ± 0.04	0.03 ± 0.01
	2019	0.07	0.17 ± 0.09	0.04 ± 0.01
W	2013	–	0.15 ± 0.12	0.22 ± 0.17
	2019	0.12	0.23 ± 0.20	0.55 ± 0.21
Ba	2013	–	0.33 ± 0.25	3.32 ± 2.85
	2019	0.34	0.17 ± 0.06	0.94 ± 0.54
Fe	2013	–	24.3 ± 18.2	14.2 ± 4.6
	2019	11.6	9.15 ± 4.44	6.8 ± 3.7
n	2013	0	3	5
	2019	1	3	6

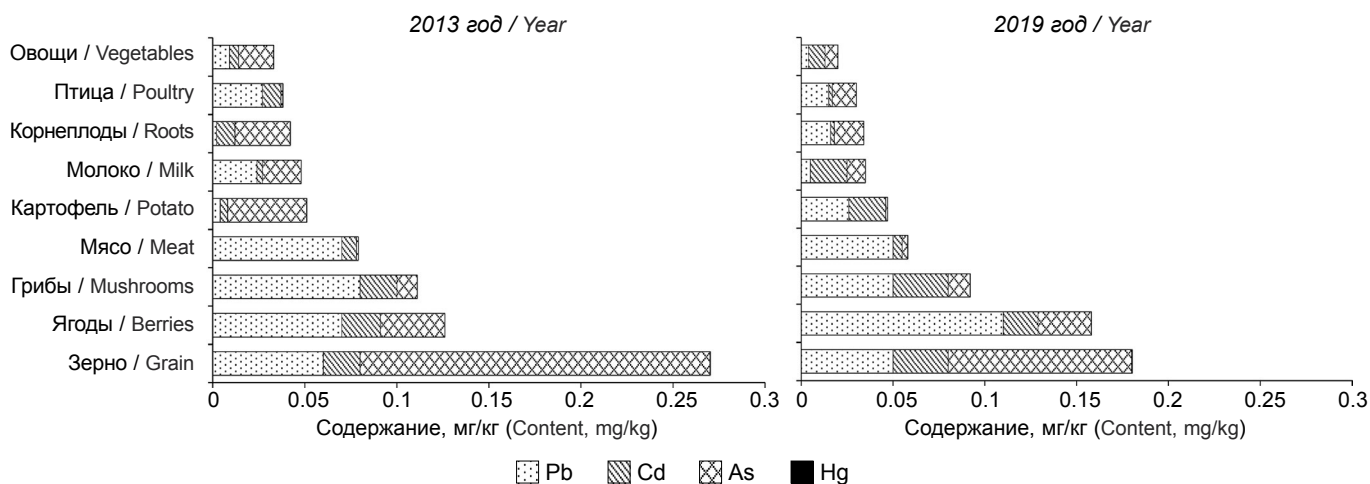
Обсуждение

Анализ полученных результатов показал наиболее высокие концентрации химических элементов в зерне, минимальные — в овощах и молоке. Снижение уровней накопления тяжёлых металлов и мышьяка в пищевой продукции района размещения Белоярской АЭС за весь период наблюдений определяется рядом: зерно > мясо > птица > грибы > ягоды > рыба > картофель > корнеплоды > овощи > молоко. Наиболее токсичные и нормируемые элементы в большей степени накапливаются в зерне, а также в природных пищевых продуктах (см. рисунок). При этом для продукции растениеводства доминирующим поллютантом является мышьяк, а для природных продуктов и продукции животноводства — свинец. По всей видимости, мышьяк в повышенных концентрациях поступает в сельскохозяйственные культуры из почвы при использовании минеральных удобрений, а загрязнение грибов и ягод свинцом обусловлено атмосферными выпадениями выбросов промышленных предприятий и транспорта [19, 20]. Также необходимо отметить, что после начала эксплуатации БН-800 в пищевых продуктах (за исключением ягод) произошло снижение общего содержания наиболее токсичных элементов в 1,1–1,6 раза, что говорит об отсутствии значимого влияния нового энергоблока на дополнительное поступление в окружающую среду поллютантов (см. рисунок).

Санитарно-гигиеническая оценка безопасности пищевой продукции района Белоярской АЭС показала, что содержание наиболее токсичных элементов в продуктах питания (за исключением зерна и ягод) не превышает допустимых уровней, установленных в СанПиН 2.3.2.1078–01. Из четырёх нормируемых поллютантов отмечено превышение содержания норматива по мышьяку (0,2 мг/кг) в зерне: в 2013 г. в 29% проб, в 2019 г. — в 11%. Стоит отметить, что данное превышение норматива не являлось значительным. Так, максимальные уровни содержания мышьяка в зерне за весь период наблюдений находились в пределах 0,22–0,28 мг/кг. Поэтому зерно, не отвечающее требованиям СанПиН 2.3.2.1078–01, может быть использовано на корм скоту в качестве фуража, для которого требования МДУ⁷ по мышьяку являются менее жёсткими (0,5 мг/кг). По нашим результатам, предельные уровни накопления других нормируемых токсикантов в зерне значительно меньше норматива: для свинца — в 3,6 раза (0,14 мг/кг), для кадмия — в 1,3 раза (0,075 мг/кг), для ртути — в 30 раз (0,95 мкг/кг).

Несоответствие продуктов питания природного происхождения требованиям СанПиН 2.3.2.1078–01 отмечено для ягод (черника и малина) по содержанию кадмия: в 2013 г. — 20% проб, в 2019 г. — 17% проб. Однако максимальные уровни содержания данного токсиканта в ягодах (0,04 мг/кг) превышают установленный норматив (0,03 мг/кг) не более чем в 1,3 раза. Такие уровни накопления кадмия в ряде проб дикорастущих ягод можно объяснить повышенными объёмами выбросов данного токсиканта в Уральском регионе в течение последних лет [13]. Поскольку доля проб зерна и ягод, не соответствующих нормативам по содержанию поллютантов, снижается во времени, можно сделать вывод о том, что начало работы реактора БН-800 Белоярской АЭС не привело к значимому увеличению поступления в пищевые продукты не только радионуклидов [17, 18], но также тяжёлых металлов и мышьяка. Это подтверждается и результатами санитарно-гигиенической оценки безопасности наиболее важного для всех категорий населения продукта — молока. Так, за весь период наблюдений максимальное содержание в молоке свинца (0,043 мг/кг) было в 2,3 раза ниже установленного норматива СанПиН (0,1 мг/кг). Наиболее

⁷ Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Агропромиздат; 1989.



Среднее содержание наиболее токсичных элементов в пищевых продуктах района размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг.
Average content of most toxic elements in foodstuffs in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019.

высокая концентрация в пробах молока кадмия составила 0,004 мг/кг, что ниже норматива СанПиН (0,03 мг/кг) в 7,5 раза. Максимальный уровень накопления мышьяка (0,03 мг/кг) в пробах молока оказался в 1,7 раза ниже норматива, а предельный уровень содержания ртути в молоке (0,047 мкг/кг) за шестилетний период наблюдений был на несколько порядков ниже норматива СанПиН. Таким образом, даже в условиях серьёзной техногенной нагрузки пищевые продукты исследуемого промышленного региона Свердловской области по содержанию большинства токсикантов отвечают действующим санитарно-гигиеническим нормативам.

Сравнительный анализ содержания элементов в местных продуктах питания района расположения Белоярской АЭС с данными, полученными в других промышленных областях России, показывает, что по ряду элементов они близки и являются типичными, а по другим — отличаются. Так, в Республике Башкортостан отмечено схожее содержание в картофеле и корнеплодах свинца (0,007–0,01 мг/кг), кадмия (0,008–0,016 мг/кг), меди (0,4–0,76 мг/кг), цинка (2,05–4,09 мг/кг) и марганца (0,8–1,55 мг/кг), но более высокое накопление в продукции растениеводства никеля (0,17–0,21 мг/кг) [5]. Эти данные демонстрируют общие проблемы техногенного загрязнения пищевых продуктов в промышленно развитых регионах России, поскольку тяжёлые металлы и мышьяк являются наиболее значимыми поллютантами в составе выбросов предприятий горно-металлургического комплекса.

В настоящем исследовании оценка содержания токсикантов ограничивалась основными группами местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов, имевшихся в наличии в период отбора проб. Поэтому направлением дальнейшего изучения может стать расширение перечня анализируемой продукции (виды и сорта) и элементного состава. Так, например, учитывая риски превышения в ряде продуктов нормативов СанПиН, необходимо детально изучить накопление мышьяка в различных зерновых продуктах, а кадмия — в дикорастущих ягодах. Перечень анализируемых элементов также может быть расширен за счёт включения в него важных для физиологии человека Li, Se, Cs, Al, F и I.

Заключение

Результаты санитарно-гигиенической оценки безопасности сельскохозяйственной и природной пищевой продукции в районе расположения Белоярской АЭС показывают, что содержание нормируемых токсикантов в большинстве продуктов соответствует установленным предельно допустимым концентрациям, а максимальные уровни накопления мышьяка и кадмия в зерне и ягодах превышают нормативы СанПиН не более чем в 1,4 раза. С учётом сложной экологической обстановки в промышленном регионе Урала мониторинг содержания тяжёлых металлов и мышьяка в местных пищевых продуктах должен быть обязательным при оценке экологической безопасности района размещения промышленных предприятий и Белоярской АЭС.

Литература

(п.п. 1–4, 9, 15, 19, 20 см. References)

1. Даукаев Р.А., Ларионова Т.К., Бакиров А.Б., Степанов Е.Г., Фазлыева А.С., Усманова Э.Н. и др. Гигиеническая оценка содержания микроэлементов в растениеводческой продукции промышленно развитого региона. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(9): 918–24. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-918-924>
2. Донник И.М., Шкуратова И.А., Хасина Э.И., Кривоногова А.С., Исаева А.Г., Лоретц О.Г. Проблемы животноводства в промышленных регионах. *Аграрный вестник Урала*. 2012; (3): 49–51.
3. Вековщина С.А., Клейн С.В., Ханхареев С.С., Макарова Л.В., Мадеева Е.В., Болوشيнова А.А. Оценка качества среды обитания и рисков для здоровья населения г. Закаменска — территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрамомолибденового комбината. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(1): 15–20. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-1-15-20>
4. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., Любашевский Н.М. Особенности радиационной обстановки на Урале. Екатеринбург; 2004.
5. Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Вейхман Г.А., Стенно Е.В., Недошитова А.В. Особенности элементного состава цельной крови неэкспонированного детского населения Западного Урала. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(12): 1408–13. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1408-1413>
6. Уланова Т.С., Зайцева Н.В., Вейхман Г.А., Стенно Е.В., Недошитова А.В., Волкова М.В. Оценка содержания токсичных и эссенциальных элементов в моче детей сельских и промышленных районов Западного Урала. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(11): 1252–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1252-1257>
7. Тихонова Ю.Л., Милушкина О.Ю., Калиновская М.В., Симкалова Л.М. Сравнительный анализ химического загрязнения продуктов питания и показателей здоровья детского населения в Российской Федерации. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНССО*. 2020; (1): 13–8. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-322-1-13-18>
8. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». М.; 2021.

14. Колтик И.И. *Атомные электростанции и радиационная безопасность*. Екатеринбург; 2001.
16. Чеботина М.Я., Гусева В.П., Трапезников А.В. *Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоеме-охладителе АЭС*. Екатеринбург; 2002.
17. Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., Коржавин А.В., Кузнецов В.К., Гешель И.В. Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС. *Радиационная гигиена*. 2020; 13(3): 38–50. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50>
18. Панов А.В., Трапезников А.В., Кузнецов В.К., Коржавин А.В., Исамов Н.Н., Гешель И.В. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021; (3): 146–57. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3110>

References

1. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*. 2015; 1(1): 35–46. <https://doi.org/10.5194/soil-1-35-2015>
2. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17(9): 3099. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099>
3. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K.H. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environ. Int.* 2019; 125: 365–85. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
4. El-Kady A.A., Abdel-Wahhab M.A. Occurrence of trace metals in foodstuffs and their health impact. *Trends Food Sci. Technol.* 2018; 75: 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.001>
5. Daukaev R.A., Larionova T.K., Bakirov A.B., Stepanov E.G., Fazlyeva A.S., Usmanova E.N., et al. Hygienic assessment of the trace elements content in crop production in an industrially developed region. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(9): 918–24. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-918-924> (in Russian)
6. Donnik I.M., Shkuratova I.A., Khasina E.I., Krivonogova A.S., Isaeva A.G., Loretts O.G. Animal problems in industrial areas. *Agrarnyy vestnik Urala*. 2012; (3): 49–51. (in Russian)
7. Vekovshina S.A., Kleyn S.V., Khankhareev S.S., Makarova L.V., Madeeva E.V., Boloshinova A.A. The assessment of environmental quality and risks for the population of the city of Zakamensk – territory of long-term storage of waste of Dzhidinsky tungsten-molybdenum combine. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(1): 15–20. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-1-15-20> (in Russian)
8. Utkin V.I., Chebotina M.Ya., Evstigneev A.V., Lyubashevskiy N.M. *Features of the Radiation Situation in the Urals [Osobennosti radiatsionnoy obstanovki na Urale]*. Ekaterinburg; 2004. (in Russian)
9. Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M., Jacob D.J., Pirrone N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *Environ. Sci. Technol.* 2013; 47(10): 4967–83. <https://doi.org/10.1021/es305071v>
10. Zaytseva N.V., Ulanova T.S., Veykhman G.A., Stenno E.V., Nedoshitova A.V. Features of the elemental composition of whole blood in children's population of the western Ural. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(12): 1408–13. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1408-1413> (in Russian)
11. Ulanova T.S., Zaytseva N.V., Veykhman G.A., Stenno E.V., Nedoshitova A.V., Volkova M.V. Assessment of the content of toxic and essential elements in the urine of children residing in rural and industrial regions in western Urals. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(11): 1252–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1252-1257> (in Russian)
12. Tikhonova Yu.L., Milushkina O.Yu., Kalinovskaya M.V., Simkalova L.M. The comparative analysis of chemical contamination of food and children's health indices in the Russian Federation. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO*. 2020; (1): 13–8. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-322-1-13-18> (in Russian)
13. *State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020»*. Moscow; 2021. (in Russian)
14. Koltik I.I. *Nuclear Power Plants and Radiation Safety [Atomnye elektrostantsii i radiatsionnaya bezopasnost']*. Ekaterinburg; 2001. (in Russian)
15. Panov A., Trapeznikov A., Trapeznikova V., Korzhavin A. Influence of operation of thermal and fast reactors of the Beloyarsk NPP on the radioecological situation in the cooling pond. Part 1: Surface water and bottom sediments. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022; 54(8): 3034–42. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.004>
16. Chebotina M.Ya., Guseva V.P., Trapeznikov A.V. *Plankton and Its Role in the Migration of Radionuclides in the NPP Cooling Pond [Plankton i ego rol' v migratsii radionuklidov v vodoeme-okhladitele AES]*. Ekaterinburg; 2002. (in Russian)
17. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Isamov N.N., Korzhavin A.V., Kuznetsov V.K., Geshel' I.V. Assessment of the impact of the bn-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya gigiena*. 2020; 13(3): 38–50. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50> (in Russian)
18. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Kuznetsov V.K., Korzhavin A.V., Isamov N.N., Geshel' I.V. Radioecological monitoring of agroecosystems in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2021; (3): 146–57. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3110> (in Russian)
19. Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock. *J. Clean. Prod.* 2015; 91: 337–46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.042>
20. Senesil G.S., Baldassarre G., Senesi N., Radina B. Trace elements inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere*. 1999; 39(2): 343–77. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00115-0)