

Научная статья

УДК 577.118, 504.5

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70

**Интегральная оценка экологической безопасности растительных
альтернатив молоку на основе анализа тяжелых металлов**

**Инна Владимировна Бегдай¹, Тамара Александровна Цесарь², Константин
Викторович Харин³**

^{1,2,3} Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

¹ algae@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7675-8078>

² tsesar.tamara@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0860-6080>

³ k-harin79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9091-6375>

Аннотация. В рамках данной работы выполнена интегральная оценка экологической безопасности растительных аналогов молока, представленных на российском рынке. Исследование охватывало как готовые коммерческие напитки популярных брендов, так и образцы, приготовленные лабораторным способом из крупяного сырья. Основной целью являлись определение уровня содержания токсичных и условно-токсичных тяжелых металлов – свинца, кадмия, цинка и меди – и последующая оценка потенциального неканцерогенного риска для здоровья взрослых и детей при регулярном потреблении данных продуктов. Лабораторный анализ проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии, полученные количественные данные сравнивали с установленными гигиеническими нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК). Для перехода от химических концентраций к оценке воздействия на здоровье применялась утвержденная методика расчета экспозиционных доз и коэффициента опасности (HQ). Результаты анализа показали, что ни в одном из исследованных образцов, как промышленных, так и лабораторных, не было зафиксировано превышения ПДК по всем четырем металлам. Концентрации варьировали в безопасных пределах 4,8 %–36,7 % от соответствующих ПДК. Ключевым результатом интегральной оценки является расчет HQ. Его значения для каждого металла, а также суммарные показатели риска всех типов напитков для взрослых и детей оказались существенно меньше единицы (менее 0,01). Это однозначно свидетельствует об отсутствии угрозы появления неканцерогенных эффектов для здоровья при долгосрочном употреблении. Таким образом, исследование демонстрирует, что рассмотренные растительные аналоги молока обладают высоким уровнем экологической безопасности по критерию содержания тяжелых металлов. Установлено, что решающим фактором безопасности является качество исходного сельскохозяйственного сырья, а не тип обработки (промышленный или лабораторно приготовленный).

Ключевые слова: растительное молоко, тяжелые металлы, экологическая безопасность, коэффициент опасности, риск.

Для цитирования: Бегдай И. В., Цесарь Т. А., Харин К. В. Интегральная оценка экологической безопасности растительных альтернатив молоку на основе анализа тяжелых металлов // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 57–70. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70.

Original article

Integral assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives based on heavy metal analysis

Inna V. Begday¹✉, Tamara A. Tsesar², Konstantin V. Kharin³

^{1,2,3} North-Caucasus Federal University, Stavropol', Russia

¹ algae@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7675-8078>

² tsesar.tamara@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0860-6080>

³ k-harin79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9091-6375>

Abstract. The study presents a comprehensive assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives available on the Russian market. The study included both ready-to-drink commercial beverages from popular brands and laboratory-prepared samples from cereal raw materials. The primary objective has been determination of the levels of toxic and conditionally toxic heavy metals- lead, cadmium, zinc, and copper – and subsequent assessment of the potential non-carcinogenic health risk to adults and children with regular consumption of these products. Laboratory analysis has been performed using atomic absorption spectrometry. The resulting quantitative data have been compared with the established hygienic standards (MPCs). To convert chemical concentrations to health impact assessment, an approved method for calculating exposure doses and hazard quotients (HQs) has been used. The analysis results showed that none of the samples, whether industrial or laboratory, exceeded the MPCs for all four metals. Concentrations varied within safe limits, ranging from 4.8 % to 36.7 % of the corresponding MACs. The key result of the integrated assessment is the calculation of the hazard quotient (HQ). Its values for each metal, as well as the overall risk indicators for all beverage types for adults and children, were significantly less than one (less than 0.01). This clearly indicates no risk of developing non-carcinogenic health effects with long-term consumption. Thus, the study demonstrates that the plant-based milk analogues examined possess a high level of environmental safety in terms of heavy metal content. It has been found that the decisive safety factor is the quality of the original agricultural raw materials, not the type of processing (industrial or laboratory prepared).

Keywords: plant-based milk, heavy metals, environmental safety, hazard quotient, risk.

For citation: Begdai I. V., Tsesar T. A., Kharin K. V. Integral assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives based on heavy metal analysis. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):57–70. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая пищевая индустрия переживает стремительные изменения, связанные с повышением интереса к продуктам растительного происхождения. Особенно активно развивается сегмент растительных аналогов молока, который рассматривается не только как альтернатива животным продуктам, но и как важный элемент экологически устойчивого питания. Рост популярности таких напитков обусловлен рядом факторов – изменением потребительских привычек, распространением вегетарианства и веганства, увеличением числа людей с непереносимостью лактозы, а также растущим вниманием к вопросам экологии и рационального использования природных ресурсов [1]. Растительные белки хорошо усваиваются, хотя их аминокислотный состав обычно менее сбалансирован, чем у животных. При этом многие растительные культуры выгодно отличаются ценным профилем жирных кислот, особенно по содержанию омега-3 и омега-6. Пищевые волокна растительного сырья поддерживают здоровое пищеварение, помогают снижать холестерин и способствуют нормальной микробиоте, что делает их важным компонентом рациона [2].

Согласно исследованию Strategic Market Research (2022), растительное молоко является крупнейшей категорией продуктов на растительной основе, а ежегодный прирост мирового рынка оценивается в 15,5 % и, по прогнозам, сохранится до 2029 г. [3]. В настоящее время доля растительных аналогов составляет около 10 % мирового рынка молочной продукции, причем на соевое молоко приходится 37,8 %, миндальное – 20 %, овсяное – 12 %, а на прочие виды (включая рисовое, кокосовое, гороховое и смеси) – 15,3 % [4].

Смена традиционных продуктов на растительные аналоги ставит новые задачи перед специалистами в области пищевой химии и экологии. Несмотря на очевидные преимущества растительных напитков – меньшую углеродную нагрузку, отсутствие холестерина и животного белка, остаются нерешенными вопросы их пищевой ценности и экологической безопасности.

Во многих странах введены стандарты на контроль за содержанием токсичных элементов в пищевых продуктах, однако исследования показывают, что в растительном сырье концентрация тяжелых металлов может варьировать в зависимости от региона произрастания, почвенных условий и особенностей технологической обработки [5, 6].

В отличие от коровьего молока, в котором поступление тяжелых металлов в продукт в основном связано с загрязнением кормов и воды, растительные напитки могут аккумулировать загрязнители уже на стадии выращивания культур – овса, сои, риса, миндаля и др. [7]. Торможение роста является одним из самых важных и наиболее легко определяемых проявлений токсичности тяжелых металлов в отношении растений, так как под влиянием тяжелых металлов у растений уменьшаются линейные размеры корней и побегов, снижается накопление биомассы [8]. Увеличение концентрации тяжелых металлов оказывает воздействие на фотосинтез и дыхание растений, изменяет анатомическую структуру листа, организацию хлоропластов, уменьшает содержание фотосинтетических пигментов и снижает скорость дыхания [9].

Проблема загрязнения пищевых продуктов тяжелыми металлами исследуется на протяжении десятилетий. Еще в середине XX в. А. П. Виноградов [10, 11]

показал, что свинец, кадмий, цинк и медь способны активно накапливаться в почвах и растительных тканях, переходя далее в продукты питания. Позднее работы А. М. Каббата-Пендиса и В. Б. Ильина подтвердили, что биогеохимические циклы металлов тесно связаны с деятельностью человека и в значительной степени определяют устойчивость агроэкосистем [6, 12]. Кадмий (Cd) проявляет высокую подвижность в кислых почвах и активно усваивается растениями семейства злаковых, однако в условиях нейтральной реакции и при наличии достаточного количества цинка его поступление существенно снижается [13]. Свинец (Pb), напротив, обладает низкой биодоступностью, но способен прочно связываться с поверхностью корней и накапливаться в оболочке зерна. Медь (Cu) и цинк (Zn) относятся к числу эссенциальных микроэлементов, необходимых для нормального метаболизма растений и человека [14, 15]. Поэтому оценка содержания таких элементов, как Pb, Cd, Cu и Zn, становится ключевым направлением исследований в области пищевой экологии. На сегодняшний день большинство исследований растительного молока посвящены вопросам его пищевой ценности, органолептических свойств и технологии производства [3, 16]. Однако комплексная оценка экологической безопасности подобных напитков, включающая как лабораторный анализ содержания тяжелых металлов, так и оценку неканцерогенного риска для здоровья населения, до сих пор проводится ограниченно. Под неканцерогенным риском понимается вероятность развития вредных эффектов для здоровья (кроме рака) при воздействии химических веществ, оцениваемая путем сравнения уровней экспозиции с референтными (безопасными) дозами.

В то время, как в развитых странах контроль за составом растительных продуктов регулируется строгими стандартами (например, директивами ЕС), на российском рынке растительное молоко представлено относительно недавно и систематические данные о его качестве и безопасности отсутствуют, что делает подобные исследования особенно актуальными в контексте обеспечения продовольственной и экологической безопасности страны. Кроме того, растительное молоко сегодня является одним из наиболее перспективных направлений пищевой промышленности: его производство требует меньше воды и земли, чем животноводство, выбросы парниковых газов при этом значительно ниже. Следовательно, оценка не только пищевой, но и экологической безопасности данных продуктов имеет важное прикладное значение для устойчивого развития.

Современные методы оценки экологических рисков, рекомендованные Роспотребнадзором, позволяют не только определить концентрацию загрязнителей в продукте, но и рассчитать HQ, отражающий потенциальное влияние на здоровье человека при длительном употреблении продукта. Такой подход позволяет перевести результаты химического анализа в форму, применимую для практической оценки безопасности продуктов питания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на базе научно-учебной лаборатории биогеохимии окружающей среды Северо-Кавказского федерального университета. Объектами стали наиболее распространенные марки растительного молока, представленные

ные на российском рынке – «Овсяша», «Nemoloko» и «Здоровое меню» – и приобретенные в супермаркете «Перекресток». Выбор обусловлен их высокой доступностью, популярностью и разнообразием ассортимента.

В качестве образцов для приготовления растительного молока в лабораторных условиях были выбраны наиболее популярные производители круп: «Националь» (овсяные хлопья «Геркулес»), «Увелка» (крупка гречневая зеленая ядрица, сорт 1), «Бакалейный стандарт» (рис длиннозерный, сорт 2; крупка гречневая зрелая ядрица, сорт 1). Выбор этих марок также обусловлен их высокой степенью распространенности и соответствием требованиям ГОСТ. Все образцы имели сертификаты качества и маркировку «без ГМО».

Приготовление лабораторного молока проводилось по унифицированной методике на основании патента № 2756071: 100 г исходного продукта замачивали в 500 мл воды, выдерживали при температуре 20 ± 2 °C в течение 8 ч, после чего смесь измельчали и фильтровали через двойной слой марли. Полученный напиток анализировался в тот же день [17].

В качестве маркерных веществ были взяты Pb, Cu, Cd, Zn. Определение концентрации тяжелых металлов проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе Thermo Scientific iCE 3300. Подготовка проб включала стадию минерализации в соответствии с ГОСТ 26929-94 «Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов». Результаты выражали в миллиграммах на килограмм продукта (мг/кг) и сравнивали с нормативами ПДК из «Санитарных правил и норм 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах». Все определения проводили в двух параллельных пробах, результаты усредняли и округляли до второго десятичного знака.

Для оценки потенциальных последствий употребления растительного молока применялась методика расчета экспозиционных доз (D_i) и HQ, рекомендованная руководящими документами МУ 2.3.7.2519-09 «Определение экспозиции и оценка риска воздействия химических контаминантов пищевых продуктов на население: методические указания» и Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Массовую долю химического элемента (m) рассчитывали по формуле:

$$m = \frac{(C_x - C_k) * Y * K}{p}, \quad (1)$$

где C_x – концентрация элемента в исследуемом растворе, мкг/см³; C_k – среднеарифметическое значение концентрации элемента для параллельных контрольных растворов, мкг/см³; Y – исходный объем исследуемого раствора, см³; p – навеска пробы, г; K – коэффициент разбавления.

Если разность ($C_x - C_k$) оказывается меньше предела обнаружения $3S_n$, то дается односторонняя оценка максимально возможной концентрации элемента в продукте в млн⁻¹:

$$m_{\text{макс}} < \frac{3S_n * Y * K}{p\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где n – число параллельных измерений абсорбции испытуемого раствора.

Результаты измерений усредняли из двух параллельных определений и округляли до второго десятичного знака.

Для оценки потенциального риска при употреблении растительного молока рассчитывались D_i и HQ_i , отражающий вероятность развития неканцерогенных эффектов. Экспозиция контаминанта рассчитывалась по формуле:

$$D_i = \frac{C_i \times M \times T_p}{P \times T}, \quad (3)$$

где D_i – значение экспозиции контаминанта, мг/кг массы тела/сут; C_i – концентрация контаминанта в рассматриваемом пищевом продукте, мг/кг; M – потребление продукта, (кг/год); T_p – количество лет, в течение которых употребляется исследуемый напиток (1 год); P – масса тела человека, кг (стандартное значение – 70 кг); T – усредненное время воздействия токсиканта (или средняя продолжительность возможного воздействия токсиканта за время жизни человека), принимаемое равным 30 годам.

HQ рассчитывали путем сопоставления величин потенциальной суточной дозы вещества, поступающего определенным путем, и уровня безопасного воздействия при этом же пути поступления:

$$HQ_i = D_i \div RfD, \quad (4)$$

где HQ – коэффициент опасности воздействия вещества i ; D_i – потенциальная доза поступления вещества i , мг/(кг*сутки); RfD – безопасный уровень воздействия, мг/(кг*сутки).

Если $HQ < 1$, то опасности и риска угрозы здоровью нет. Если же $HQ > 1$, то существует опасность отравления, которая тем больше, чем больше индекс HQ превышает единицу.

Оценка проводилась для двух сценариев:

- взрослое население (70 кг, 120 кг молока в год);
- детское население (31 кг, 137,4 кг молока в год).

Для расчетов использованы значения референтных доз (RfD): Pb – 0,0035 мг/кг·сут; Cd – 0,0005 мг/кг·сут; Cu – 0,04 мг/кг·сут; Zn – 0,3 мг/кг·сут (ЕРА, 2021), ПДК взяты из «Санитарных правил и норм 42-123-4089-86».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью анализа являлось определение содержания Pb , Cd , Zn , Cu в промышленном и лабораторно приготовленном растительном молоке, а также сравнение результатов с ПДК согласно «Санитарным правилам и нормам 42-123-4089-86». Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, содержание всех исследуемых элементов во всех образцах значительно ниже ПДК.

Наибольшее содержание Pb отмечено в рисовом молоке «Здоровое меню» (0,0241 мг/кг), что составляет лишь 4,8 % от допустимого уровня. Концентрации Cd варьировали от 0,0106 до 0,0113 мг/кг и составили не более 36,7 % от ПДК. Содержание Cu находилось в пределах 0,0069–0,0121 мг/кг, что существенно ниже установленных нормативов. Уровень Zn составлял 0,2393–0,3660 мг/кг при ПДК 3 мг/кг, то есть не превышал 12,2 % от допустимого значения. Таким образом, ни один из промышленных образцов не продемонстрировал превышений нормативов,

что свидетельствует о высоком уровне производственного контроля и качестве исходного сырья.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в исследуемом растительном молоке
Table 1. Content of heavy metals in the studied plant milk

Продукт	Содержание ТМ, мг/кг			
	Pb	Cd	Zn	Cu
Молоко на основе крупы гречневой зрелой	0,0530	н/о	0,1166	0,0043
Молоко на основе крупы гречневой зеленой	0,0068	н/о	0,4409	0,0196
Молоко на основе хлопьев овсяных	0,0140	н/о	0,2871	0,0233
Молоко на основе крупы рисовой	0,0504	н/о	0,2745	0,0045
Молоко миндальное «Овсяша»	0,0258	0,0089	0,3423	0,0053
Молоко рисовое «Здоровое меню»	0,0296	0,0086	0,1049	0,0011
Молоко кокосовое «Овсяша»	0,0079	0,0108	0,3752	0,0205
Молоко овсяное «Nemoloko»	0,0112	0,0068	0,1824	0,003
ПДК	0,5	0,03	3	10

Как и в случае с промышленными продуктами, превышений ПДК по тяжелым металлам в лабораторно приготовленных образцах растительного молока не выявлено. Особенностью приготовленных образцов является отсутствие Cd во всех пробах (концентрация ниже предела обнаружения), что, вероятно, связано с низким уровнем загрязнения используемого зернового сырья. Наибольшее содержание Pb (0,053 мг/кг) зафиксировано в зрелой гречке, что составляет 10,6 % от допустимой нормы. Это объясняется способностью зрелой гречки к накоплению свинца при выращивании на почвах с повышенным содержанием Pb, что отмечалось и другими исследователями [5, 6].

Для всех образцов наблюдается четкая тенденция:

- более высокое содержание Zn в зеленой гречке (0,4409 мг/кг);
- умеренные значения Cu (0,0097–0,0233 мг/кг);
- минимальные концентрации Cd (не обнаружен).

Сравнение с промышленными напитками показывает, что уровень тяжелых металлов в лабораторно приготовленных образцах сопоставим, а иногда даже ниже, что подтверждает экологическую чистоту круп, использованных в исследовании.

Оценка риска для здоровья населения выполнена для взрослой и детской групп исходя из среднесуточного потребления напитков и концентрации выявленных элементов. Результаты расчетов по промышленным образцам приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки неканцерогенного риска при употреблении промышленного растительного молока

Table 2. Results of the assessment of non-carcinogenic risk from the consumption of industrial plant milk

Вещество	Концентрация, мг/кг	RfD (референтная доза), мг/кг	Среднесуточная доза поступления, мг/кг сут		HQ (коэффициент опасности)	
			Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
«Овсяша» миндальное						
Кадмий	0,0089	0,0005	$1,39 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	0,0027	0,0072
Свинец	0,0258	0,0035	$4,04 \times 10^{-6}$	$1,044 \times 10^{-5}$	0,0015	0,0030
Цинк	0,3423	0,300	$5,4 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-4}$	0,00018	0,00046
Медь	0,0053	0,040	$8,3 \times 10^{-7}$	$2,15 \times 10^{-6}$	0,000021	0,00005
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0044		Для детей: 0,0057			
«Овсяша» кокосовое						
Кадмий	0,0108	0,0005	$1,69 \times 10^{-6}$	$4,37 \times 10^{-6}$	0,00338	0,00874
Свинец	0,0079	0,0035	$1,24 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	0,00035	0,00091
Цинк	0,3752	0,300	$5,8 \times 10^{-4}$	$1,52 \times 10^{-4}$	0,00193	0,00051
Медь	0,0205	0,040	$3,21 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-6}$	0,00008	0,00021
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0057		Для детей: 0,0055			
«Nemoloko» овсяное						
Кадмий	0,0068	0,0005	$1,06 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-6}$	0,0021	0,0055
Свинец	0,0112	0,0035	$1,75 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-6}$	0,0005	0,0013
Цинк	0,1824	0,300	$2,86 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-5}$	0,000095	0,00025
Медь	0,0030	0,040	$4,7 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-6}$	0,000012	0,00003
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0027		Для детей: 0,0038			
«Здоровое меню» рисовое						
Кадмий	0,0086	0,0005	$1,35 \times 10^{-6}$	$3,48 \times 10^{-6}$	0,0027	0,00696
Свинец	0,0296	0,0035	$4,63 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-5}$	0,0013	0,0034
Цинк	0,1049	0,300	$1,64 \times 10^{-5}$	$4,25 \times 10^{-5}$	0,000055	0,00014
Медь	0,0011	0,040	$1,7 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	0,000004	0,00001
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0041		Для детей: 0,0057			

Во всех исследованных образцах HQ по каждому элементу меньше 1, что означает отсутствие угрозы для здоровья. Наибольшие значения HQ отмечены по кадмию, однако суммарный риск остается в пределах допустимого: для взрослых 0,0027–0,0057, для детей 0,0038–0,0057.

Для наглядного сравнения рисков по лабораторно приготовленным образцам молока приведены данные табл. 3.

Таблица 3. Результаты оценки неканцерогенного риска при употреблении растительного молока лабораторного приготовления

Table 3. Results of the assessment of non-carcinogenic risk of consumption of laboratory-prepared plant milk

Вещество	Концентрация, мг/кг	RfD (референтная доза), мг/кг	Среднесуточная доза поступления, мг/кг сут		HQ (коэффициент опасности)	
			Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
Молоко на основе крупы гречневой зрелой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0530	0,0035	$8,3 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-5}$	0,0024	0,0060
Цинк	0,1166	0,300	$1,83 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	0,000061	0,00015
Медь	0,0043	0,040	$6,7 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-6}$	0,000017	0,000044
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0025		Для детей: 0,0062			
Молоко на основе крупы гречневой зеленой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0068	0,0035	$1,06 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-6}$	0,00030	0,00079
Цинк	0,4409	0,300	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	0,00023	0,0006
Медь	0,0196	0,040	$3,07 \times 10^{-6}$	$7,93 \times 10^{-6}$	0,000077	0,00019
Суммарный риск	Для взрослых: 0,00061		Для детей: 0,0016			
Молоко на основе хлопьев овсяных						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0140	0,0035	$2,19 \times 10^{-6}$	$5,67 \times 10^{-6}$	0,00063	0,00160
Цинк	0,2871	0,300	$4,5 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-4}$	0,00015	0,00039
Медь	0,0233	0,040	$3,65 \times 10^{-6}$	$9,43 \times 10^{-6}$	0,00009	0,00024
Суммарный риск	Для взрослых: 0,00087		Для детей: 0,0022			
Молоко на основе крупы рисовой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0504	0,0035	$7,89 \times 10^{-6}$	$2,04 \times 10^{-5}$	0,00250	0,00580
Цинк	0,2745	0,300	$4,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,00014	0,00036
Медь	0,0045	0,040	7×10^{-7}	$1,82 \times 10^{-6}$	0,000018	0,000046
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0027		Для детей: 0,0062			

Значения HQ во всех случаях также не превышают 0,01, что указывает на отсутствие угрозы здоровью даже при длительном употреблении растительного молока. Наибольшие значения HQ отмечены для кадмия и свинца, что соответствует их биотоксичности, однако абсолютные величины показателей минимальны. У детей HQ несколько выше, чем у взрослых, что объясняется более низкой массой тела и, соответственно, большей дозовой нагрузкой при одинаковом потреблении. Максимальные показатели наблюдаются для свинца в молоке из риса и зрелой гречки (HQ = 0,0024–0,0060), что не представляет опасности, но требует умеренности при регулярном употреблении детьми.

Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов:

1. Все исследованные продукты – как промышленные, так и лабораторно приготовленные – соответствуют требованиям экологической безопасности по содержанию тяжелых металлов.

2. Содержание кадмия во всех лабораторных образцах ниже предела обнаружения, что свидетельствует о хорошем качестве зернового сырья.

3. Максимальные концентрации свинца (до 0,053 мг/кг) не превышают 10,6 % от ПДК, что исключает риск хронического накопления.

4. Суммарные показатели $HQ < 1$ для всех металлов и возрастных категорий, что подтверждает отсутствие неканцерогенного риска.

5. Незначительные различия между промышленным и лабораторно приготовленным молоком указывают на то, что качество продукции определяется не технологией, а исходным сырьем и регионом его происхождения.

В целом результаты исследования показывают, что растительные напитки, произведенные в России, обладают высоким уровнем безопасности и могут рассматриваться как полноценная альтернатива животным продуктам при условии соблюдения технологических норм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило комплексно оценить экологическую безопасность растительного молока, представленного на российском рынке и приготовленного в лабораторных условиях.

Сравнение промышленных и лабораторно приготовленных образцов показало, что концентрации металлов сопоставимы, а различия не превышают статистической погрешности. Это указывает на одинаково высокий уровень экологической безопасности обоих типов напитков.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что растительное молоко можно рекомендовать для включения в рацион различных возрастных групп населения, в том числе детей и лиц с непереносимостью лактозы, при условии соблюдения правил хранения и сроков годности.

С точки зрения устойчивого развития растительное молоко является не только питательно и безопасно значимым продуктом, но и экологически предпочтительным: его производство требует меньше воды, энергии и земельных ресурсов по сравнению с животноводческими аналогами.

Для дальнейшего повышения точности оценок рекомендуется проводить периодический мониторинг содержания тяжелых металлов в растительном сырье и готовых напитках, а также разработать национальные стандарты экологической сертификации растительных продуктов питания.

Список источников

1. Hale, M. Exploring the growth of plant-based milk alternatives. – Текст: электронный // Dairy Foods: сайт. – URL: <https://www.dairyfoods.com/blogs/14-dairy-foods-blog/post/95247-exploring-the-growth-of-plant-based-milk-alternatives#:~:text=The%20plant%2Dbased%20milk%20alternatives,a%20way%20of%20identifying%20yourself.%E2%80%9D> (дата обращения: 20.10.2025).

2. Алексаночкин, Д. И. Напитки на растительной основе: обзор сырьевых компонентов и технологий получения / Д. И. Алексаночкин, И. Д. Семенов, И. А. Фоменко // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 371–384. – DOI 10.21443/1560-9278-2025-28-3-371-384. – EDN CIANAP.
3. McClements, D. J. Plant-based milks: a review of the science underpinning their design, fabrication, and performance / D. J. McClement, E. Newman, I. F. McClements. – DOI: 10.1111/154 - 4337.12505 // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2019. – Vol. 18, № 6. – P. 2047–2067.
4. Федеральный центр развития экспорта продукции АПК Минсельхоза России (Агроэкспорт). Обзор ВЭД «Растительные напитки». – Текст: электронный // Агроэкспорт: сайт. – URL: <https://aemcx.ru/> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте / Ю. В. Алексеев. – Санкт-Петербург: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, 2008. – 216 с. – ISBN 978-5-86763-213-7. – EDN QBSZFI.
6. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение: моногр. / В. Б. Ильин; отв. ред. А. И. Сысо. – Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской акад. наук, 2012. – 218 с. – ISBN 978-5-7692-1229-1. – EDN QLDFYP.
7. Горлов, И. Ф. Оценка миграции тяжелых металлов в пищевой цепи «вода – почва – корма – молоко» / И. Ф. Горлов, Н. И. Мосолова, Е. Ю. Злобина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 3(27). – С. 101–104. – EDN PCXKYZ.
8. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения: моногр. / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск: Институт биологии Карельского научного центра, 2014. – 194 с. – ISBN 978-5-9274-0641-8.
9. Дмитриюкова, М. Ю. Влияние кадмия на рост и дыхание растений табака с геном леггемоглобина а сои / М. Ю. Дмитриюкова, А. Х. Баймиев, З. Ф. Рахманкулова // Агрохимия. – 2011. – № 10. – С. 70–75. – EDN MXFYTG.
10. Виноградов, А. П. Полное собрание трудов в 18 т. Т. 4. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах: моногр. / науч. ред. Е.М. Коробова; [сост. Л. Д. Виноградова]. – М.: РАН, 2021. – 298 с. – ISBN 978-5-907366-41-1.
11. Виноградов, А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А. П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571. – EDN SIZCQF.
12. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants: Fourth edition: monogr. / A. Kabata-Pendias. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. – 548 p. – ISBN 978-0-429192-03-6. – EDN KYYXAU.
13. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах: моногр. / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: ООО «Ракурс», 2017. – 178 с. – ISBN 978-5-9758-1665-8. – EDN ZUOCLR.
14. Губин, А. Н. Кадмий в системе: торфяная низинная почва – растение / А. Н. Губин, М. А. Ефремова, В. Н. Ефимов // Плодородие. – 2007. – № 2 (35). – С. 34–35. – EDN KUCKDJ.
15. Гнусарев, С. С. Влияние смешанной гнили от трутовика настоящего (*Fomes fomentarius* (L.:Fr.) Gill.) на накопление тяжелых металлов березой повислой (*Betula pendula* Roth.) / С. С. Гнусарев, Н. А. Митрофанова, Б. П. Чураков //

Медико-физиологические проблемы экологии человека: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, Ульяновск, 01–04 декабря 2021 г. – Ульяновск: Ульяновский государственный университет, 2021. – С. 67–70. – DOI 10.34014/MPPHE.2021-67-70. – EDN XMOGNP.

16. Velangi, M. Role of plant based milk alternatives as a functional beverage: a review / M. Velangi, M. Savla. – DOI:10.52403/ijhsr.20221135 // Int. J. Health Sci. Res. – 2022. – Vol. 12. – P. 273–281.

17. Патент № 2756071. Российская Федерация. Способ получения растительного молока: № 2021103148: заявл. 10.02.2021: опубл. 27.09.2021 / В. А. Нгуен, В.И. Дейнека, Л.А. Дейнека. – 12 с.

References

1. Hale, M. Exploring the growth of plant-based milk alternatives. – Text: electronic // Dairy Foods: site. – URL:<https://www.dairyfoods.com/blogs/14-dairy-foods-blog/post/95247-exploring-the-growth-of-plant-based-milk-alternatives#:~:text=The%20plant%2Dbased%20milk%20alternatives,a%20way%20of%20identifying%20yourself.%E2%80%9D> (date of treatment: 10.20.2025).

2. Aleksanochkin, D. I. Plant-based drinks: a review of raw materials and production technologies / D. I. Aleksanochkin, I. D. Semenov, I. A. Fomenko // Bulletin of MSTU. Transactions of Murmansk State Technical University. – 2025. – Vol. 28, № 3. – P. 371–384. – DOI 10.21443/1560-9278-2025-28-3-371-384. – EDN CIANAP.

3. McClements, D. J. Plant-based milks: a review of the science underpinning their design, fabrication, and performance / D. J. McClement, E. Newman, I. F. McClements. – DOI: 10.1111/154 - 4337.12505 // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2019. – Vol. 18, №. 6. – P. 2047–2067.

4. Federal Center for the Export of Agricultural Products of the Ministry of Agriculture of Russia (Agroexport). Review of the foreign economic activity «Herbal drinks». – Text: electronic // Agroexport: site. – URL:<https://aemcx.ru> / (date of treatment: 09.25.2025).

5. Alekseev, Yu. V. Heavy metals in the agricultural landscape / Yu. V. Alekseev. – Saint-Petersburg: St.-Petersburg Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences, 2008. – 216 p. – ISBN 978-5-86763-213-7. – EDN QBSGFJ.

6. Ilyin, V. B. Heavy metals and nonmetals in the soil-plant system: monographs / V. B. Ilyin; ed. by A. I. Syso. – Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. – Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012. – 218 p. – ISBN 978-5-7692-1229-1. – EDN QLDFYP.

7. Gorlov, I. F. Assessment of migration of heavy metals in the food chain «water – soil – feed – milk» / I. F. Gorlov, N. I. Mosolova, E. Y. Zlobina // Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education. – 2012. – № 3(27). – P. 101–104. – EDN PCXKYZ.

8. Titov, A. F. Heavy metals and plants: monographs / A. F. Titov, N. M. Kaznina, V. V. Talanova. – Petrozavodsk: Institute of Biology of the Karelian Scientific Center, 2014. – 194 p. – ISBN 978-5-9274-0641-8.

9. Dmitryukova, M. Y. The effect of cadmium on the growth and respiration of tobacco plants with the soy leghemoglobin a gene / M. Y. Dmitryukova, A. H. Baymiev, Z. F. Rakhmankulova // *Agrochemistry*. – 2011. – № 10. – P. 70–75. – EDN MXFYTG.
10. Vinogradov, A. P. Complete works in 18 volumes. Vol. 4. Geochemistry of rare and scattered elements in soils: monographs / scientific ed. by E.M. Korobov; [comp. by L. D. Vinogradov]. – M.: RAS, 2021. – 298 p. – ISBN 978-5-907366-41-1.
11. Vinogradov, A. P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust / A. P. Vinogradov // *Geochemistry*. – 1962. – № 7. – P. 555–571. – EDN SIZCQF.
12. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants: Fourth edition: monogr. / A. Kabata-Pendias. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. – 548 p. – ISBN 978-0-429192-03-6. – EDN KYYXAU.
13. Medvedev, I. F. Heavy metals in ecosystems: monographs / I. F. Medvedev, S. S. Derevyagin. – Saratov: Rakurs LLC, 2017. – 178 p. – ISBN 978-5-9758-1665-8. – EDN ZUOCLR.
14. Gubin, A. N. Cadmium in the system: peat lowland soil – plant / A. N. Gubin, M. A. Efremova, B. H. Efimov // *Fertility*. – 2007. – № 2 (35). – P. 34–35. – EDN KUCKDJ.
15. Gnusarev, S. S. The influence of mixed rot from the present tinder (*Fomes fomentarius* (L.:Fr.) Gill.) on the accumulation of heavy metals by birch (*Betula pendula* Roth.) / S. S. Gnusarev, N. A. Mitrofanova, B. P. Churakov // *Medical and physiological problems of human ecology: materials VIII All-Russian Conference with International participation (Ulyanovsk, December 01-04, 2021)*. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State University, 2021. – P. 67–70. – DOI 10.34014/MPPE.2021-67-70. – EDN XMOGNP.
16. Velangi, M. Role of plant based milk alternatives as a functional beverage: a review / M. Velangi, M. Savla. – DOI:10.52403/ijhsr.20221135 // *Int. J. Health Sci. Res.* – 2022. – Vol. 12. – P. 273–281.
17. Patent № 2756071. Russian Federation. Method for producing plant milk: № 2021103148: declared 10.02.2021: published 27.09.2021 / V. A. Nguyen, V. I. Deineka, L. A. Deineka. – 12 p.

Информация об авторах

И. В. Бегдай – кандидат технических наук, доцент, заведующая научно-учебной лабораторией биогеохимии окружающей среды

Т. А. Цесарь – инженер-лаборант научно-учебной лаборатории биогеохимии окружающей среды

К. В. Харин – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и биогеографии

Information about the authors

I. V. Begdai – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research and Educational Laboratory of Environmental Biogeochemistry

T. A. Tsesar – Laboratory Engineer in the Research and Educational Laboratory of Environmental Biogeochemistry

K. V. Kharin – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Biogeography

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 11.02.2026; принята к публикации 13.02.2026.

The article was submitted 15.01.2026; approved after reviewing 11.02.2026; accepted for publication 13.02.2026.