

Повышение уровня контаминации организма человека кадмием при дополнении его рациона семенами подсолнечника

С.Р. Афонькина¹, М.Р. Яхина¹, Э.Н. Усманова¹, Г.Р. Аллаярова¹, М.И. Астахова², Т.К. Ларионова¹, Р.А. Даукаев¹, А.С. Фазлыева¹

¹Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия;

²Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Семена подсолнечника отличаются доступностью, высокой питательной ценностью и относительно низкой стоимостью в течение всего года. Медицинские специалисты и эксперты в области прикладных наук подчёркивают целесообразность включения цельнозернового подсолнечника в рацион питания населения. Вопрос безопасности продукции для потребителя, в частности повышенного содержания кадмия в семенах подсолнечника, периодически рассматривают в средствах массовой информации. Масложировой Союз России не отрицает наличие данной проблемы. При этом отсутствует единая точка зрения среди учёных относительно допустимого содержания тяжёлых металлов в продуктах питания и их влияния на человека и пищевую цепь в целом.

Цель. Оценить вклад кадмия в общую токсическую нагрузку от тяжёлых металлов, содержащихся в семенах подсолнечника, а также определить потенциальные риски для здоровья при их регулярном потреблении с использованием метода имитационного моделирования рациона.

Материалы и методы. Проведено исследование продуктов питания регионального происхождения и проб воды из 27 источников централизованного водоснабжения с территорий проживания участников эксперимента. Собраны и обработаны анкеты воспроизведения семидневного рациона питания и потребления воды 160 физически здоровых респондентов фертильного возраста. Кроме того, выполнен химический анализ 26 образцов грызовых семян подсолнечника на содержание кадмия и других токсичных элементов.

Результаты. Допустимая концентрация токсичных элементов в семенах подсолнечника превышена только по кадмию и составляет $0,23 \pm 0,06$ мг/кг. При потреблении семян в количестве, рекомендуемом нутрициологами (50 г в день), в организм поступает от 0,007 до 0,009 мг кадмия, что в два раза превышает поступление с пищей и водой $0,0033 \pm 0,0012$ и $0,0007 \pm 0,0003$ мг соответственно.

Заключение. Имитационное моделирование включения в рацион питания 50 г семян подсолнечника грызовых сортов позволяет спрогнозировать уровень перорального поступления кадмия, который в среднем составляет 31,4% предельно допустимого суточного поступления, принятого в Российской Федерации.

Ключевые слова: кадмий; рацион питания; семена подсолнечника; накопление в растениях, животных и человеке; границы безопасности.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Афонькина С.Р., Яхина М.Р., Усманова Э.Н., Аллаярова Г.Р., Астахова М.И., Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Фазлыева А.С. Повышение уровня контаминации организма человека кадмием при дополнении его рациона семенами подсолнечника // Экология человека. 2024. Т. 31, № 12. С. XX–XX. DOI: 10.17816/humeco643208 EDN: EMTGYU

Рукопись поступила: 19.12.2024 Рукопись одобрена: 23.05.2025 Опубликовано online: 09.06.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Increasing the level of contamination of the human body with cadmium when supplementing its diet with sunflower seeds

Svetlana R. Afonkina¹, Margarita R Yakhina¹, Elsa N. Usmanova¹, Guzel A. Allayarova¹, Margarita I. Astakhova², Tatiana K. Larionova¹, Rustem A. Daukaev¹, Anna S. Fazlieva¹

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia;

² Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Sunflower seeds are inexpensive, nutritious, and readily available at any time of the year. Doctors and specialists in the scientific and applied field emphasize the expediency of introducing whole-grain sunflower seeds into the diet of the population. On the issue of product safety for consumers, the media periodically raises the issue of high concentrations of cadmium in sunflower seeds, which is not denied by the Fat and Oil Union of Russia. It is not unimportant that there is no consensus among scientists on the issue of the safe content of heavy metals for humans and their food chain components.

AIM: To evaluate the contribution of cadmium to the total toxic load from heavy metals (Pb, Hg, As, Cd) in sunflower seeds and identify potential health risks from their regular consumption by diet simulation.

METHODS: Data source: 1) studies of food products of regional origin; water samples from 27 centralized water supply sources from the territories of residence of the participants in the experiment. 2) Questionnaires for reproducing the seven-day diet and drinking habits of 160 physically healthy, fertile-age respondents. 3) Chemical analysis of 26 samples of rodent sunflower seeds for the content of cadmium and other toxic elements.

RESULTS: All the results were obtained by the team of authors from the Ufa Research Institute of Occupational Medicine and Human Ecology. The permissible levels of toxic elements in sunflower seeds are exceeded only by the cadmium content of 0.23 ± 0.06 mg/kg. When sunflower seeds are consumed within the limits recommended by nutritionists of 50 g per day, 0.007–0.009 mg of cadmium enters the body, which is twice as high as food intake of 0.0033 ± 0.0012 mg and water intake of 0.0007 ± 0.0003 mg.

CONCLUSION: Simulation modelling of dietary supplementation with 50 grams of sunflower seeds allows predicting a level of risk of oral intake of cadmium with sunflower seeds, on average – 31.4% of the safe level accepted in the Russian Federation.

Keywords: cadmium; diet; *helianthus seminibus*; accumulation in plants, animals and humans; safety margins.

TO CITE THIS ARTICLE:

Afonkina SR, Yakhina MR, Usmanova EN, Allayarova GA, Astakhova MI, Larionova TK, Daukaev RA, Fazlieva AS. Increasing the level of contamination of the human body with cadmium when supplementing its diet with sunflower seeds. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(12):XXX–XXX. DOI: 10.17816/humeco643208 EDN: EMTGYU

Submitted: 19.12.2024 Accepted: 23.05.2025 Published online: 09.06.2025

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

В трофической нише человека подсолнечник уступает по значению злаковым культурам, однако играет важную роль в обеспечении нутриентами. Семена подсолнечника содержат широкий спектр фитохимических веществ и минеральных элементов, причём по их концентрации и биодоступности для организма человека они нередко превосходят орехи [1, 2]. Их регулярное потребление способствует защите кожи от действия свободных радикалов [3, 4], снижению риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, нормализации содержания холестерина, уровня артериального давления и контролю за течением сахарного диабета 2 типа [5–7]. Введение в ежедневный рацион 30 г семян подсолнечника способствует снижению концентрации глюкозы крови, что связано с содержанием хлорогеновой кислоты [7]. Указанное количество нежареных очищенных семян обеспечивают более 40% рекомендуемой суточной потребности взрослого человека в фосфоре, меди, селене, витаминах Е и В5, 30% — в марганце, 17–18% — в витаминах В9 и РР, и около 10% — в калии и магнии¹.

Наряду с пищевой ценностью продукта необходимо учитывать и показатели пищевой безопасности для человека, в первую очередь по содержанию кадмия, свинца, ртути и мышьяка, токсическое действие которых связано с их способностью комплексообразования с SH-группами белков. Накопление этих элементов сопряжено с риском биоаккумуляции и биомagnификации в органах и тканях при их избыточном поступлении, что может приводить к нарушению физиолого-биохимических механизмов защиты от токсического воздействия [8].

Россия занимает лидирующие позиции в мировом производстве семян подсолнечника и подсолнечного масла, обеспечивая валовой сбор в объёме 5,65 млн на территории, составляющей 22,9% всех мировых посевных площадей [9]. Периодически в средствах массовой информации поднимают вопрос о высоких концентрациях тяжёлых металлов в семенах подсолнечника, реализуемых через торговые сети, чаще всего речь идёт о кадмии, содержание которого может превышать 0,2 мг/кг.

Подавление активности липазы в семенах подсолнечника происходит при контаминации кадмием в концентрации, составляющей 0,2 предельно допустимой концентрации (ПДК) [10]. Ионы ртути в количестве 0,25 ПДК снижают активность кислой и щелочной липазы на 42,4–45,8%, а при концентрации, достигающей 1,0 ПДК, ферментативная активность почти полностью ингибируется. В сравнении с кадмием и ртутью ионы свинца обладают меньшей ингибирующей способностью: при содержании 1,0 ПДК активность липазы снижается в 1,7 раза [11].

При равных агротехнологических условиях семена подсолнечника накапливают кадмий в больших количествах по сравнению с большинством других зерновых и масличных культур. При суточном потреблении 28,35 г (одна унция) на протяжении 48 нед. поступление кадмия не превышает установленного Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) допустимого недельного лимита в 490 мкг и не влияет отрицательно на здоровье добровольцев [12].

В популяциях, где рис является основным продуктом питания, отмечают повышенную восприимчивость к токсическим эффектам кадмия. В эксперименте на лабораторных крысах показано, что введение в рацион ядер подсолнечника снижает усвоение кадмия за счёт высокого содержания кальция, железа и цинка [13]. Положительное влияние умеренного избытка некоторых микроэлементов на снижение всасывания и накопления кадмия доказано также в исследованиях с участием японских перепелов [14].

Среди тяжёлых металлов кадмий является одним из наиболее распространённых загрязнителей окружающей среды крупных городов. Он относится к кумулятивным ядам со сроками выведения 25–30 лет [15].

С точки зрения продовольственной безопасности концентрация кадмия является важным параметром для мониторинга, поскольку пищевые продукты основной источник поступления кадмия в организм человека². Допустимое месячное потребление кадмия, установленное экспертами ВОЗ, составляет 25 мкг на 1 кг массы тела человека.

Абсорбция кадмия из желудочно-кишечного тракта составляет 5–10%, однако, попадая в системный кровоток и достигая печени, гепатоциты его поглощают, что сопровождается активацией синтеза металлотионеина. В результате образуется комплекс — кадмий–металлотионеин (Cd-MT), который с током крови поступает в почки, где вследствие высокой

¹ Sunflower seed nutrition: calories, carbs, GI, protein, fiber, fat; [около 14 страниц]. В: Food Struct [Internet]. Boston: FoodStruct, 2016–2024. Режим доступа: <https://foodstruct.com/food/sunflower-seed> Дата обращения: 16.08.2024.

² Commission Regulation (EC) No. 1831/2006. Commission Directive of 19 December 2006 “Setting maximum levels for certain contaminants in food stuffs”. Official Journal of the European Communities. L364:5–24. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF> Дата обращения: 16.08.2022.

реабсорбционной способности проксимальных канальцев накапливается в их клетках и со временем вызывает повреждение тканей [16, 17].

При моделировании интоксикации крыс солями кадмия, проведенном токсикологами Уфимского научно-исследовательского института медицины труда и экологии человека, установлено, что при 10-кратном превышении безопасной дозы наибольшее накопление металла наблюдают уже не в почках, а в печени [18].

Основной механизм токсического действия кадмия — это замещение других двухвалентных катионов, преимущественно в составе белковых молекул. В процессе эволюции растения сформировали механизмы защиты, направленные на сохранение функционирования жизненно важных метаболических путей, однако у подсолнечника кадмий преодолевает эти барьеры, проникая в клетки по тем же транспортным путям, что и микроэлементы. Это приводит к нарушению механизмов переноса и распределения питательных веществ. Одним из защитных механизмов растения служит депонирование токсиканта в семенах, что снизит нагрузку на корневую систему и минимизирует повреждение её клеток. Экспериментально установлено, что концентрация кадмия в семядолях может достигать 10–20 мкг/г. Таким образом, потребление всего 7 г семян может обеспечить поступление ПДК кадмия — в 70 мкг, учитывая массу тела 70 кг. Кроме того, в семенах подсолнечника наблюдают значительный дисбаланс металлов, проявляющийся не только в изменении содержания меди, марганца и железа, но и в нарушении их распределения в семенах. Поскольку семядоли составляют основную часть, потребляемую в пищу, подсолнечник, выращенный в почвах с уровнем загрязнения, аналогичным использованному в эксперименте, представляет потенциальную угрозу для здоровья человека [19].

По степени биодоступности основных и токсичных металлов, содержащихся в съедобных частях орехов и семян подсолнечника, ртуть отличается наименьшей диализируемостью — не более 3,8%. Кадмий, как и большинство микроэлементов, характеризуется умеренной доступностью, в то время как транслокация мышьяка варьирует в широком диапазоне — от 28 до 75%. Установлено, что степень биодоступности коррелирует с составом микронутриентов: содержание жира снижает диализируемость металлов, тогда как углеводы, напротив, повышают её. Белок и пищевые волокна не влияют на биодоступность металлов [1, 20].

С увеличением знаний о биологической ценности подсолнечника его семена занимают всё более значимое место в рационе человека. Вместе с тем в научной литературе подсолнечник всё чаще рассматривают как растение-аккумулятор кадмия, способное депонировать этот ксенобиотик в семенах. Выводы общественных организаций нашли подтверждение в результатах анализа, проведенного специалистами испытательной лаборатории Омского филиала ФГБУ «Центр оценки качества зерна». Согласно полученным данным, среднее содержание кадмия в семенах подсолнечника, поступающих в продажу через торговые сети с наличием документов сертификации или декларирования, в 24% образцов превышало концентрацию 0,1 мг/кг³. Аналогичных подходов к оценке безопасности продукции придерживаются: независимый центр АНО «Союзэкспертиза» Торгово-промышленной Палаты Российской Федерации, общество защиты прав потребителей «Общественный контроль»⁴. В то же время сегодня действуют «Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)»⁵, в которых ПДК кадмия для семян подсолнечника составляет 0,2 мг/кг. Завышение этого порогового значения объясняется Масложировым Союзом России как: «...объективная ситуация с данным видом сырья на рынке России»⁴. В то же время в основополагающем документе — Техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011) ПДК кадмия в семенах масличных культур не установлена.

³ Содержание кадмия как показатель безопасности масличных культур; [около 2 страниц]. В: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса» [интернет]. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса», 2017–2024. Режим доступа: <https://agbz.ru/articles/soderjanie-kadmiya-kak-pokazatel-bezopasnosti-maslichnyih-kultur/> Дата обращения: 16.08.2024.

⁴ Сколько кадмия может быть в семечке?; [около 2 страниц]. В: RosInvest.Com; 2012–2024. Режим доступа: <https://rosinvest.com/novosti/940572> Дата обращения: 16.08.2024.

⁵ Решение Комиссии Таможенного союза № 299 от 28 мая 2010 г. «О применении санитарных мер в Евразийском экономическом союзе». Режим доступа: <https://www.alta.ru/tamdoc/10sr0299/> Дата обращения: 12.11.2024.

Согласно данным ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт жиров», при анализе 92 образцов семян подсолнечника, собранных в различных регионах России, выявлен значительный разброс концентраций кадмия, зависящий от географического происхождения сырья⁴.

Анализ поведения тяжёлых металлов в почвах придорожных агроценозов подсолнечника был предметом исследований, проведённых в Воронежском государственном аграрном университете. Установлено, что степень транслокации свинца и кадмия в подсолнечник коррелирует с содержанием их подвижных форм в почв. На уровень накопления металлов влияют такие факторы, как удалённость от автодорог, состав и дозы агрохимикатов, погодные условия и особенности технологии выращивания. В зависимости от сочетания этих условий содержание свинца в растениях превышало 2,9–5,3 раза, кадмия — в 1,4–3,2 раза [21]. При этом установлено, что переход кадмия из почвы в соцветия подсолнечника не зависит от её подтипа [22].

ЦЕЛЬ

Оценить вклад кадмия в общую токсическую нагрузку от тяжёлых металлов, содержащихся в семенах подсолнечника, а также определить потенциальные риски для здоровья при их регулярном потреблении с использованием метода имитационного моделирования рациона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования приобретены семена подсолнечника 10 торговых марок, а также отобраны 16 проб семян в фазе хозяйственной спелости с пригородных участков промышленно развитого города Уфа (по 500 г с каждой точки). Освобождённые от лузги измельчённые семена весом около 0,5 г помещали в тефлоновые стаканы с 8 мл концентрированной азотной кислоты [65%, для анализа, Merck KGaA (Германия) и EMD Millipore Corporation (Канада)] и подвергали микроволновому разложению в соответствии с рекомендациями производителя микроволновой системы Speedwave Xpert® (Berghof, Германия). Количественное определение содержания кадмия и свинца в образцах проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией в графитовой печи; определение мышьяка — методом атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией [AA240Z, AA240FS (Varian, Австралия)]. Общую ртуть определяли атомно-абсорбционным методом на анализаторе ртути РА-915М с использованием приставки ПИРО-915+ (Люмэкс, Россия).

Пероральное поступление кадмия рассчитывали с учётом среднестатистических региональных значений его содержания в продуктах питания и питьевой воде, характерных для зоны проживания респондентов. Данные получены на основании многолетних наблюдений испытательного центра, действующего при ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека».

Моделирование дополнительной контаминации кадмием при введении семян подсолнечника в рацион осуществляли на основании усреднённых результатов собственных исследований, пересчитанных на 50 г продукта — количество, рекомендованное к употреблению специалистами факультета пищевых наук и технологий университета Касетсарта (Таиланд) [23].

КРИТЕРИИ СООТВЕТСТВИЯ

Расчёт перорального поступления кадмия в течение недели произведён с письменного согласия 160 чел., данные которых соответствуют условиям:

- состояние здоровья — I группа;
- фертильный возраст, соответствующий гендеру (15–65 лет);
- нормальный индекс массы тела (индекс Кетле) — 20,0–25,9;
- масса тела, приближённая к расчётной по требованиям ВОЗ — 70 кг;
- отсутствие семян подсолнечника в рационе в течение исследуемой недели.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ

Аналитическая работа выполнена в аккредитованной лаборатории испытательного центра ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» и зарегистрирована в Реестре баз данных № 2024624090 Федеральной службы по интеллектуальной собственности^{6,7}.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

При статистической обработке материала (расчёте средних показателей, стандартного отклонения коэффициента вариации) использованы программные пакеты Microsoft Excel® (Microsoft, Соединённые Штаты Америки).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рекогносцировочный анализ семян подсолнечника стал результатом ответа на вопрос, периодически поднимаемый в средствах массовой информации, о повышенных уровнях их загрязнения кадмием.

На первом этапе исследования осуществлён количественный анализ содержания токсичных элементов в семенах подсолнечника производственной расфасовки, предназначенного для непосредственного употребления в пищу, для чего приобретён весь ассортимент грызовых семян в крупном супермаркете (табл. 1).

Во всех образцах ядер семян подсолнечника, полученных от разных товаропроизводителей, содержание мышьяка и ртути было ниже предела обнаружения применяемых методов анализа. Количественное содержание свинца не превышает 0,3 ПДК. Концентрация кадмия в семенах составила до 0,1 мг/кг в трёх пробах, до 0,2 мг/кг — в одной и до 0,3 мг/кг — в пяти. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при ограниченной выборке прослеживается высокая вероятность превышения нормативов по кадмию при регулярном потреблении семечек, что создаёт потенциальный риск для здоровья человека.

Кроме того, провели анализ семян подсолнечника с сельскохозяйственных полей и частных подворий, примыкающих к городу-миллионеру Республики Башкортостан.

Результат атомно-абсорбционного исследования 16 образцов семян подсолнечника, выращенного на территории Центрального промышленного района Башкирии представлен в табл. 2.

В этих образцах содержание мышьяка не превышало 0,2 ПДК. Зафиксирован единичный случай превышения ПДК по ртути в семенах, собранных вблизи железной дороги.

Повышенные концентрации свинца выявлены в семечках, отобранных на территориях с интенсивным автомобильным движением; превышение ПДК зафиксировано в пробах, собранных вдоль автомагистрали. В этих же образцах отмечены максимальные значения содержания кадмия.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, подсолнечник однозначно следует отнести к растениям-аккумуляторам кадмия. В условиях антропогенного загрязнения среды концентрации кадмия, ранее рассматривавшиеся как предельно допустимые, сегодня агропромышленными структурами воспринимаются фактически как фоновые. Отсутствие единых подходов к определению безопасного содержания кадмия в семенах подсолнечника обосновывает необходимость оценки потенциального вклада перорального поступления данного токсиканта в общий уровень экспозиции человека.

С этой целью произведён анализ 7-дневного питания и потребления жидкости 160 респондентов: спортсменов, тренеров и учителей физкультуры, относящихся к I группе здоровья, репродуктивного возраста (35 ± 14 лет), с нормальным индексом массы тела ($24,7 \pm 3,7$) и средней массой тела ($69,4 \pm 12,1$ кг).

Оценка 1120 рационов респондентов из отобранной группы показала, что при среднем потреблении 1611 ± 638 пищи и 986 ± 237 г водопроводной воды, супов и напитков, в организм здоровых жителей Республики Башкортостан поступает кадмия в количестве 0,004 мг (в том

⁶ Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624090/ 12.09.2024. Бюл. № 9. Яхина М.Р., Валеев Т.К., Зеленковская Е.Е., и др. Структура фактического недельного рациона на примере населения территорий Республики Башкортостан с различной экономической специализацией. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_69586451_36328408.PDF Дата обращения: 12.09.2024.

⁷ Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624203/ 26.09.2024. Бюл. № 10. Яхина М.Р., Валеев Т.К., Зеленковская Е.Е., и др. Количественная оценка нутриентов и токсичных элементов в рационе питания работников непроизводственной сферы. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_73233368_16143777.PDF Дата обращения: 12.09.2024.

числе с пищей и водой — $0,0033 \pm 0,0012$ и $0,0007 \pm 0,0003$ мг соответственно). Согласно расчётам Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, это значение не превышает реперной дозы кадмия $0,000\ 55$ мг/кг в сутки [24].

На этом фоне становится очевидной значимость повышения поступления кадмия в организм человека при употреблении семян подсолнечника. Так, всего 50 г семян содержат кадмий в среднем в 2 раза больше ($\bar{X}_{\text{грызовых сортов}}=0,007$ мг; $\bar{X}_{\text{проанализированных проб}}=0,009$ мг), чем его поступает ежедневно с пищей и водой (0,004 мг) у участников анкетно-экспериментальной части исследования, потреблявших в среднем 1611 и 986 г пищи и воды в сутки соответственно.

Определение референтной дозы для суперэкоотоксикантов (таких как кадмий) производится с учётом их влияния на репродуктивную систему, а также нейротоксических, гематологических, цитотоксических, цитогенетических и иммунотоксических эффектов. В случае кадмия установлено, что он накапливается в различных тканях и органах, обладающих низкой способностью к метаболизму и детоксикации [25].

Пищевые продукты являются основным источником поступления кадмия в организм до 90%. Его уровень выведения низкий (около 0,001%, преимущественно с мочой), что требует строгого нормирования поступления. Однако вопрос о ПДК кадмия остаётся дискуссионным, и в научной среде наблюдают существенные расхождения (табл. 3).

ОГРАНИЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационная модель построена на рационе здоровых респондентов с адекватным пищевым поведением, а расчёты содержания кадмия в пищевых продуктах — на основе усреднённых региональных значений. Это свидетельствует о том, что в реальных условиях при наличии дополнительных источников загрязнения фактическая дозовая нагрузка может быть значительно выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подсолнечник обладает высокой биологической и пищевой ценностью, что улучшает качество питания сельскохозяйственных животных и человека без применения синтетических добавок. В то же время растение характеризуется выраженной способностью накапливать кадмий, преимущественно в его репродуктивной части, что представляет опасность при его возделывании в условиях антропогенного загрязнения.

По результатам аналитического этапа исследования установлено, что в 40% случаев в продажу поступают семена подсолнечника, не соответствующие гигиеническим нормативам по содержанию кадмия. Наибольшая степень контаминации тяжёлыми металлами зафиксирована у масличных сортов, выращенных вблизи транспортной инфраструктуры.

Мы смоделировали ситуацию повышения содержания кадмия в рационе питания респондентов при добавлении биологически обоснованного количества семян подсолнечника исследованных образцов. Следует отметить, что при употреблении всего с 50 г цельных семян подсолнечника возможное поступление кадмия составляет от 0,0001 мг в сутки и выше, что само по себе превышает ПДК.

Результаты имитационного моделирования показали, что при включении семян подсолнечника в рацион суточное поступление кадмия может достигать $0,011 \pm 0,005$ мг, что составляет около 15,7% ПДК по данным ВОЗ и в среднем 31,4% значения, принятого в Российской Федерации.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Р. Афонькина — концепция и дизайн исследования, сбор данных; М.Р. Яхина — концепция и дизайн исследования, анализ данных, написание текста рукописи; Э.Н. Усманова, Г.Р. Аллаярова, М.И. Астахова — анализ данных; Т.К. Ларионова — написание текста рукописи; Р.А. Даукаев — редактирование текста рукописи; А.С. Фазлыева — сбор данных. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источник финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author's contribution. Afonkina S.R., Yakhina M.R. - concept and design of the study; Afonkina S.R., Fazlyeva A.S. - data collection; Yakhina M.R., Allayarova G.R., Astakhova M.I., Usmanova E.N. - data processing; Yakhina M.R., Larionova T.K. - text writing; Daukaev R.A. - editing; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article - all authors.

Ethics approval. Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Moreda-Piñeiro J, Herbello-Hermelo P, Domínguez-González R, et al. Bioavailability assessment of essential and toxic metals in edible nuts and seeds. *Food Chemistry*. 2016;205:146–154. doi: [10.1016/j.foodchem.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.006)
2. Bielecka J, Puscion-Jakubik A, Markiewicz-Żukowska R, et al. Assessment of the safe consumption of nuts in terms of the content of toxic elements with chemometric analysis. *Nutrients*. 2021;13(10):3606. doi: [10.3390/nu13103606](https://doi.org/10.3390/nu13103606) EDN: [KXRVSJ](https://www.edn.net/KXRVSJ)
3. Adeleke BS, Babalola OO. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. *Food Science & Nutrition*. 2020;8(9):4666–4684. doi: [10.1002/fsn3.1783](https://doi.org/10.1002/fsn3.1783) EDN: [GIXDYF](https://www.edn.net/GIXDYF)
4. Shikh EV, Makhova AA, Pogozheva AV, Elizarova EV. The importance of nuts in the prevention of various diseases. *Problems of Nutrition*. 2020. 89(3):14–21. doi: [10.24411/0042-8833-2020-10025](https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10025) EDN: [DJJBOF](https://www.edn.net/DJJBOF)
5. Nunes DO, Marques VB, Almenara CCP, et al. Linoleic acid reduces vascular reactivity and improves the vascular dysfunction of the small mesentery in hypertension. *Journal of Nutritional Biochemistry*. 2018;62:18–27. doi: [10.24411/0042-8833-2020-10025](https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10025) EDN: [DJJBOF](https://www.edn.net/DJJBOF)
6. Richmond K, Williams S, Mann J, et al. Markers of cardiovascular risk in postmenopausal women with type 2 diabetes are improved by the daily consumption of almonds or sunflower kernels: a feeding study. *ISRN Nutrition*. 2013;2013:1–9. doi: [10.5402/2013/626414](https://doi.org/10.5402/2013/626414)
7. Jiang R, Jacobs DR, Mayer-Davis E, et al. Nut and seed consumption and inflammatory markers in the multi-ethnic study of atherosclerosis. *American Journal of Epidemiology*. 2005;163(3):222–231. doi: [10.1093/aje/kwj033](https://doi.org/10.1093/aje/kwj033) EDN: [IKNXGJ](https://www.edn.net/IKNXGJ)

8. Pestrova NYu, Oparina SN. The influence of accumulation of lead ions on the reproduction of plants on the example of oilseed sunflower (*Helianthus Annus L.*). *International Research Journal*. 2016;(7-3):19–21. doi: 10.18454/IRJ.2016.49.044 EDN: WEYKNL
9. Belikina AV, Obedkova LV, Opejkina TV. The importance of oilseed production for ensuring food security of the country. *Nauchno-agronomicheskij zhurnal*. 2018;(2):68–70. (In Russ.) EDN: VOXDYX
10. Dyachenko YuA, Tsikunib AD. Analytical importance of determination of lipase activity for the express analysis of contamination by heavy metals of sunflower seeds. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016; (3):218–222. doi: [10.20914/2310-1202-2016-3-218-222](https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-3-218-222) EDN: [XWNKFV](https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-3-218-222)
11. Dyachenko YuA, Tsikunib AD. Lipase activity as factor of high quality and ecological purity of sunflower seeds. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;44(1):118–123. doi: 10.21179/2074-9414-2017-1-118-123
12. Reeves PG, Nielsen EJ, O'Brien-Nimons C, Vanderpool RA. Cadmium bioavailability from edible sunflower kernels: a long-term study with men and women volunteers. *Environmental Research*. 2001;87(2):81–91. doi: [10.1006/enrs.2001.4289](https://doi.org/10.1006/enrs.2001.4289)
13. Reeves PG, Chaney RL. Mineral status of female rats affects the absorption and organ distribution of dietary cadmium derived from edible sunflower kernels (*Helianthus annuus L.*). *Environmental Research*. 2001;85(3):215–225. doi: [10.1006/enrs.2000.4236](https://doi.org/10.1006/enrs.2000.4236)
14. Jacobs RM, Lee Jones AO, Fox MRS, Fry BE. Retention of dietary cadmium and the ameliorative effect of Zinc, Copper, and Manganese in Japanese quail. *The Journal of Nutrition*. 1978;108(1):22–32. doi: [10.1093/jn/108.1.22](https://doi.org/10.1093/jn/108.1.22)
15. Stosman KI, Sivac KV. Immunotoxic effect of acute cadmium sulfate exposure in rats. *Medline.ru. Rossijskij Biomeditsinskij zhurnal*. 2020;21:166–175. EDN: LBUDOM
16. Fazlieva AS, Daukaev RA, Karimov DO. Influence of cadmium on population health and methods for preventing its toxic effects. *Occupational health and human ecology*. 2022;(1):220–235. doi: 10.24411/2411-3794-2022-10115 EDN: GLPABT
17. Ghumman NA, Naseem N, Latif W, Nagi AH. Dose-dependent morphological changes of cadmium chloride on kidney of albino mice. *Biomedica*. 2018;34(4):253–258.
18. Fazlyeva AS, Usmanova EN, Karimov DO, et al. Accumulation of cadmium in living systems as an environmental pollutant problem. *Medicina truda i jekologija cheloveka*. 2018;(3):47–51. EDN: MGGHBR
19. Pessôa GS, Lopes Júnior CA, Madrid KC, Arruda MAZ. A quantitative approach for Cd, Cu, Fe and Mn through laser ablation imaging for evaluating the translocation and accumulation of metals in sunflower seeds. *Talanta*. 2017;167:317–324. doi: [10.1016/j.talanta.2017.02.029](https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.02.029)
20. Sterckeman T, Thomine S. Mechanisms of Cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2020;39(4):322–359. doi: [10.1080/07352689.2020.1792179](https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179) EDN: [YFIGDU](https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179)
21. Vysotskaya EA, Baryshnikova OS. Analysis of mobile forms of heavy metals in soils roadside sunflower agroecosystems. *Agroecoinfo*. 2021;(3):19. EDN: YEEHRR
22. Troc NM. *Translocation of heavy metals in agricultural landscapes of the Samara region under the influence of natural and anthropogenic factors* [dissertation]. Samara; 2018. Available from: <https://elibrary.ru/jfmuo1> (In Russ.) EDN: JFMUOL
23. Guo S, Ge Y, Na Jom K. A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common sunflower seed and sprouts (*Helianthus annuus L.*). *Chemistry Central Journal*. 2017;11(1):95. doi: [10.1186/s13065-017-0328-7](https://doi.org/10.1186/s13065-017-0328-7) EDN: [LXTGDL](https://doi.org/10.1186/s13065-017-0328-7)
24. Shur PZ, Fokin VA, Novosyolov VG. To the issue of assessing the acceptable daily intake of cadmium with food. *Public Health and Life Environment - Ph&Le*. 2015;(12):30–33. EDN: VBEVTD
25. Fazlieva AS, Daukaev RA, Karimov DO, et al. Public health risks caused by contamination of local food products. *Health Risk Analysis*. 2022;(4):100–108. doi: [10.21668/health.risk/2022.4.09](https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.4.09) EDN: [XWTGVU](https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.4.09)

ОБ АВТОРАХ/ AUTHORS' INFO

Автор, ответственный за переписку:	
* Афонкина Светлана Разифовна , канд. хим. наук; адрес: Россия, 450106, Уфа, ул. Степана Кувыкина, д. 94;	* Svetlana R. Afonkina , Cand. Sci. (Chemistry); address: 94 Stepan Kuvykin st, Ufa, Russia, 450106;

ORCID: 0000-0003-0445-9057; eLibrary SPIN: 3521-1536; e-mail: svetafonk1@mail.ru	ORCID: 0000-0003-0445-9057; eLibrary SPIN: 3521-1536; e-mail: svetafonk1@mail.ru
Соавторы:	
Яхина Маргарита Радиковна , канд. биол. наук, доцент; ORCID: 0000-0003-2692-372X; eLibrary SPIN: 5925-2360; e-mail: zmr3313@yandex.ru	Margarita R. Yakhina , Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor; ORCID: 0000-0003-2692-372X; eLibrary SPIN: 5925-2360; e-mail: zmr3313@yandex.ru
Усманова Эльза Наилевна ; ORCID: 0000-0002-5455-6472; eLibrary SPIN: 9088-3293; e-mail: 4usmanova@gmail.com	Elsa N. Usmanova ; ORCID: 0000-0002-5455-6472; eLibrary SPIN: 9088-3293; e-mail: 4usmanova@gmail.com
Аллаярова Гузель Римовна , канд. биол. наук; ORCID: 0000-0003-0838-3598; eLibrary SPIN: 3704-1010; e-mail: ufa.lab@yandex.ru	Guzel R. Allayarova , Cand. Sci. (Biology); ORCID: 0000-0003-0838-3598; eLibrary SPIN: 3704-1010; e-mail: ufa.lab@yandex.ru
Астахова Маргарита Ивановна , канд. мед. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-8750-3852; eLibrary SPIN: 4405-3181; e-mail: Astachova_mi@mail.ru	Margarita I. Astakhova , MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor; ORCID: 0000-0002-8750-3852; eLibrary SPIN: 4405-3181; e-mail: Astachova_mi@mail.ru
Ларионова Татьяна Кенсариновна , канд. биол. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-9754-4685 ; eLibrary SPIN: 5305-0589; e-mail: larionovatk@yandex.ru	Tatyana K. Larionova , Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor; ORCID: 0000-0001-9754-4685; eLibrary SPIN: 5305-0589; e-mail: larionovatk@yandex.ru
Даукаев Рустем Аскарлович , канд. биол. наук; ORCID: 0000-0002-0421-4802; eLibrary SPIN: 4086-7132; e-mail: ufa.lab@yandex.ru	Rustem A. Daukaev , Cand. Sci. (Biology); ORCID: 0000-0002-0421-4802; eLibrary SPIN: 4086-7132; e-mail: ufa.lab@yandex.ru
Фазлыева Анна Сергеевна ; ORCID: 0000-0002-0037-6791; eLibrary SPIN: 6215-4556; e-mail: nytik-21@yandex.ru	Anna S. Fazlieva ; ORCID: 0000-0002-0037-6791; eLibrary SPIN: 6215-4556; e-mail: nytik-21@yandex.ru

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Количественное содержание токсичных элементов в семенах подсолнечника, поставляемых производителями в торговую сеть

Table 1. The content of toxic elements in sunflower seeds supplied by manufacturers to the retail network

Образец	Содержание, мг/кг			
	Pb	Cd	As	Hg
№ 1	0,23±0,08	0,013±0,004	<0,01	<0,0025
№ 8	0,28±0,10	0,027±0,008	<0,01	<0,0025
№ 7	0,25±0,09	0,034±0,010	<0,01	<0,0025
№ 4	0,33±0,12	0,091±0,027	<0,01	<0,0025
№ 5	0,03±0,01	0,184±0,055	<0,01	<0,0025
№ 10	<0,02	0,193±0,058	<0,01	<0,0025
№ 2	<0,02	0,203±0,061	<0,01	<0,0025
№ 3	<0,02	0,250±0,075	<0,01	<0,0025
№ 9	<0,02	0,253±0,076	<0,01	<0,0025
№ 6	<0,02	0,295±0,089	<0,01	<0,0025

Таблица 2. Вариационно-статистические показатели содержания токсикантов в семенах подсолнечника

Table 2. Variational and statistical indicators of the content of toxicants in sunflower

Образец	Содержание, мг/кг			
	Pb	Cd	As	Hg
<i>Поле, расположенное вдоль транспортной магистрали М-7</i>				
в 15 м от автотрассы	1,52±0,53	0,24±0,07	<0,01	<0,0025
в 25 м от автотрассы	1,09±0,38	0,28±0,09	<0,01	0,017±0,007
в 50 м от автотрассы	1,11±0,39	0,25±0,08	<0,01	<0,0025
<i>Коттеджная застройка вблизи федеральной автодороги М-5</i>				
жилой район	0,31±0,11	0,40±0,12	<0,01	<0,0025
новостройка	0,71±0,25	1,16±0,35	<0,01	<0,0025
<i>Садовое товарищество</i>				
вдоль железной дороги	0,62±0,22	1,38±0,41	<0,01	0,088±0,025
<i>Сельскохозяйственный район</i>				
для пищевого потребления (семечка)	0,12±0,04	0,073±0,022	0,035±0,012	0,006±0,002
для производства комбикорма	0,45±0,16	0,095±0,029	<0,001	<0,0025
поле 1	0,55±0,19	0,049±0,015	<0,001	<0,0025
поле 2	0,38±0,13	0,093±0,028	<0,01	<0,0025
поле 3	0,31±0,11	0,091±0,027	<0,01	<0,0025
поле 4	0,33±0,12	0,14±0,04	<0,001	<0,0025
<i>Семена, полученные в опытном хозяйстве</i>				
высококачественные	0,18±0,06	0,016±0,005	0,05±0,02	<0,0025
экологически чистые	<0,02	0,016±0,005	0,05±0,02	<0,0025
фуражные	0,17±0,06			<0,0025
некондиционные	0,21±0,07	0,067±0,020	0,05±0,02	<0,0025

Таблица 3. Допустимая суточная доза кадмия при хроническом пероральном поступлении

Table 3. Permissible daily doses of chronic oral intake of cadmium

Нормативный документ	Референтная доза Cd	Страна/ Организация
Агентство по токсичным веществам и регистрации заболеваний	0,0001 мг/кг в сутки	Соединённые Штаты Америки (Федеральное)
«Р 2.1.10.3968-23. 2.1.10. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания. Руководство» (утверждено Роспотребнадзором 06.09.2023)	0,0005 мг/кг в сутки	Россия
Управление по оценке опасных факторов окружающей среды		Соединённые Штаты Америки (Калифорния)
Всемирная организация здравоохранения	0,025 мг/кг в месяц	Всемирная организация здравоохранения

Accepted for publication