

УДК 543.51, 664.7

## ОЦЕНКА МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РИСЕ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

© Н.В. Зайцева, Т.С. Уланова, Г.А. Вейхман, К.О. Гилева\*, Е.В. Стенно, А.В. Недошитова

ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, ул. Монастырская, 82, Пермь, 614045, Россия,  
ksenimanilova@mail.ru

Основной функцией общественного здравоохранения выступает безопасность пищевых продуктов, поэтому вопросы определения токсичных элементов (As, Cd, Pb, Hg, Al и Sr) в различных видах пищевой продукции являются актуальными. Рис накапливает металлов больше, чем другие злаки, поскольку обладает высокой сорбционной способностью. В статье систематизирован международный опыт исследования влияния географических и климатических факторов и процедур обработки (промывка, полировка, помол) при определении токсичных элементов в рисе методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Белый рис из Таиланда, Индии и Италии имеет более высокие концентрации мышьяка, свинца и кадмия, по сравнению с белым рисом из США. Концентрации свинца и кадмия не превышали нормативов комиссии Codex Alimentarius, однако концентрации мышьяка в коричневом рисе превышают стандарты комиссии. Промывка белого риса для удаления любых внешних загрязнений перед анализом снизила концентрации свинца и кадмия на 57 и 46% соответственно.

*Ключевые слова:* рис, токсичные элементы, географические и климатические факторы, процедуры обработки, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

**Для цитирования:** Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Вейхман Г.А., Гилева К.О., Стенно Е.В., Недошитова А.В. Оценка международного опыта определения содержания токсичных элементов в рисе методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 5–25. DOI: 10.14258/jcprm.20240212641.

### Введение

Термин «рис» относится в основном к двум видам трав семейства Poaceae: *Oryza sativa* (азиатский рис) и *Oryza glaberrima* (африканский рис). Основные различия между ними заключаются во внешнем виде зерна и в климатических условиях произрастания. Конечным продуктом сбора и обмолота риса является рис-сырец с внешним слоем шелухи, зародышевым и отрубевым слоями и эндоспермом. Следующими этапами переработки риса-сырца в коричневый, а затем в белый являются шелушение, измельчение и полировка [1].

Рис является основным продуктом питания для более чем половины населения мира, особенно в развивающихся странах Азии, где он обеспечивает более 70% энергии ежедневного потребления пищи. Рис является важным источником витаминов, аминокислот, минералов и других питательных веществ для человека [2–9].

При изучении структуры питания населения в РФ с каждым годом растет потребление круп, хлебобулочных изделий, способных быстро удовлетворить потребности организма в углеводах, витаминах и микроэлементах, необходимых для его метаболической активности, источником полноценного растительного белка и клетчатки [10].

В РФ рис не является основной продовольственной культурой. Ежегодно россиянами потребляется 630–670 тыс. тонн рисовой крупы и разнообразных продуктов переработки риса: целые, шлифованные, полированные, проросшие зерна, незрелые зерновки, дробленый рис, мука, крахмал, масло [11–14].

\* Автор, с которым следует вести переписку.

В настоящее время рис возделывается в 8 субъектах РФ. Краснодарский край является основным районом-производителем риса. Краснодарский рис отличается высокой чистотой продукта и экспортируется в другие страны [15]. Крупнейшими мировыми производителями риса являются Индия, Индонезия, Китай, Япония, Таиланд, Бразилия, США [16]. В Европе большая часть производства риса находится в Италии и Испании, составляющего 80% всего европейского производства. Португалия производит около 6% риса в Европе. Потребление риса в Португалии и Испании в последние годы неуклонно растет, главным образом потому, что потребители переходят с диеты с высоким содержанием белка на диету с высоким содержанием углеводов в результате снижения покупательной способности. Португалия занимает одно из первых мест в Европе по потреблению риса на душу населения, примерно 16 кг в год [17–21].

Анализ минерального состава пищевых продуктов обычно осуществляется в целях выявления возможных рисков, установления пищевой ценности и гарантированного соответствия нормативным документам по качеству и безопасности пищевых продуктов. Содержание одних и тех же элементов в различных пищевых продуктах значительно варьируется, но для конкретного вида продукта является более и менее постоянным.

При превышении безопасного уровня все элементы, включая необходимые для жизни, являются токсичными. Токсичность элемента зависит от интенсивности, продолжительности и частоты влияния, а также от путей воздействия. Наиболее часто наблюдаемыми токсичными элементами (ТЭ) в пищевых продуктах являются мышьяк (As), кадмий (Cd), ртуть (Hg), свинец (Pb) и, в меньшей степени, алюминий (Al) и олово (Sn) [21–28].

В отчете [29] приведены справочные санитарные нормы As, Cd, Pb, Hg, Al и стронция (Sr) для ежедневного/ежемесячного потребления без заметного риска для здоровья (табл. 1).

*Ртуть* – высокотоксичный, кумулятивный яд. В пищевых продуктах Hg может присутствовать в виде неорганических и органических соединений. Металлическая Hg обычно плохо адсорбируется продуктами, а попадая в организм, достаточно быстро выводится. Ионы Hg блокируют каталитически активные сульфгидрильные (-SH) группы ферментов или белков, изменяя их свойства. Hg и ее соединения поражают кроветворную, ферментативную, нервную системы и почки, вызывая множество различных патологических состояний и вредны в любых количествах [30, 31].

*Свинец* – один из самых распространенных в окружающей среде и наиболее токсичный элемент, попадает в организм в основном через легкие и желудочно-кишечный тракт. Количество Pb и его соединений, определяемое в пищевых продуктах, зависит от места их происхождения и способа приготовления. Среднее количество Pb, попадающее в организм с нормальными пищевыми продуктами, составляет 230–350 мкг в день, из воздуха поступает еще примерно 90 мкг в день. Токсическое действие свинца при поступлении в организм связано с блокированием ферментных систем путем взаимодействия с реакционно-способными функциональными группами белковых молекул (-SH) с последующим нарушением процессов биосинтеза таких жизненно важных соединений, как гемоглобин, нуклеиновые кислоты, протеины, гормоны, что отражается на функциях желудочно-кишечного тракта, нервной системы, терморегуляции, кровообращения и иммунной системы [32, 33].

*Кадмий* является наиболее опасным загрязнителем пищевых продуктов. Отличительные свойства Cd – высокая летучесть и способность легко проникать в растения и живые организмы за счет образования ковалентных связей с органическими молекулами белков. Распределение в организме Cd, поступающего с пищевыми продуктами, зависит от его формы. Механизм токсического действия Cd связывают с его взаимодействием с карбоксильными, аминными и сульфгидрильными группами белковых молекул, что отражается на функциях последних. Установлено, что менее растворимые соединения кадмия действуют на дыхательные пути и желудочно-кишечный тракт, более растворимые после всасывания в кровь поражают центральную нервную систему, вызывают анемию, нарушают белковый, витаминный и фосфорно-кальциевый обмен, происходящий в почках [34].

*Мышьяк* и все его соединения ядовиты. As взаимодействует с тиоловыми группами белков, цистеином, глутатионом, липоевой кислотой, влияет на окислительные процессы в митохондриях. Накапливается элемент, главным образом, в печени, селезенке, почках, легких, коже, тонком кишечнике и крови (в эритроцитах), а также волосах и ногтях [34].

Таблица 1. Сводка справочных санитарных норм для загрязняющих веществ

Загрязнитель	Справочный стандарт здоровья	Источник
Al	2 мг/кг массы тела <sup>1</sup>	(ВОЗ, 2011)
As	Нет	(ВОЗ, 2010)
Cd	25 мкг/кг массы тела <sup>2</sup>	(ВОЗ, 2010)
Pb	Нет	(ВОЗ, 2010)
Неорганическая Hg	4 мкг/кг массы тела <sup>1</sup>	(ВОЗ, 2011)
[CH <sub>3</sub> Hg] <sup>+</sup>	1.6 мкг/кг массы тела <sup>1</sup>	(ВОЗ, 2010)
Sr	0.13 мг/кг массы тела <sup>3</sup>	(ВОЗ 2010)

Примечание: <sup>1</sup>недельное потребление; <sup>2</sup>месячное потребление; <sup>3</sup>максимально допустимое суточное потребление.

*Алюминий* – металл, который занимает третье место после кислорода и кремния по распространенности в земной коре. Al находит широкое применение в промышленности и в быту (посуда, оборудование и упаковка), что обуславливает его наличие в пищевых продуктах и напитках. Ранее алюминий относили к элементам с минимальным токсическим эффектом. В настоящее время выявлены токсические свойства соединений Al и экспертами Комитета экспертов ФАО/ВОЗ установлена норма недельного потребления Al с пищевыми продуктами не более 7 мг/кг. Поступивший в организм Al постепенно накапливается в клетках мозга, скелете и возрастает в присутствии железа (Fe), фтора, лимонной кислоты и при дефиците цинка (Zn) [35, 36].

*Стронций* реагирует с водой и кислородом воздуха и в виде соединений поступает в растения и организм человека. Избыточное поступление Sr вызывает вытеснения ионов кальция из костной ткани [37–39].

В настоящее время близкое расположение крупных промышленных предприятий к рисовым полям приводит к загрязнению почв, поверхностных и подземных вод ТЭ [40–49]. Накопление ТЭ в разных частях растений зависит от нескольких факторов, таких как климатические условия, географическое положение, свойства почв, методы ведения сельского хозяйства, типа растений. Рис накапливает ТЭ больше, чем другие злаки, так как обладает высокой сорбционной способностью [50–56]. Поскольку ТЭ не подвержены биологическому разложению и сохраняются в течение длительного времени в экосистемах, рис может быть основным источником их поступления в организм человека [57–62].

### Нормативные документы

В большинстве стран разработаны нормативные требования, ограничивающие содержание загрязняющих веществ в пищевых продуктах и продовольственном сырье [63]. Допустимое содержание ТЭ в продуктах питания установлено в требованиях, изложенных объединенной комиссией Организации Объединенных Наций (ООН) и ВОЗ в своде пищевых международных стандартов Codex Alimentarius (Кодекс Алиментариус, САС) или Пищевой кодекс [64]. Согласно этому документу наиболее важными при гигиеническом контроле пищевых продуктов являются восемь элементов: Cd, Hg, As, Pb, Zn, Fe, медь (Cu) и Sn. В таблице 2 представлены максимальные допустимые уровни ТЭ в мукомольно-крупяных изделиях, приведенные в документах CODEX STAN и ЕС [65, 66]. Содержание Hg регламентируется только в рыбе.

Содержание ТЭ в рисе регламентируется Таможенным союзом ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и СанПин 2.3.21078-01 «Гигиенические требования безопасности пищевой продукции» (табл. 3), наиболее жесткие требования предъявляются к диетическим и детским продуктам [67, 68].

Таблица 2. Максимальные допустимые уровни содержания токсичных элементов по данным Codex Alimentarius (CODEX STAN 193-1995) и Regulation European Commission (№ 1881/2006)

Элемент	Продукт	Codex Alimentarius Commission, мг/кг	Продукт	Regulation European Commission № 1881/2006, мг/кг
Cd	Рис очищенный/полированный	0.4	Отруби, пророщенные зерновые, пшеница и рис	0.2
	Зерно хлебных злаков	0.1		
Pb	Зерно хлебных злаков, кроме гречихи, канихуа и киноа	0.2	Зерновые и зернобобовые	0.2

Таблица 3. Допустимые уровни токсичных элементов в различных продуктах (ТР ТС 021/2011 и СанПин 2.3.2.1078-01)

Показатели	Допустимые уровни (ТР ТС 021/2011), мг/кг, не более	Группа продуктов	Допустимые уровни (СанПин 2.3.2.1078-01), мг/кг, не более	Группа продуктов
Pb	0.5	Продукты переработки злаковых и зернобобовых культур, за исключением отрубей пищевых, хлеба и булочных изделий	0.5 (0.3) *	Зерно продовольственное, в т.ч. пшеница, рожь, овес, ячмень, просо, гречиха, рис, кукуруза
As	0.2		0.2	
Cd	0.1		0.1 (0.03) *	
Hg	0.03	Крупа, толокно, хлопья, мука, отруби пищевые	0.03	

Примечание: \*ПДК в сырье, предназначенном для производства диетических и детских продуктов.

### Инструментальные методы определения ТЭ в рисе

Большое количество аналитических методов, которые могут быть использованы для анализа ТЭ в пищевой продукции: пламенная атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС), атомно-абсорбционная спектроскопия с электротермической атомизацией (ЭТААС), атомно-абсорбционная спектроскопия с генерацией гидридов (ААС с генерацией гидридов и Hg), атомно-абсорбционная спектроскопия холодного пара, оптическая (атомно-) эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), анодная инверсионная вольтамперометрия, колориметрия, нейтронно-активационный анализ (ИНАА). Пределы обнаружения (LOD) элементов различных спектральных методов отличаются на несколько порядков (табл. 4) [69].

Данные таблицы 4 свидетельствуют о высокой чувствительности методов ЭТААС, ААС с генерацией гидридов и Hg, ИСП-ОЭС и ИСП-МС.

Пределы количественного определения (LOQ, мкг/л) и LOD основных и токсичных элементов в рисе аналитическими методами представлены в таблице 5.

Таблица 4. Пределы обнаружения (мкг/л) на базе спектрометрического оборудования компании PerkinElmer (США)

Элемент	ААС	ЭТААС	ИСП-ОЭС		ИСП-МС	ИСП-МС с динамической реакционной ячейкой
			радиальное наблюдение плазмы	продольное наблюдение плазмы		
Al	45	0.1	2	0.9	0.006	0.0007
As	150	0.05	10	2	0.006	0.0006
Cd	0.8	0.002	0.7	0.08	0.003	0.00009
Hg	300	0.6	2	0.6	0.002	0.0001
Pb	15	0.05	6	1.4	0.001	0.00004
Sr	3	0.02	0.02	0.03	0.0008	0.00002

Таблица 5. Сравнение методов, используемых для определения элементов в рисе

Метод	Элементы	LOD, мкг/л	LOQ, мкг/л	Масса образца, (мг)	Процедура/ среда	Ссылка
1	2	3	4	5	6	7
ААС	Pb, Cd, Zn, Mn, Fe	0.13–0.35	0.42–1.16	500	Микроволновое разложение образца в 7 мл концентрированной HNO <sub>3</sub> проводили в закрытых сосудах объемом 100 мл при максимальном давлении в сосудах, установленном на 45 атм. После минерализации образец был перенесен и разбавлен до объема 50 мл. Далее применена процедура дисперсионной микротвердофазной экстракции с катионным хелатирующим агентом батофенантролинином.	[70]

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7
ЭТААС	Cd, Pb	0.0012 и 0.00048 мг/100 г	...	50–100	Влажное разложение в закрытой системе с использованием смеси концентрированной HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> (10 : 1). Затем экстрагирование в слой хлороформа комплексобразованием с 1-пирролидиндитиокарбаматом аммония (APDC) и разбавление HNO <sub>3</sub>	[71]
ИНАА	Al, As, Br, Ca, Cr, Cu, F, Fe, Hg, I, K, Mg, Mn, Mo, Na, P, Se, Sn, V, Zn	0.002– 3.324 мг/100 г	...	50–100	Короткое, среднее, длительное облучение	[71]
ИСП-ОЭС	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Al, P, S, Mo	...	...	600– 625	Влажное разложение в закрытой системе с использованием 12 мл смеси концентрированной HNO <sub>3</sub> : HClO <sub>4</sub> (10 : 1), с последующим разбавлением HNO <sub>3</sub> .	[72]
ИСП-ОЭС	Hg, Ni, Pb, Cd, Co	0.02–0.08	0.07–0.30	1000	Влажное разложение в закрытой системе с использованием 20 мл смеси концентрированной HCl : HNO <sub>3</sub> (1 : 3). Окончательно охлажденный раствор доводят до 50 мл с помощью 2% HNO <sub>3</sub> . Затем проводят метод микроэкстракции эмульгирования с помощью ультразвука с использованием в качестве экстракционного растворителя и комплексобразующего реагента соответственно CCl <sub>4</sub> и 1-(2-пиридилазо)2-нафтол (ПАН).	[73]
ИСП-ОЭС	As, Cd, Hg, Pb, Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn	0.05–1.20 мкг/кг	0.16– 4.0 мкг/кг	5000	Влажное разложение в закрытой системе с использованием 45 мл смеси концентрированной H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : HClO <sub>4</sub> : HNO <sub>3</sub> (1 : 2 : 6), смесь нагревали до температуры кипения на нагревателе и продолжали нагревание до тех пор, пока не оставалось 3 мл прозрачного экстракта, конечный объем раствора довели до 25 мл дистиллированной водой.	[61]
ИСП-МС	As, Cd, Cr, Hg, Pb, Sr, U, V, Co, Cu, Fe, Mn, Zn	0.01–1.60 мг/кг	0.01– 10.0 мг/кг	1000	Разложение с использованием системы микроволнового разложения проб смеси 5 мл HNO <sub>3</sub> , 5 мл воды и 1 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Разложение проводили по следующей программе: 85 °C (3 мин), 145 °C (9 мин), 180 °C (4 мин) и 180 °C (15 мин). После охлаждения до комнатной температуры раствор переносили в ПЭТ-бутылку объемом 25 мл и разбавляли водой.	[74]
ИСП-МС	As, Cd, Pb, Hg, Al, Sr	0.0072–0.75	0.006–1.5	500	Разложение с использованием системы микроволнового разложения проб в смеси 6.5 мл HNO <sub>3</sub> и 0.5 мл HCl. Разложение проводили при давлении 4 бар в три этапа, на первом – при температуре 120 °C в течение 5 мин; на втором – при 140 °C в течение 10 мин; на третьем – при 170 °C в течение 5 мин.	собственные исследования [75]

В настоящее время все большее распространение получил ИСП-МС. Метод основан на использовании индуктивно связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования. ИСП-МС позволяет проводить определение в одной пробе практически всех элементов Периодической системы малых (мкг/кг) и сверхмалых концентраций (нг/кг). Однако ИСП-МС имеет недостатки, основными из которых являются спектральные и неспектральные (матричные) помехи. Спектральные помехи в большинстве случаев возможно устранить, используя приборы, оснащенные столкновительными или реакционными ячейками. Одним из способов устранения неспектральных помех является разбавление, которое достаточно для нивелирования их влияния.

### *Подготовка образцов риса к анализу*

Любые результаты исследований и интерпретация результатов будут бесполезными, если проба не была представительной для партии, от которой она была отобрана [76]. Следует отбирать достаточное количество точечных проб и тщательно их перемешивать для составления совокупной (объединенной) пробы, из которой в дальнейшем будет возможно получить одну или несколько лабораторных проб. Исходную лабораторную пробу гомогенизируют для получения однородной пробы, аналитические пробы которой будут давать равнозначные аналитические результаты. У пищевых продуктов, для которых требуется использование гомогенизаторов, возможен риск загрязнения пробы вследствие абразивного истирания поверхности оборудования. По возможности следует использовать оборудование, в котором поверхности, соприкасающиеся с пищевым продуктом, покрыты пластмассовым или другим незагрязняющим материалом. После гомогенизации проба должна быть сразу извлечена из оборудования [77].

При определении содержания ТЭ в пищевой продукции особое внимание уделяют разработке методики пробоподготовки и ввода пробы, а также учету взаимного влияния элементов в анализируемой пробе.

Стадия пробоподготовки является наиболее важной стадией любой методики. В настоящее время для пробоподготовки пищевой продукции используются: сухое озоление, кислотное разложение или минерализация при нагревании в открытых сосудах и автоклавах, микроволновое нагревание в присутствии кислот. Способ сухого озоления представляет собой полное разложение органических веществ путем сжигания пробы продукта в электропечи при контролируемом температурном режиме [78, 79]. Продолжительность процесса озоления составляет 10–15 ч, при этом образуется зола, которую затем растворяют в концентрированной кислоте. Преимущество сухого озоления – возможность использования большей массы навески, что сводит к минимуму трудности гомогенизации. Проблемы озоления связаны с летучестью некоторых элементов, например Hg, As. Способ кислотной минерализации основан на разложении образца под воздействием концентрированных кислот. Обычно для разложения используют азотную кислоту и перекись водорода, поскольку серная и соляная кислоты приводят к значительным интерференционным наложениям.

В процедурах минерализации вместо традиционного нагревания чаще применяется микроволновый нагрев. Минерализации с использованием микроволнового излучения в закрытых сосудах позволяет снизить потерю летучих элементов. Применение систем микроволновой подготовки отличается экспрессностью и деструкцией проб, поскольку возможно достигнуть более высокие температуры, чем в других способах пробоподготовки. В то же время ограничения по величине навески из-за лимитируемой величины рабочего давления требует использование данной минерализации в сочетании с высокочувствительными методами анализа ЭТААС, ИСП-ОЭС и ИСП-МС (табл. 5).

Авторы работ [80–82] гомогенизировали образцы риса путем измельчения в мельнице. Навески образцов (0.5–1 г) помещали в отдельные тефлоновые сосуды систем микроволновой подготовки проб и добавляли в каждый смесь  $\text{HNO}_3$  (70%) и  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%). Разложение проводили по определенной температурной программе, например, на первом этапе образцы нагревали до 130 °С в течение 8 мин, затем выдерживали при 130 °С – 2 мин, на втором – температуру повышали до 200 °С за 8 мин и выдерживали при данной температуре в течение 5 мин [74]. После разложения содержимое сосудов охлаждали до комнатной температуры и разбавляли сверхчистой водой до 25–50 мл.

Способы подготовки образцов к анализу практически у всех авторов отличаются соотношением смеси кислот и  $\text{H}_2\text{O}_2$  и температурной программы микроволновых систем [83–86].

В работе [87] порции (~5 г) образца риса растирали пестиком в ступке. Около 0.1 г каждого образца отдельно взвешивали в тефлоновых сосудах, промытых кислотой. Добавляли аликвоту кислот высокой чистоты, включая 3 мл 67–69% азотной кислоты и 0.5 мл 32–35% соляной кислоты. Смеси оставляли стоять в

течение 3 ч при комнатной температуре, а затем помещали на плиту при 75 °С. Образцы дегазировали и добавляли 0.5 мл 27–32% перекиси водорода перед их нагреванием при 100 °С. Образцы охлаждали и дегазировали, затем в каждый сосуд добавляли 0.5 мл сверхчистой дистиллированной воды и помещали на горячую плиту при 100 °С. Пробы полностью растворяли до появления прозрачного раствора и анализировали на масс-спектрометре Agilent 7900.

Чтобы удалить любое внешнее загрязнение (например, грязь и пыль), что соответствует практике использования риса в домашнем хозяйстве, использовали процедуру промывания. Для промывания образцов выбирали девять случайно выбранных образцов белого риса, трижды промывали ультрачистой водой. Затем промытые образцы сушили при 80 °С в течение трех часов, измельчали в порошок и анализировали, применяя процедуры, используемые для невымытых образцов [87].

### ***Влияние обработки образцов риса***

На содержание минералов в рисе сильно влияет степень полировки и помола. Во время этого процесса отруби удаляются из коричневого риса, в результате чего образуются зерна белого риса. Поскольку внешние слои зерна богаче минералами, чем внутреннее ядро, в полированных и молотых зернах обычно наблюдается значительно меньшее содержание минералов [88, 89]. В исследовании [90] определены концентрации ТЭ в обработанных и необработанных зерновых продуктах (табл. 6). Концентрация ТЭ в обработанных образцах значительно ниже, чем в необработанных злаках из-за удаления их при мытье, очистке и измельчении зерна.

### ***Обсуждение результатов***

Большой объем информации, опубликованный за последние 10 лет в научных журналах [42, 74, 77, 80–82, 91–99], по определению содержания токсичных элементов в различных формах риса методом ИСП-МС представлен в таблице 7.

*Мышьяк в рисе.* Общие концентрации As в рисе сильно различаются в зависимости от сорта риса, географии, окружающей среды и условий выращивания. Высокие концентрации As накапливаются в рисе, когда его выращивают в условиях затопления. As может пространственно варьироваться в зерне, неорганический As находится выше в слоях отрубей [100].

Максимальное содержание As найдено авторами в образцах необработанного риса из Бангладеш и достигает 1.6 мг/кг [91].

Авторами [87] установлено, что медианные концентрации As в белом рисе из США составили 0.129 мг/кг, в белом рисе из Таиланда, Индии и Италии медианные концентрации – 0.136 мг/кг. Коричневый рис из США показал концентрации 0.243 мг/кг. Все средние концентрации ТЭ были выше в образцах белого и коричневого риса, чем в других зерновых; однако значительные различия наблюдались в средних концентрациях As только между рисом (белым и коричневым) и другими зернами. Это согласуется с предыдущими исследованиями [101], в которых сообщалось, что рис поглощает больше As, чем другие зерна, такие как пшеница и ячмень, из-за более высокой скорости переноса As из почвы в зерно.

Коричневый рис накапливает больше As, чем белый рис, потому что имеет зародышевый слой, который удерживает большее количество неорганического As. Шесть образцов коричневого риса и один образец белого длиннозерного риса из США превысили максимальный уровень неорганического мышьяка, установленного комиссией САС для торговли и охраны здоровья (0.2 мг/кг). Однако риски для здоровья, связанные с потреблением пищевых продуктов, загрязненных As, зависят от количества потребляемого As в день, его формы и биодоступности.

*Кадмий в рисе.* Cd накапливается в рисе, когда он выращивается в аэробных условиях [102]. Для населения с высоким содержанием Cd в рисе и его высоким потреблением, таких как Бангладеш или Япония, загрязненный Cd рис является серьезной проблемой для здоровья.

Наибольшее содержание Cd достигло в образцах необработанного риса из Китая 0.577 мг/кг [92]. Около 85% риса, употребляемого жителями США, производится в южных штатах (80%), в штате Калифорния – 20%, остальная часть импортируется из Азии, включая Таиланд, Индию и Пакистан [87]. Авторами установлено, что медианные концентрации Cd в белом рисе из США составили 0.011 мг/кг, а из Таиланда, Индии и Италии – 0.012 мг/кг. Коричневый рис из США показал концентрации 0.024 мг/кг. Ни один из образцов не превысил установленные нормы комиссии САС для Cd (0.4 мг/кг) в шлифованном рисе.

Таблица 6. Содержание токсичных элементов (мг/кг) в необработанных и обработанных злаковых продуктах

Элемент	Вид продукта	Количество исследований	Среднее значение, мг/кг	Процент (%)
Cd	Необработанный	69	0.292	86.69
	Обработанный	10	0.018	13.31
	Общее	79	0.247	100.00
Pb	Необработанный	71	0.079	78.47
	Обработанный	11	0.059	21.53
	Общее	82	0.090	100.00
As	Необработанный	29	0.384	75.22
	Обработанный	8	0.018	24.78
	Общее	37	0.238	100.00
Hg	Необработанный	10	0.017	100.00
	Общее	10	0.017	100.00

Таблица 7. Содержание токсичных элементов в различных формах риса (мг/кг), установленное методом ИСП-МС

Продукт, необработанный и обработанный	Среднее значение, мг/кг, (диапазон концентраций металлов, мг/кг)						Место произрастания (сбора)	Ссылка
	As	Cd	Pb	Hg	Al	Sr		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рис необработанный	0.47±0.39 (0.06–1.6)	0.045±0.017 (0.001–0.073)	0.71±0.29 (0.07–1.3)	...	...	...	Бангладеш	[91]
Рис необработанный	0.17±0.10	0.057±0.046	0.19±0.32	...	...	...	Бангладеш	[42]
Рис необработанный	...	0.025 (0.010–0.13)	0.020 (0.020–0.10)	...	19.52 (5.51–80.78)	...	Италия	[80]
Рис обработанный	0.067–0.858	<0.0002– 0.024	<0.002–0.139	<0.05	...	...	Аргентина	[74]
Рис необработанный	...	0.577±0.441	0.015±0.007	...	...	...	Китай	[92]
Рис необработанный	0.41±0.11 (0.29–0.58)	0.09±0.03 (0.05–0.12)	0.26±0.07 (0.19–0.39)	...	...	...	Пакистан	[93]
Рис необработанный	0.129 (0.065–0.202)	0.011 (0.0017– 0.071)	0.0056 (0.0002– 0.032)	...	...	...	США	[87]
Рис коричневый необработанный	0.243 (0.139–0.403)	0.024 (0.0077– 0.065)	0.0074 (0.0014– 0.034)	...	...	...	США	[87]
Рис необработанный	0.136 (0.058–0.183)	0.012 (0.0031– 0.027)	0.014 (0.002–0.096)	...	...	...	Италия, Индия, Тайланд	[87]
Рис белый необработанный	0.17±0.06	0.011±0.010	0.003±0.002	...	0.53±0.53	0.20±0.14	Португалия	[81]
Рис белый необработанный	0.13±0.04	0.014±0.004	...	...	8.17±2.27	1.93±0.35	Португалия	[81]
Рис пропаренный	0.16±0.05	0.005±0.003	0.003±0.002	...	0.37±0.19	0.34±0.17	Португалия	[81]
Рис коричневый необработанный	0.17±0.01	0.014±0.003	...	...	13.5±3.33	2.83±0.68	Португалия	[81]
Рис бурый необработанный	0.18±0.03	0.009±0.006	0.002±0.002	...	0.31±0.17	0.24±0.12	Португалия	[81]



Окончание таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рис шлифованный необработанный	0.24±0.09 (0.04–0.36)	<0.01	<0.05 (<0.05–0.25)	<0.01	...	1.33±0.86 (<0.86–2.47)	Казахстан	[82]
Рис молотый обработанный	0.10±0.03 (0.03–0.15)	<0.01	<0.05 (<0.05–0.08)	<0.01	...	<0.86	Казахстан	[82]
Рис молотый обработанный	0.36±0.14 (0.22–0.78)	0.03±0.02 (<0.01–0.08)	0.01±<0.05 (<0.05–0.02)	0.01	...	<0.86	Португалия	[82]
Рис молотый обработанный	0.28±0.24 (<0.05–1.16)	<0.01 (<0.01–0.03)	<0.05 (<0.05–0.04)	0.01	...	<0.86	Испания	[82]
Рис коричневый необработанный	...	0.0139 (0.010–0.0171)	0.491 (0.232–0.924)	...	...	...	Австралия	[77]
Рис обработанный	...	0.0027 (<0.0003–0.0029)	0.075 (0.030–0.100)	...	...	...	Австралия	[77]
Рис обработанный	0.289±0.049	...	0.289±0.049	...	1.10±0.36	...	Канада	[94]
Рис коричневый обработанный	...	...	0.289±0.02	...	1.5±0.4	...	Канада	[94]
Рис обработанный	0.369 (0.091–0.872)	0.0337 (0.001–0.222)	0.123 (0.005–0.574)	...	39.6 (12–94)	...	Иран	[95]
Рис обработанный	...	0.014	0.03	...	1.43	0.21	Кабо-Верде	[96]
Рис необработанный	0.016 (0.005–0.036)	0.008 (0.001–0.020)	0.004 (0.003–0.005)	0.005	1.45 (0.472–3.010)	...	Франция	[97]
Рис необработанный	0.036	0.006	<0.004	<0.0012	0.59	0.33	Великобритания	[98]
Рис необработанный	0.0120±0.0002	0.0048±0.0002	0.0050±0.0001	0.0135±0.0002	0.61±0.02	0.30±0.02	Бразилия	[99]

*Свинец в рисе.* Pb является основным загрязнителем окружающей среды, влияющим на морфофизиологические и биохимические показатели растений. Токсичность Pb препятствует прорастанию риса, длине корней/побегов, росту и конечному урожаю. Он снижает поглощение питательных веществ корнями, разрушает ультраструктуру хлоропластов и проницаемость клеточных мембран, вызывает изменения дыхательной активности листьев.

Максимальное содержание Pb найдено авторами в образцах необработанного риса из Бангладеш 1.3 мг/кг [91].

Авторами [87] установлено, что медианные концентрации Pb в белом рисе из США составили 0.0056 мг/кг, в белом рисе из Таиланда, Индии и Италии медианные концентрации – 0.014 мг/кг. Коричневый рис из США показал концентрации 0.0045 мг/кг. Ни один из образцов не превысил установленные нормы комиссии САС для Pb (0.2 мг/кг) в шлифованном рисе.

*Ртуть в рисе.* Рис биоаккумулирует метилртуть  $[CH_3Hg]^+$  в зерне. Опубликованные исследования в основном сосредоточены на китайском рисе, выращенном на загрязненный Hg почвах. Концентрации общей ртути и метилртути составляют порядка 0.1 и 0.01 мг/кг соответственно [103].

*Алюминий в рисе.* В кислой почве Al ионизируется в трехвалентный катион и становится высокотоксичным для растений. Al ограничивает рост корней, подавляет поглощение питательных веществ корнями и вызывает серьезные потери урожая культур. Более того, проблема токсичности Al для сельскохозяйственных культур обострилась во всем мире из-за интенсивного применения кислотообразующих азотных удобрений и частых выпадений кислотных дождей, вызванных ухудшением состояния окружающей среды из-за глобальных изменений климата. Хотя нейтрализация кислотности почвы путем известкования может уменьшить токсичность алюминия для растений, этот процесс является дорогостоящим, трудоемким и менее эффективным.

Предельно допустимое содержание Al для зерновых культур еще не установлено европейским законодательством, хотя в недавнем отчете EFSA подчеркивается, что оценки воздействия превышают предварительное допустимое недельное потребление (2 мг/кг массы тела), установленное комиссией САС (JECFA) в 2011 г. На рисунке 1 представлена диаграмма содержания Al в образцах риса.

Авторами [80] максимальное содержание Al определено в необработанном рисе из Италии и достигает 80.78 мг/кг, наибольшее среднее значение Al в коричневом необработанном рисе достигает 13.5 мг/кг [81].

*Стронций в рисе.* Большая часть Sr накапливается в побегах растения. В настоящее время существует ряд серьезных проблем с точным определением Sr в водных пробах и образцах пищевых продуктов: средняя концентрация Sr чрезвычайно низка, кроме того, существуют различные конкурентные ионы металлов, приводящие к высокой ионной силе, что влияет на определение Sr.

Содержание Sr в образцах необработанного риса из Португалии найдено в диапазоне от 0.20 до 2.83 мг/кг [81]. Поскольку требования по содержанию Sr в пищевых продуктах отсутствуют, то для наглядности на рисунке 2 представлена диаграмма содержания Sr в образцах риса.

Промывка белого риса для удаления любых внешних загрязнений перед анализом снижает концентрации токсичных элементов, таких как Pb и Cd, на 57 и 46% соответственно. Мытье риса сопровождается потерей эссенциальных элементов, которые способствуют нормальному функционированию организма. Концентрация содержания основных элементов снижена на 51% для Ca, 74% – для Mg, 43% – для K, 74% – для Fe и 8.3% – для Zn. Результаты согласуются с работами [74], которые сообщают, что промывание риса двойной деионизированной водой перед приготовлением приводит к большой потере основных элементов, включая Cu, Fe и Zn. Такое снижение количества основных питательных веществ может привести к дефициту питательных веществ у населения, потребляющего рис в качестве основного продукта питания, особенно у маленьких детей и беременных женщин. Требуется дополнительная работа по оптимизации соотношения риса и воды в процессе промывки, чтобы свести к минимуму значительную потерю основных питательных веществ в промытом рисе.

Представленные результаты показывают, что чередование или сочетание риса с другими зёрнами в рационе может снизить воздействие токсичных металлов и обеспечить дополнительный уровень эссенциальных элементов, которых не хватает в рисовой диете.

Согласно исследованию рынка зерновых культур в Республике Казахстан, 53% от их общего потребления составляют рис. Жители Республики Казахстан потребляют примерно 7 кг риса на человека в год. Кызылординская область, главный рисоводческий регион страны, производит 90% всего риса, производимого в стране.

В работе [82] с помощью ИСП–МС были проанализированы As(III, V), Cd, Cr, Hg, Pb, Sr, U и V в нешлифованном и измельченном рисе, собранном в Казахстане. Были исследованы образцы измельченного риса из Испании и Португалии, основных стран производителей риса в Европе. Из 146 проанализированных образцов из Казахстана ни один не превысил максимальный предел, установленный европейским законодательством и комиссией САС для Cd и Pb. Концентрации Hg и Sr были ниже LOD. Образцы португальского риса содержали самую высокую среднюю концентрацию As 0.36 мг/кг. Содержание As в образцах из Испании было 0.28 мг/кг.

При сравнении концентрации общего Cd, Hg и Pb, измеренные в измельченном рисе, полученном из Республики Казахстан, и образцов испанского и португальского риса, было обнаружено, что концентрации Hg значительно различаются ( $p < 0.05$ ). Наивысшее значение концентрации Hg обнаружено в измельченном рисе в Испании и Португалии составляет 0.01 мг/кг. В то время как португальский рис показал самые высокие средние значения Cd и Pb, рис из Испании и Казахстана был ниже LOD.

Что касается зерновых, правовые нормы Республики Казахстан установили максимально допустимые уровни для Cd, Hg и Pb в размере 0.1, 0.03 и 0.5 мг/кг соответственно, тогда как ЕС установил максимальные уровни 0.2 мг/кг для Cd и Pb, а комиссия САС указывает максимальный уровень, равный 0.4 мг/кг для Cd (табл. 2). Основываясь на этом законодательстве, можно констатировать, что концентрации Cd, Hg и Pb в товарном рисе из Республики Казахстан, Испании и Португалии, проанализированные в ходе этого исследования, были ниже установленных уровней.

Авторы работы [71] проводили анализ широкого ряда эссенциальных и токсичных элементов в рисе, коммерчески доступном на рынках Португалии и Испании. Для анализа были выбраны следующие виды риса: белый, пропаренный, коричневый и бурый. В образцах коричневого риса обнаружено значительно более высокое содержание Al, Sr и Ba по сравнению с другими видами риса. Содержание токсичных элементов в пропаренном, коричневом, буром рисе располагалось в следующем порядке: Al>Sr>As>Cd>Pb, а в белом рисе – Al>As>Sr>Cd>Pb.



Рис. 1. Содержание Al риса в образцах риса, мг/кг. Н – необработанный, \* собственные исследования, \*\* справочник [104]

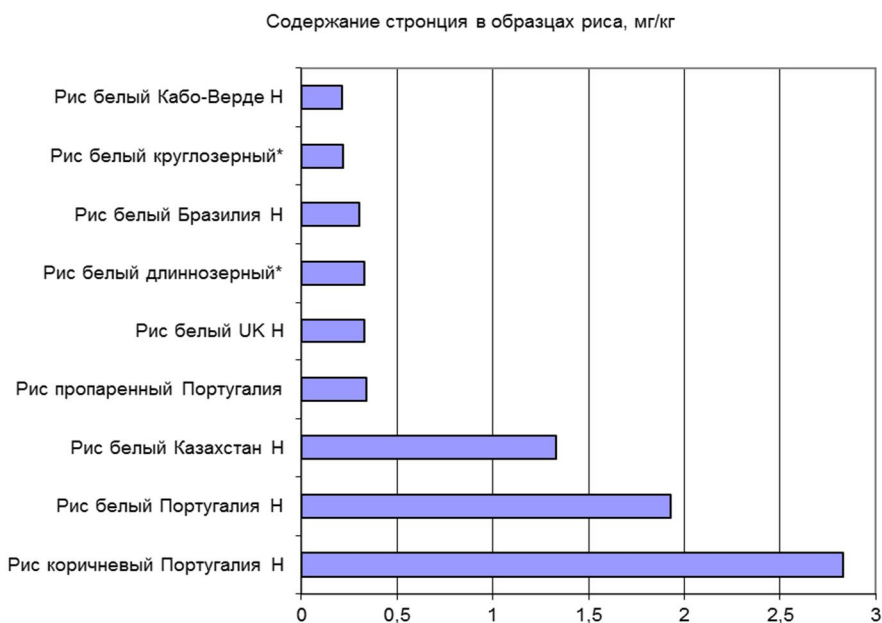


Рис. 2. Содержание Sr риса в образцах риса, мг/кг. Н – необработанный, \* собственные исследования

В нашей лаборатории разработана методика определения содержания токсичных элементов в мукомольно-крупяных изделиях методом масс-спектропии с индуктивно связанной плазмой (табл. 5). Методика измерения массовых концентраций Cd, As, Hg, Pb, Al, Sr при навеске пробы в 0.5 г позволяет определять Cd в диапазоне от 0.0008 до 70.0 мг/кг с погрешностью от 14 до 25%, As – в диапазоне от 0.002 до 70.0 мг/кг с погрешностью от 11 до 26%, Hg – в диапазоне от 0.003 до 7.0 мг/кг с погрешностью от 15 до 25%, Pb – в диапазоне от 0.01 до 70.0 мг/кг с погрешностью от 12 до 26%, Al – в диапазоне от 0.2 до 70.0 мг/кг с погрешностью от 13 до 20%, Sr – в диапазоне от 0.02 до 70.0 мг/кг с погрешностью от 12 до 20%. Были исследованы образцы риса, используемые жителями Западного Урала [105].

## Выводы

Воздействие токсичных элементов через пищу представляет собой проблему для общественного здравоохранения. В результате безопасность пищевых продуктов является проблемой, которая угрожает здоровью людей и торговле сельскохозяйственной продукцией. В этом обзоре представлено содержание токсичных элементов (As, Cd, Pb, Hg, Al и Sr) в рисе из разных географических регионов (США, Италия, Испания, Португалия, Индия, Таиланд, Китай, Казахстан). В исследовании также оценивалось влияние промывания на содержание токсичных элементов в рисе. Белый рис из Таиланда, Индии и Италии показал более высокий медианный показатель концентрации токсичных металлов, таких как As, Pb и Cd, по сравнению с белым рисом из США. Концентрации свинца и кадмия не превышали нормативов САС; однако концентрации As в коричневом рисе и одном белом рисе из США превышает стандарты САС. Белый и коричневый рис имели более высокие медианные концентрации токсичных металлов, чем другие зерна, которые, в свою очередь, имели более высокие медианные концентрации основных элементов.

Мониторинг элементного состава зерновой продукции из разных регионов поможет странам принимать обоснованные решения об импорте зерновых, таких как рис. Производители риса и других зерновых могут разработать стратегии по снижению значительного поступления токсичных элементов из почвы. Определение надлежащих процессов обработки риса, таких как промывка, дает населению информацию о снижении воздействия токсичных элементов при сохранении эссенциальных элементов в зерне.

### Финансирование

*Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.*

### Конфликт интересов

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

### Открытый доступ

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

## Список литературы

1. Киселева Т.Л., Киселева М. Рис посевной (*Oryza sativa* L.) с позиции традиционной медицины и современных научных представлений: пищевые, энергетические, лечебно-профилактические свойства, применение при сахарном диабете // Традиционная медицина. 2019. №3(58). С. 18–39.
2. Зеленский Г.Л., Зеленская О.В. Рис: от растения до диетического продукта. Краснодар, 2022. 271 с.
3. Шаззо А.А., Гюлушанян А.П., Корнена Е.П., Верещагина А.П., Шаззо Б.К. Продукты переработки риса-зерна в диетическом питании // Новые технологии. 2011. №3. С. 72–75.
4. Ahmed M.K., Shaheen N., Islam M.S., Habibullah-Al-Mamun M., Islam S., Banu C.P. Trace elements in two staple cereals (rice and wheat) and associated health risk implications in Bangladesh // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187(6). Pp. 326–337. DOI: 10.1007/s10661-015-4576-5.
5. Chandrasiri G.U., Mahanama K.R.R., Mahatantila K., Pitumpe Arachchige P.S., Liyanage R.C.M. An assessment on toxic and essential elements in rice consumed in Colombo, Sri Lanka // Applied Biological Chemistry. 2022. Vol. 65(24). Pp. 1–9. DOI: 10.1186/s13765-022-00689-8.
6. Wang Y., Yuan X., Liu L., Ma J., Fan S., Zhang Y., Li Q. Multielement Principal Component Analysis and Origin Traceability of Rice Based on ICP-MS/MS // Journal of Food Quality. 2021. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5536241.
7. Tatahmentan M., Nyachoti S., Frederick O. Okwori, Godebo T. Elemental composition of Rice and Lentils from various countries: A Probabilistic Risk Assessment of Multiple Life Stages // Journal of Food Composition and Analysis. 2022. Vol. 115. 104852. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104852.
8. Perera A.J.D., Carey M., P. Mangala C.S. De Silva, Meharg C., Meharg. A.A. Trace Elements and Arsenic Speciation of Field and Market Rice Samples in contrasting Agro-climatic Zones in Sri Lanka // Exposure and Health. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12403-022-00481-5.
9. Pedron T., Freire B.M., Castro C.E., Ribal L.F., Batista B.L. Availability of arsenic in rice grains by in vitro and in vivo (humans) assays // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2019. Vol. 56. Pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.jtemb.2019.08.014.
10. Полутина Т.Н., Михайлушкин П.В. Развитие рисопродуктового подкомплекса в стране // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2019. №76. С. 5–10. DOI: 10.21515/1999-1703-76-5-10.

11. Скальная М.Г. Макро- и микроэлементы в питании жителей Москвы // Микроэлементы в медицине. 2013. №14(3). С. 18–24.
12. Скальная М.Г., Джаисвал С.К., Пракаш Р., Пракаш Н.Т., Грабеклис А.Р., Жегалова И.В., Джан Ф., Гуо С., Тиньков А.А., Скальный А.В. Изменение содержания макроэлементов в пшенице, рисе, кукурузе и горчице в условиях гиперселеноза // Микроэлементы в медицине. 2017. Т. 18, №4. С. 8–12. DOI: 10.19112/2413-6174-2017-18-4-8-12.
13. Короткова Т.Г., Доненко А.П., Седой Ю.Н. Изменение физико-химических показателей и содержания химических элементов в зерне риса регул на разных стадиях его переработки в крупу // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2018. №4(364). С. 11–14. DOI: 10.26297/0579-3009.2018.4.2.
14. Чижикова С.С., Кумейко Т.Б., Маскаленко О.А., Туманьян Н.Г. Оценка сортов риса по технологическим признакам качества в связи с расположением зерновок в метелке // Рисоводство. 2021. №2(51). С. 27–33. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-51-2-27-33.
15. Есаулова Л.В., Лыско И.А. Анализ состояния отрасли рисоводства краснодарского края // Рисоводство. 2022. №3(56). С. 6–10. DOI: 10.33775/1684-2464-2022-56-3-6-10.
16. Zeigler R.S., Barclay A. The Relevance of Rice // Rice. 2008. Vol. 1(1). Pp. 3–10. DOI: 10.1007/s12284-008-9001-z.
17. Fraga H., Guimarães N., Santos J.A. Future Changes in Rice Bioclimatic Growing Conditions in Portugal // Agronomy. 2019. Vol. 9(11). Pp. 674–688. DOI: 10.3390/agronomy9110674.
18. Arcieri M., Ghinassi G. Rice cultivation in Italy under the threat of climatic change: Trends, technologies and research gaps // Irrigation and Drainage. 2020. Vol. 69(21). Pp. 2472–2486. DOI: 10.1002/ird.2472.
19. Squadrone S., Brizio P., Griglione A., Falsetti S., Curcio A., Abete M.C. Aluminium occurrence in plant feed from Northwestern Italy // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2021. Vol. 68(7). 126850. DOI: 10.1016/j.jtemb.2021.126850.
20. Pastorelli A.A., Angeletti R., Binato G., Mariani M.B., Cibin V., Morelli S., Ciardullo S., Stacchini P. Exposure to cadmium through Italian rice (*Oryza sativa* L.): consumption and implications for human health // Journal of Food Composition and Analysis. 2018. Vol. 69. Pp. 115–121. DOI: 10.1016/j.jfca.2018.02.005.
21. Silva A., Pereira A., Silva L., Pena A. Arsenic in Portuguese Rice: Is There Any Risk? // Foods. 2022. Vol. 11(3). Pp. 277–290. DOI: 10.3390/foods11030277.
22. Боев В.М., Кряжева Е.А., Бегун Д.Н., Борщук Е.Л., Кряжев Д.А. Гигиеническая оценка риска здоровью населения при комбинированном пероральном поступлении тяжелых металлов // Анализ риска здоровью в гигиене. 2019. №2. С. 35–43. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.04.
23. Горбачев Д.О., Сазонова О.В., Бородин Л.М., Гаврюшин М.Ю. Анализ риска здоровью трудоспособного населения, обусловленного контаминацией пищевых продуктов (опыт Самарской области) // Анализ риска здоровью. 2019. №3. С. 42–49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.05.eng.
24. Лыжина А.В., Унгурияну Т.Н., Родиманов А.В. Риск здоровью населения при воздействии тяжелых металлов, загрязняющих продовольственное сырье и пищевые продукты // Здоровье населения и среда обитания. 2018. №7. С. 4–7.
25. Li T., Song Y., Yuan X., Li J., Ji J., Fu X., Zhang Q., Guo S. Incorporating Bioaccessibility into Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Rice (*Oryza sativa* L.): A Probabilistic-Based Analysis // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2018. Vol. 66, no. 22. Pp. 5683–5690. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b01525.
26. Song Y., Li H., Li J., Mao C., Ji J., Yuan X., Li T., Ayoko G.A., Frost R.L., Feng Y. Multivariate linear regression model for source apportionment and health risk assessment of heavy metals from different environmental media // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 165. Pp. 555–563. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.049.
27. Амелин В.Г., Лаврухина О.И. Обеспечение безопасности пищевых продуктов средствами химического анализа // Журнал аналитической химии. 2017. Т. 72, №1. С. 3–49. DOI: 10.7868/S0044450217010030.
28. Бочаров Е.П., Зиятдинов В.Б., Фролова О.А. Характеристика химического загрязнения пищевых продуктов // Вопросы питания. 2018. Т. 87, №5. С. 178–179. DOI: 10.24411/0042-8833-2018-10286.
29. 24th Australian Total Diet Study // Food Standards. URL: <https://www.foodstandards.gov.au/publications/Pages/24th-Australian-Total-Diet-Study.aspx>.
30. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. М., 2004. 272 с.
31. Кузубова Л.И., Шуваева О.В., Аношин Г.Н. Метилртуть в окружающей среде (распространение, образование в природе, методы определения) // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2000. №59. С. 1–82.
32. Кузубова Л.И., Шуваева О.В., Аношин Г.Н. Элементы-экоотоксиканты в пищевых продуктах. Гигиенические характеристики, нормативы содержания в пищевых продуктах, методы определения // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2000. №58. С. 1–67.
33. Ashraf U., Kanu A.S., Mo Z., Hussain S., Anjum S.A., Khan I., Abbas R.N., Tang X. Lead toxicity in rice: effects, mechanisms, and mitigation strategies – a mini review // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22(23). Pp. 18318–18332. DOI: 10.1007/s11356-015-5463-x.
34. Гулиева С.В., Керимова Р.Дж., Юсифова М.Ю. Влияние тяжелых металлов на биохимические процессы в организме человека // Медицинские науки. 2018. №12 (39). С. 77–81.
35. Ribeiro C., de Marcos Lapaz A., de Freitas-Silva L., Ribeiro K.V.G., Yoshida C.H.P., Dal-Bianco M., Cambraia J. Aluminum promotes changes in rice root structure and ascorbate and glutathione metabolism // Physiol. Mol. Biol. Plants. 2022. Vol. 28. Pp. 2085–2098. DOI: 10.1007/s12298-022-01262-9.

36. Wang Y., Yang S., Li C., Hu T., Hou S., Bai Q., Ji X., Xu F., Guo C., Huang M., Cai Y., Liu J. The plasma membrane-localized OsNIP1;2 mediates internal aluminum detoxification in rice // *Sec. Plant Abiotic Stress*. 2022. Vol. 13. 970270. DOI: 10.3389/fpls.2022.970270.
37. Чеснокова С.М., Савельев О.В. Основы токсикологии и экотоксикологии: учеб. пособие. Владимир, 2019. 132 с.
38. Ramadan A.B., Diab H.M., Monged M.H.E. Distribution of <sup>137</sup>Cs and <sup>85</sup>Sr in selected Egyptian plants after foliar contamination // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 235–236. 106648. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106648.
39. Kaoru A., Miyuki S., Akira K. Determination of the Geographic Origin of Rice by Chemometrics with Strontium and Lead Isotope Ratios and Multielement Concentrations // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. Vol. 60(7). Pp. 1628–1634. DOI: 10.1021/jf204296p.
40. Collado-López S., Betanzos-Robledo L., Téllez-Rojo M.M., Lamadrid-Figueroa H., Reyes M., Ríos C., Cantoral A. Heavy Metals in Unprocessed or Minimally Processed Foods Consumed by Humans Worldwide: A Scoping Review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(14). 8651. DOI: 10.3390/ijerph19148651.
41. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M., Masunaga S. Trace metals in soil and vegetables and associated health risk assessment // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2014. Vol. 186(12). Pp. 8727–8739. DOI: 10.1007/s10661-014-4040-y.
42. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M., Masunaga S. Assessment of trace metals in foodstuffs grown around the vicinity of industries in Bangladesh // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015. Vol. 42. Pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.jfca.2014.12.031.
43. Aazami J., Moradpour H., KianiMehr N. A Review of Biotic Indices for Heavy Metals in Polluted Environment // *Human & Environment*. 2017. Vol. 15(1). Pp. 13–24.
44. Chen H., Yuan X., Li T., Hu S., Ji J., Wang C. Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil-crop systems of the industrialization region, China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 126. Pp. 193–201. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.042.
45. Wang Y., Xu W., Li J., Song Y., Hua M., Li W., Wen Y., Li T., He X. Assessing the fractionation and bioavailability of heavy metals in soil-rice system and the associated health risk // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44(2). Pp. 301–318. DOI: 10.1007/s10653-021-00876-4.
46. Tong G., Wu S., Yuan Y., Li F., Chen L., Yan D. Modeling of Trace Metal Migration and Accumulation Processes in a Soil-Wheat System in Lihe Watershed, China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15(11). Pp. 2432–2448. DOI: 10.3390/ijerph15112432.
47. Chen L., Wang G., Wu S., Xia Z., Cui Z., Wang C., Zhou S. Heavy Metals in Agricultural Soils of the Lihe River Watershed, East China: Spatial Distribution, Ecological Risk, and Pollution Source // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16(12). Pp. 2094–2111. DOI: 10.3390/ijerph16122094.
48. Chen L., Zhou S., Yang Q., Li Q., Xing D., Xiao Y., Tang C. Pb Content, Risk Level and Primary-Source Apportionment in Wheat and Rice Grains in the Lihe River Watershed, Taihu Region, Eastern China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18(12). Pp. 6256–6273. DOI: 10.3390/ijerph18126256.
49. Скальная М.Г., Пракаш Н.Т., Айсувакова О.П., Грабеклис А.Р., Киричук А.А., Левина М.М., Джаисвал С.К., Пракаш Р., Тиньков А.А. Влияние высокого уровня селена в почве на кумуляцию эссенциальных элементов в зерне и муке из пшеницы, риса и кукурузы // *Микроэлементы в медицине*. 2019. Т. 20, №1. С. 59–65. DOI: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-59-65.
50. Williams P.N., Villada A., Deacon C., Raab A., Figuerola J., Green A.J., Feldmann J., Meharg A.A. Greatly Enhanced Arsenic Shoot Assimilation in Rice Leads to Elevated Grain Levels Compared to Wheat and Barley // *Environmental Science and Technology*. 2007. Vol. 41. Pp. 6854–6859. DOI: 10.1021/es070627i.
51. Meharg A.A., Norton G., Deacon C., Williams P., Adomako E.E., Price A., Zhu Y., Li G., Zhao F.-J., McGrath S. Variation in Rice Cadmium Related to Human Exposure // *Environmental Science and Technology*. 2013. Vol. 47. Pp. 5613–5618. DOI: 10.1021/es400521h.
52. Khanam R., Kumar A., Nayak A.K., Shahid Md., Tripathi R., Vijayakumar S., Bhaduri D., Kumar U., Mohanty S., Panneerselvam P. Metal (Loids) (as, Hg, Se, Pb and Cd) in Paddy Soil: Bioavailability and Potential Risk to Human Health // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 699. 134330. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134330.
53. Wang S., Wu W., Liu F., Liao R., Hu Y. Accumulation of heavy metals in soil-crop systems: a review for wheat and corn // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24(18). Pp. 15209–15225. DOI: 10.1007/s11356-017-8909-5.
54. Hansen T.H., Lombi E., Fitzgerald M., Laursen K.H., Frydenvang J., Husted S., Boualaphanh C., Resurreccion A., Howard D.L., de Jonge M.D., Paterson D., Schjoerring J.K. Losses of essential mineral nutrients by polishing of rice differ among genotypes due to contrasting grain hardness and mineral distribution // *Journal of Cereal Science*. 2012. Vol. 56(2). Pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.07.002.
55. Mohidem N.A., Hashim N., Shamsudin R., Che Man H. Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content // *Agriculture*. 2022. Vol. 12(6). 741. DOI: 10.3390/agriculture12060741.
56. Nawab J., Ghani J., Khan S., Xiaoping W. Minimizing the risk to human health due to the ingestion of arsenic and toxic metals in vegetables by the application of biochar, farmyard manure and peat moss // *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 214. Pp. 172–183. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.02.093.

57. Nawab J., Khan S., Shah M.T., Khan K., Huang Q., Ali R. Quantification of Heavy Metals in Mining Affected Soil and Their Bioaccumulation in Native Plant Species // *International Journal of Phytoremediation*. 2015. Vol. 17(9). Pp. 801–813. DOI: 10.1080/15226514.2014.981246.
58. Зайцева Н.В. Анализ рисков для здоровья населения Российской Федерации, обусловленных загрязнением пищевых продуктов // *Анализ риска здоровью*. 2018. №4. С. 13–23. DOI: 10.21668/health.risk/2018.4.02.
59. Фролова О.А., Бочаров Е.П., Ахтямова Л.А. Оценка риска от воздействия химических контаминантов в пищевых продуктах // *Гигиена и санитария*. 2016. №95(8). С. 743–748. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-8-743-748.
60. Mataveli L.R.V., Buzzo M.L., Arauz L.J.de, Carvalho M.de F.H., Arakaki E.E.K., Matsuzaki R., Tiglia P. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS // *Journal of analytical methods in chemistry*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/3968786.
61. Shariatifar N., Rezaei M., Alizadeh Sani M., Alimohammadi M., Arabameri M. Assessment of Rice Marketed in Iran with Emphasis on Toxic and Essential Elements; Effect of Different Cooking Methods // *Biological Trace Element Research*. 2020. Vol. 198. Pp. 721–731. DOI: 10.1007/s12011-020-02110-1.
62. Tattibayeva D., Nebot C., Miranda J.M., Abuova A.B., Baibatayrov T.A., Kizatova M.Z., Cepeda A., Franco C.M. A study on toxic and essential elements in wheat grain from the Republic of Kazakhstan // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 23. Pp. 5527–5537. DOI: 10.1007/s11356-015-5728-4.
63. Тугельян В.А., Жилинская Н.В., Саркисян В.А., Кочеткова А.А. Анализ нормативно-методической базы в сфере специализированной пищевой продукции в Российской Федерации // *Вопросы питания*. 2017. Т. 86, №6. С. 29–35.
64. Codex Alimentarius Commission. Codex general standard for contaminants and toxins in food and feed (CODEX STAN 193-1995 Rev. 1997–2014). [Электронный ресурс]. URL: [http://www.codexalimentarius.net/web/standeard\\_list.do](http://www.codexalimentarius.net/web/standeard_list.do).
65. Commission Regulation (EU) No 836/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 333/2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo(a)pyrene in foodstuffs // *Off. J. Eur. Union*. 2011. Vol. 215. Pp. 9–16.
66. Commission Regulation (EC) No 333/2007 of 28 March 2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo(a)pyrene in foodstuffs // *Off. J. Eur. Union*. 2007. Vol. L88. Pp. 29–38.
67. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М., 2002. 269 с.
68. ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции. М., 2011. 173 с.
69. Пределы обнаружения приборов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.epac-service.ru/Katalogi/Oborudovanie-dlya-hromatografii-i-spektroskopii/Spektroskopiya/Predely-obnaruzeniya-priborov/>.
70. Feist B., Sitko R. Method for the determination of Pb, Cd, Zn, Mn and Fe in rice samples using carbon nanotubes and cationic complexes of batophenanthroline // *Food Chemistry*. 2017. Vol. 249. Pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.12.082.
71. Parengam M., Judprasong K., Srianujata S., Jittinandana S., Laoharojanaphand S., Busamongko A. Study of nutrients and toxic minerals in rice and legumes by instrumental neutron activation analysis and graphite furnace atomic absorption spectrophotometry // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2010. Vol. 23(4). Pp. 340–345. DOI: 10.1016/j.jfca.2009.12.012.
72. Molina L., Lapis J.R., Sreenivasulu N., Cuevas R.P.O. Determination of Macronutrient and Micronutrient Content in Rice Grains Using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) // *Rice Grain Quality*. 2018. Pp. 253–264. DOI: 10.1007/978-1-4939-8914-0\_14.
73. Ebrahimi-Najafabadi H., Pasdaran A., Rezaei Bezenjani R., Bozorgzadeh E. Determination of toxic heavy metals in rice samples using ultrasound assisted emulsification microextraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 289. Pp. 26–32. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.03.046.
74. Londonio A., Morzán E., Smichowski P. Determination of toxic and potentially toxic elements in rice and rice-based products by inductively coupled plasma-mass spectrometry // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 284. Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.104.
75. Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Гилева К.О., Вейхман Г.А., Стенно Е.В., Недошитова А.В., Волкова М.В. Определение содержания токсичных элементов в мукомольно-крупяных изделиях методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // *Вопросы питания*. 2023. Т. 92, №1. С. 45–54.
76. Васильев В.П. Аналитическая химия. В 2 кн. Кн. 1: Титриметрические и гравиметрические методы анализа: учеб. для студ. вузов, обучающихся по химико-технол. спец. М., 2007. 366 с.
77. Rahman M.A., Rahman M.M., Reichman S.M. et al. Heavy metals in Australian grown and imported rice and vegetables on sale in Australia: Health hazard // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 100. Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.11.024.
78. Низамудинова Н.Р., Сафарова В.И., Хатмуллина Р.М., Тельцова Л.З., Сираева И.Н. Определение селена, мышьяка и сурьмы в образцах растительного происхождения методом ААС-ЭТА // *Башкирский химический журнал*. 2019. Т. 26, №1. С. 48–53.
79. Литвинский В.А., Гришина Е.А., Носиков В.В., Сушкова Л.О. Применение комплексного инструментального подхода для определения содержания кадмия в растениях и продукции растениеводства // *Агрохимический вестник*. 2018. №6. С. 7–12.

80. Brizio P., Benedetto A., Squadrone S., Curcio A., Pellegrino M., Ferrero M., Abete M.C. Heavy metals and essential elements in Italian cereals // *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2016. Vol. 9. Pp. 261–267. DOI: 10.1080/19393210.2016.1209572.
81. Pinto E., Almeida A., Ferreira I.M.P.L.V.O. Essential and non-essential/toxic elements in rice available in the Portuguese and Spanish markets // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2016. Vol. 48. Pp. 81–87. DOI: 10.1016/j.jfca.2016.02.008.
82. Tattibayeva D., Nebot C., Miranda J.M., Cepeda A., Mateyev E., Erkebaev M., Franco C.M. A study on toxic and essential elements in rice from the Republic of Kazakhstan: comparing the level of contamination in rice from the European Community // *Environmental Geochemistry and Health*. 2015. Vol. 38, no. 1. Pp. 85–98. DOI: 10.1007/s10653-015-9687-y.
83. Vidmar J., Hässmann L., Loeschner K. Single-Particle ICP-MS as a Screening Technique for the Presence of Potential Inorganic Nanoparticles in Food // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021. Vol. 69 (34). Pp. 9979–9990. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c07363.
84. Langasco I., Barracu F., Deroma M.A., López-Sánchez J.F., Mara A., Meloni P., Pilo M.I., Estrugo À.S., Sanna G., Spano N., Spanu A. Assessment and validation of ICP-MS and IC-ICP-MS methods for the determination of total, extracted and speciated arsenic. Application to samples from a soil-rice system at varying the irrigation method // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 302B. 114105. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114105.
85. Herrero Fernández Z., Estevez Álvarez J.R., Montero Álvarez A., Muñoz Ugarte O., Pupo González I., Rodríguez González M., Dos Santos Júnior J.A., Bezerra M.B.C.F., Dos Santos Junior O.P. Metal contaminants in rice from Cuba analyzed by ICP-MS, ICP-AES and CVAAS // *Food Additives and Contaminants: Part B Surveill*. 2021. Vol. 14(1). Pp. 59–65. DOI: 10.1080/19393210.2020.1870576.
86. Li D., Zhang Q., Sun D., Yang C., Luo G. Accumulation and risk assessment of heavy metals in rice: a case study for five areas of Guizhou Province, China // *Medicine. Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29 (56). Pp. 84113–84124. DOI: 10.1007/s11356-022-21739-0.
87. TatahMentan M., Nyachoti S., Scott L., Phan N., Okwori F.O., Felemban N., Godebo T.R. Toxic and Essential Elements in Rice and Other Grains from the United States and Other Countries // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17 (21). Pp. 8128–8140. DOI: 10.3390/ijerph17218128.
88. Hansen T.H., Lombi E., Fitzgerald M., Laursen K.H., Frydenvang J., Husted S., Boualaphanh C., Resurreccion A., Howard D.L., de Jonge M.D., Paterson D., Schjoerring J.K. Losses of essential mineral nutrients by polishing of rice differ among genotypes due to contrasting grain hardness and mineral distribution // *Journal of Cereal Science*. 2012. Vol. 56 (2). Pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.07.002.
89. Mohidem N.A., Hashim N., Shamsudin R., Che Man H. Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content // *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (6). 741. DOI: 10.3390/agriculture12060741.
90. Khaneghah A.M., Fakhri Y., Nematollahi A., Pirhadi M. Pre-proof Potentially toxic elements (PTEs) in cereal-based foods: A systematic review and meta-analysis // *Trends in Food Science & Technology Journal*. 2020. Vol. 96. Pp. 30–44. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.007.
91. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M. Heavy metals in cereals and pulses: health implications in Bangladesh // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014. Vol. 62. Pp. 10828–10835. DOI: 10.1021/jf502486q.
92. Chen L., Zhou S., Shi Y., Wang C., Li B., Li Y., Wu S. Heavy metals in food crops, soil, and water in the Lihe River Watershed of the Taihu Region and their potential health risks when ingested // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 615. Pp. 141–149. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.230.
93. Nawab J., Farooqi S., Xiaoping W., Khan S., Khan A. Levels, dietary intake, and health risk of potentially toxic metals in vegetables, fruits, and cereal crops in Pakistan // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Pp. 5558–5571. DOI: 10.1007/s11356-017-0764-x.
94. Sadiq N., Beauchemin D. Optimization of the operating conditions of solid sampling electrothermal vaporization coupled to inductively coupled plasma optical emission spectrometry for the sensitive direct analysis of powdered rice // *Analytica Chimica Acta*. 2014. Vol. 851. Pp. 23–29. DOI: 10.1016/j.aca.2014.09.017.
95. Djahed B., Taghavi M., Farzadkia M. et al. Stochastic exposure and health risk assessment of rice contamination to the heavy metals in the market of Iranshahr, Iran // *Food and Chemical Toxicology*. 2018. Vol. 115. Pp. 405–412. DOI: 10.1016/j.fct.2018.03.040.
96. Rubio-Armendáriz C., Paz S., Gutiérrez Á.J., Furtado V.G., González-Weller D., Revert C., Hardisson A. Toxic Metals in Cereals in Cape Verde: Risk Assessment Evaluation // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 7. Pp. 3833–3846. DOI: 10.3390/ijerph18073833.
97. Millour S., Noël L., Kadar A., Chekri R., Vastel C., Sirot V., Leblanc J., Guérin T. Pb, Hg, Cd, As, Sb and Al levels in foodstuffs from the 2nd French total diet study // *Food Chemistry*. 2011. Vol. 126 (4). Pp. 1787–1799. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.086.
98. Baxter M., Brereton N. Total diet study of metals and other elements in food. Report prepared for the UK Food Standards Agency (FS102081) // *The Food and Environment Research Agency*. 2015. Pp. 1–69.
99. Nardi E.P., Evangelista F.S.B., Tormen L., Saint’Pierre T.D., Curtius A.J., Souza S.S., Barbosa F. The Use of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) for the Determination of Toxic and Essential Elements in Different Types of Food Samples // *Food Chemistry*. 2009. Vol. 112, no. 3. Pp. 727–732. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.06.010.



100. Zhao F., Zhu Y., Meharg A.A. Methylated Arsenic Species in Rice: Geographical Variation, Origin, and Uptake Mechanisms // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47 (9). Pp. 3957–3966. DOI: 10.1021/es304295n.
101. Williams P.N., Villada A., Deacon C., Raab A., Figuerola J., Green A.J., Feldmann J., Meharg A.A. Greatly Enhanced Arsenic Shoot assimilation in Rice Leads to Elevated Grain Levels Compared to Wheat and Barley // *Environmental Science and Technology*. 2007. Vol. 41. Pp. 6854–6859. DOI: 10.1021/es070627i.
102. Sun L., Zheng M., Liu H., Peng S., Huang J., Cui K., Nie L. Water Management Practices Affect Arsenic and Cadmium Accumulation in Rice Grains // *The Scientific World Journal*. 2014. Pp. 1–6. DOI: 10.1155/2014/596438.
103. Li Y., Zhao J., Zhang B., Liu Y., Xu X., Li Y., Li B., Gao Y., Chai Z. The influence of iron plaque on the absorption, translocation and transformation of mercury in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to different mercury species // *Plant and Soil*. 2016. Vol. 398. Pp. 87–97. DOI: 10.1007/s11104-015-2627-x.
104. Скурихина И.М. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник. М., 2002. 236 с.
105. Патент №2779425 (РФ). Способ измерений массовых концентраций алюминия, мышьяка, стронция, кадмия, свинца, ртути в мукомольно-крупяных и хлебобулочных изделиях методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / Т.С. Уланова, Н.В. Зайцева, Е.В. Стенно, Г.А. Вейхман, А.В. Недошитова, М.В. Волкова, А.Е. Николаева. – 06.09.2022.

*Поступила в редакцию 6 марта 2023 г.*

*После переработки 1 сентября 2023 г.*

*Принята к публикации 14 сентября 2023 г.*

Zaytseva N.V., Ulanova T.S., Veykhman G.A., Gileva K.O.\* , Stenno Ye.V., Nedoshitova A.V. ASSESSMENT OF INTERNATIONAL PRACTICE OF TOXIC ELEMENTS DETERMINATION IN RICE BY THE METHOD OF MASS SPECTROMETRY WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA

*Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, Monastyrskaya st., 82, Perm, 614045, Russia, ksenimanilova@mail.ru*

Food safety is a major responsibility of public healthcare. Therefore, challenges related to determining toxic elements (As, Cd, Pb, Hg, Al and Sr) in various food products need to be tackled. This paper focuses on systematizing international experience of determining toxic elements in different kinds of rice (they differ as per a type of grain, industrial processing, and geographical origin) by using mass spectrometry with inductively coupled plasma. Rice accumulates more metals than any other cereal due to its high absorbability and is among primary sources of toxic metals introduction. Median concentrations of such toxic metals as As, Pb and Cd were higher in white rice from Thailand, India and Italy than from the USA. Lead and cadmium concentrations were not higher than levels recommended by the Codex; however, As concentrations in brown rice and one sort of white rice from the USA were higher than the Codex standards. Still, health risks caused by consuming food products which are contaminated with As depend on daily As consumption, as well as on its form and biological availability. Median concentrations of toxic metals were higher in white and brown rice than in other grains. When white rice was washed out before the tests to remove any external contamination, this resulted in decreasing concentrations of such toxic elements as Pb and Cd, by 57% and 46% accordingly. Rice washing involves losing basic elements which make for proper functioning of the body. Additional efforts are required to optimize rice to water ratio in washing in order to minimize substantial losses of basic ingredients and nutrients in washed rice. The research results indicate that it is advisable to eat different kinds of rice or combine it with other cereals in food rations. This can reduce exposure to toxic metals and provide additional quantities of essential elements which are in certain deficiency in a rice-based diet.

*Keywords:* rice, type of grain, industrial processing, geographical origin, toxic elements, mass spectrometry with inductively coupled plasma.

**For citing:** Zaytseva N.V., Ulanova T.S., Veykhman G.A., Gileva K.O., Stenno Ye.V., Nedoshitova A.V. *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 5–25. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240212641.

\* Corresponding author.

**References**

1. Kiseleva T.L., Kiseleva M. *Traditsionnaya meditsina*, 2019, no. 3(58), pp. 18–39. (in Russ.).
2. Zelenskiy G.L., Zelenskaya O.V. *Ris: ot rasteniya do diyeticheskogo produkta*. [Rice: from plant to dietary product]. Krasnodar, 2022, 271 p. (in Russ.).
3. Shazzo A.A., Gylushanyan A.P., Kornena Ye.P., Vereshchagina A.P., Shazzo B.K. *Novyye tekhnologii*, 2011, no. 3, pp. 72–75. (in Russ.).
4. Ahmed M.K., Shaheen N., Islam M.S., Habibullah-Al-Mamun M., Islam S., Banu C.P. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, vol. 187(6), pp. 326–337. DOI: 10.1007/s10661-015-4576-5.
5. Chandrasiri G.U., Mahanama K.R.R., Mahatantila K., Pitumpe Arachchige P.S., Liyanage R.C.M. *Applied Biological Chemistry*, 2022, vol. 65(24), pp. 1–9. DOI: 10.1186/s13765-022-00689-8.
6. Wang Y., Yuan X., Liu L., Ma J., Fan S., Zhang Y., Li Q. *Journal of Food Quality*, 2021, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5536241.
7. Tatahmentan M., Nyachoti S., Frederick O. Okwori, Godebo T. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, vol. 115, 104852, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104852.
8. Perera A.J.D., Carey M., P. Mangala C.S. De Silva, Meharg C., Meharg. A.A. *Exposure and Health*, 2022, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12403-022-00481-5.
9. Pedron T., Freire B.M., Castro C.E., Ribal L.F., Batista B.L. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, vol. 56, pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.jtemb.2019.08.014.
10. Polutina T.N., Mikhaylushkin P.V. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, no. 76, pp. 5–10. DOI: 10.21515/1999-1703-76-5-10. (in Russ.).
11. Skal'naya M.G. *Mikroelementy v meditsine*, 2013, no. 14(3), pp. 18–24. (in Russ.).
12. Skal'naya M.G., Dzhaisval S.K., Prakash R., Prakash N.T., Grabeklis A.R., Zhegalova I.V., Dzhan F., Guo S., Tin'kov A.A., Skal'nyy A.V. *Mikroelementy v meditsine*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 8–12. DOI: 10.19112/2413-6174-2017-18-4-8-12. (in Russ.).
13. Korotkova T.G., Donenko A.P., Sedoy Yu.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2018, no. 4(364), pp. 11–14. DOI: 10.26297/0579-3009.2018.4.2. (in Russ.).
14. Chizhikova S.S., Kumeyko T.B., Maskalenko O.A., Tuman'yan N.G. *Risovodstvo*, 2021, no. 2(51), pp. 27–33. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-51-2-27-33. (in Russ.).
15. Yesaulova L.V., Lysko I.A. *Risovodstvo*, 2022, no. 3(56), pp. 6–10. DOI: 10.33775/1684-2464-2022-56-3-6-10. (in Russ.).
16. Zeigler R.S., Barclay A. *Rice*, 2008, vol. 1(1), pp. 3–10. DOI: 10.1007/s12284-008-9001-z.
17. Fraga H., Guimarães N., Santos J.A. *Agronomy*, 2019, vol. 9(11), pp. 674–688. DOI: 10.3390/agronomy9110674.
18. Arcieri M., Ghinassi G. *Irrigation and Drainage*, 2020, vol. 69(21), pp. 2472–2486. DOI: 10.1002/ird.2472.
19. Squadrone S., Brizio P., Griglione A., Falsetti S., Curcio A., Abete M.C. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2021, vol. 68(7), 126850. DOI: 10.1016/j.jtemb.2021.126850.
20. Pastorelli A.A., Angeletti R., Binato G., Mariani M.B., Cibin V., Morelli S., Ciardullo S., Stacchini P. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2018, vol. 69, pp. 115–121. DOI: 10.1016/j.jfca.2018.02.005.
21. Silva A., Pereira A., Silva L., Pena A. *Foods*, 2022, vol. 11(3), pp. 277–290. DOI: 10.3390/foods11030277.
22. Boyev V.M., Kryazheva Ye.A., Begun D.N., Borshchuk Ye.L., Kryazhev D.A. *Analiz riska zdorov'yu v gigiyene*, 2019, no. 2, pp. 35–43. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.04. (in Russ.).
23. Gorbachev D.O., Sazonova O.V., Borodina L.M., Gavryushin M.Yu. *Analiz riska zdorov'yu*, 2019, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.05.eng. (in Russ.).
24. Lyzhina A.V., Unguryanu T.N., Rodimanov A.V. *Zdorov'ye naseleniya i sreda obitaniya*, 2018, no. 7, pp. 4–7. (in Russ.).
25. Li T., Song Y., Yuan X., Li J., Ji J., Fu X., Zhang Q., Guo S. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, vol. 66, no. 22, pp. 5683–5690. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b01525.
26. Song Y., Li H., Li J., Mao C., Ji J., Yuan X., Li T., Ayoko G.A., Frost R.L., Feng Y. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 165, pp. 555–563. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.049.
27. Amelin V.G., Lavrukhina O.I. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2017, vol. 72, no. 1, pp. 3–49. DOI: 10.7868/S0044450217010030. (in Russ.).
28. Bocharov Ye.P., Ziatdinov V.B., Frolova O.A. *Voprosy pitaniya*, 2018, vol. 87, no. 5, pp. 178–179. DOI: 10.24411/0042-8833-2018-10286. (in Russ.).
29. *24th Australian Total Diet Study // Food Standarts*. URL: <https://www.foodstandards.gov.au/publications/Pages/24th-Australian-Total-Diet-Study.aspx>.
30. Skal'nyy A.V., Rudakov I.A. *Bioelementy v meditsine*. [Bioelements in medicine]. Moscow, 2004, 272 p. (in Russ.).
31. Kuzubova L.I., Shuvayeva O.V., Anoshin G.N. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury*, 2000, no. 59, pp. 1–82. (in Russ.).
32. Kuzubova L.I., Shuvayeva O.V., Anoshin G.N. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury*, 2000, no. 58, pp. 1–67. (in Russ.).
33. Ashraf U., Kanu A.S., Mo Z., Hussain S., Anjum S.A., Khan I., Abbas R.N., Tang X. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22 (23), pp. 18318–18332. DOI: 10.1007/s11356-015-5463-x.
34. Guliyeva S.V., Kerimova R.Dzh., Yusifova M.Yu. *Meditsinskiye nauki*, 2018, no. 12 (39), pp. 77–81. (in Russ.).

35. Ribeiro C., de Marcos Lapaz A., de Freitas-Silva L., Ribeiro K.V.G., Yoshida C.H.P., Dal-Bianco M., Cambraia J. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 2022, vol. 28, pp. 2085–2098. DOI: 10.1007/s12298-022-01262-9.
36. Wang Y., Yang S., Li C., Hu T., Hou S., Bai Q., Ji X., Xu F., Guo C., Huang M., Cai Y., Liu J. *Sec. Plant Abiotic Stress*, 2022, vol. 13, 970270. DOI: 10.3389/fpls.2022.970270.
37. Chesnokova S.M., Savel'yev O.V. *Osnovy toksikologii i ekotoksikologii: ucheb. posobiye*. [Fundamentals of toxicology and ecotoxicology: textbook]. Vladimir, 2019, 132 p. (in Russ.).
38. Ramadan A.B., Diab H.M., Monged M.H.E. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 235–236, 106648. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106648.
39. Kaoru A., Miyuki S., Akira K. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, vol. 60(7), pp. 1628–1634. DOI: 10.1021/jf204296p.
40. Collado-López S., Betanzos-Robledo L., Téllez-Rojo M.M., Lamadrid-Figueroa H., Reyes M., Ríos C., Cantoral A. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19(14), 8651. DOI: 10.3390/ijerph19148651.
41. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M., Masunaga S. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186(12), pp. 8727–8739. DOI: 10.1007/s10661-014-4040-y.
42. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M., Masunaga S. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, vol. 42, pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.jfca.2014.12.031.
43. Aazami J., Moradpour H., KianiMehr N. *Human & Environment*, 2017, vol. 15(1), pp. 13–24.
44. Chen H., Yuan X., Li T., Hu S., Ji J., Wang C. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 126, pp. 193–201. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.042.
45. Wang Y., Xu W., Li J., Song Y., Hua M., Li W., Wen Y., Li T., He X. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, vol. 44(2), pp. 301–318. DOI: 10.1007/s10653-021-00876-4.
46. Tong G., Wu S., Yuan Y., Li F., Chen L., Yan D. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, vol. 15(11), pp. 2432–2448. DOI: 10.3390/ijerph15112432.
47. Chen L., Wang G., Wu S., Xia Z., Cui Z., Wang C., Zhou S. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16(12), pp. 2094–2111. DOI: 10.3390/ijerph16122094.
48. Chen L., Zhou S., Yang Q., Li Q., Xing D., Xiao Y., Tang C. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18(12), pp. 6256–6273. DOI: 10.3390/ijerph18126256.
49. Skal'naya M.G., Prakash N.T., Aysuvakova O.P., Grabeklis A.R., Kirichuk A.A., Levina M.M., Dzhaisval S.K., Prakash R., Tin'kov A.A. *Mikroelementy v meditsine*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 59–65. DOI: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-59-65. (in Russ.).
50. Williams P.N., Villada A., Deacon C., Raab A., Figuerola J., Green A.J., Feldmann J., Meharg A.A. *Environmental Science and Technology*, 2007, vol. 41, pp. 6854–6859. DOI: 10.1021/es070627i.
51. Meharg A.A., Norton G., Deacon C., Williams P., Adomako E.E., Price A., Zhu Y., Li G., Zhao F.-J., McGrath S. *Environmental Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 5613–5618. DOI: 10.1021/es400521h.
52. Khanam R., Kumar A., Nayak A.K., Shahid Md., Tripathi R., Vijayakumar S., Bhaduri D., Kumar U., Mohanty S., Panneerselvam P. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 699, 134330. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134330.
53. Wang S., Wu W., Liu F., Liao R., Hu Y. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24(18), pp. 15209–15225. DOI: 10.1007/s11356-017-8909-5.
54. Hansen T.H., Lombi E., Fitzgerald M., Laursen K.H., Frydenvang J., Husted S., Boualaphanh C., Resurreccion A., Howard D.L., de Jonge M.D., Paterson D., Schjoerring J.K. *Journal of Cereal Science*, 2012, vol. 56(2), pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.07.002.
55. Mohidem N.A., Hashim N., Shamsudin R., Che Man H. *Agriculture*, 2022, vol. 12(6), 741. DOI: 10.3390/agriculture12060741.
56. Nawab J., Ghani J., Khan S., Xiaoping W. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 214, pp. 172–183. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.02.093.
57. Nawab J., Khan S., Shah M.T., Khan K., Huang Q., Ali R. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, vol. 17(9), pp. 801–813. DOI: 10.1080/15226514.2014.981246.
58. Zaytseva N.V. *Analiz riska zdorov'yu*, 2018, no. 4, pp. 13–23. DOI: 10.21668/health.risk/2018.4.02. (in Russ.).
59. Frolova O.A., Bocharov Ye.P., Akhtyamova L.A. *Gigiyena i sanitariya*, 2016, no. 95(8), pp. 743–748. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-8-743-748. (in Russ.).
60. Mataveli L.R.V., Buzzo M.L., Arauz L.J.de, Carvalho M.de F.H., Arakaki E.E.K., Matsuzaki R., Tiglia P. *Journal of analytical methods in chemistry*, 2016, vol. 2016, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/3968786.
61. Shariatifar N., Rezaei M., Alizadeh Sani M., Alimohammadi M., Arabameri M. *Biological Trace Element Research*, 2020, vol. 198, pp. 721–731. DOI: 10.1007/s12011-020-02110-1.
62. Tattibayeva D., Nebot C., Miranda J.M., Abuova A.B., Baibatyrov T.A., Kizatova M.Z., Cepeda A., Franco C.M. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 23, pp. 5527–5537. DOI: 10.1007/s11356-015-5728-4.
63. Tutel'yan V.A., Zhilinskaya N.V., Sarkisyan V.A., Kochetkova A.A. *Voprosy pitaniya*, 2017, vol. 86, no. 6, pp. 29–35. (in Russ.).
64. *Codex Alimentarius Commission. Codex general standard for contaminants and toxins in food and feed (CODEX STAN 193-1995 Rev. 1997–2014)*. URL: [http://www.codexalimentarius.net/web/standeard\\_list.do](http://www.codexalimentarius.net/web/standeard_list.do).

65. Commission Regulation (EU) No 836/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 333/2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo(a)pyrene in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*. 2011, vol. 215, pp. 9–16.
66. Commission Regulation (EC) No 333/2007 of 28 March 2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo(a)pyrene in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*. 2007, vol. L88, pp. 29–38.
67. SanPiN 2.3.2.1078-01. *Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov*. [SanPiN 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products]. Moscow, 2002, 269 p. (in Russ.).
68. TR TS 021/2011. *O bezopasnosti pishchevoy produktsii*. [TR TS 021/2011. On food safety]. Moscow, 2011, 173 p. (in Russ.).
69. *Predely obnaruzheniya priborov* [Instrument detection limits]. URL: <http://www.epac-service.ru/Katalogi/Oborudovanie-dlya-hromatografii-i-spektroskopii/Spektroskopiya/Predely-obnaruzheniya-priborov/>. (in Russ.).
70. Feist B., Sitko R. *Food Chemistry*, 2017, vol. 249, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.12.082.
71. Parengam M., Judprasong K., Srianujata S., Jittinandana S., Laoharajanaphand S., Busamongko A. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2010, vol. 23(4), pp. 340–345. DOI: 10.1016/j.jfca.2009.12.012.
72. Molina L., Lapis J.R., Sreenivasulu N., Cuevas R.P.O. *Rice Grain Quality*, 2018, pp. 253–264. DOI: 10.1007/978-1-4939-8914-0\_14.
73. Ebrahimi-Najafabadi H., Pasdaran A., Rezaei Bezenjani R., Bozorgzadeh E. *Food Chemistry*, 2019, vol. 289, pp. 26–32. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.03.046.
74. Londonio A., Morzán E., Smichowski P. *Food Chemistry*, 2019, vol. 284, pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.104.
75. Zaytseva N.V., Ulanova T.S., Gileva K.O., Veykhman G.A., Stenno Ye.V., Nedoshitova A.V., Volkova M.V. *Voprosy pitaniya*, 2023, vol. 92, no. 1, pp. 45–54. (in Russ.).
76. Vasil'yev V.P. *Analiticheskaya khimiya. V 2 kn. Kn. 1: Titrimetricheskiye i gravimetricheskiye metody analiza: ucheb. dlya stud. vuzov, obuchayushchikhsya po khimiko-tekhno. spets.* [Analytical chemistry. In 2 books. Book 1: Titrimetric and gravimetric methods of analysis: textbook. for students universities studying chemical engineering. specialist]. Moscow, 2007, 366 p. (in Russ.).
77. Rahman M.A., Rahman M.M., Reichman S.M. et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, vol. 100, pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.11.024.
78. Nizamutdinova N.R., Safarova V.I., Khatmullina R.M., Tel'tsova L.Z., Sirayeva I.N. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 48–53. (in Russ.).
79. Litvinskiy V.A., Grishina Ye.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2018, no. 6, pp. 7–12. (in Russ.).
80. Brizio P., Benedetto A., Squadrone S., Curcio A., Pellegrino M., Ferrero M., Abete M.C. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2016, vol. 9, pp. 261–267. DOI: 10.1080/19393210.2016.1209572.
81. Pinto E., Almeida A., Ferreira I.M.P.L.V.O. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, vol. 48, pp. 81–87. DOI: 10.1016/j.jfca.2016.02.008.
82. Tattibayeva D., Nebot C., Miranda J.M., Cepeda A., Mateyev E., Erkebaev M., Franco C.M. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 85–98. DOI: 10.1007/s10653-015-9687-y.
83. Vidmar J., Hässmann L., Loeschner K. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, vol. 69 (34), pp. 9979–9990. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c07363.
84. Langasco I., Barracu F., Deroma M.A., López-Sánchez J.F., Mara A., Meloni P., Pilo M.I., Estrugo À.S., Sanna G., Spano N., Spanu A. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 302B, 114105. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114105.
85. Herrero Fernández Z., Estevez Álvarez J.R., Montero Álvarez A., Muñoz Ugarte O., Pupo González I., Rodríguez González M., Dos Santos Júnior J.A., Bezerra M.B.C.F., Dos Santos Junior O.P. *Food Additives and Contaminants: Part B Surveill*, 2021, vol. 14(1), pp. 59–65. DOI: 10.1080/19393210.2020.1870576.
86. Li D., Zhang Q., Sun D., Yang C., Luo G. *Medicine. Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29 (56), pp. 84113–84124. DOI: 10.1007/s11356-022-21739-0.
87. TatahMentan M., Nyachoti S., Scott L., Phan N., Okwori F.O., Felemban N., Godebo T.R. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17 (21), pp. 8128–8140. DOI: 10.3390/ijerph17218128.
88. Hansen T.H., Lombi E., Fitzgerald M., Laursen K.H., Frydenvang J., Husted S., Boualaphanh C., Resurreccion A., Howard D.L., de Jonge M.D., Paterson D., Schjoerring J.K. *Journal of Cereal Science*, 2012, vol. 56 (2), pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.07.002.
89. Mohidem N.A., Hashim N., Shamsudin R., Che Man H. *Agriculture*, 2022, vol. 12 (6), 741. DOI: 10.3390/agriculture12060741.
90. Khaneghah A.M., Fakhri Y., Nematollahi A., Pirhadi M. *Trends in Food Science & Technology Journal*, 2020, vol. 96, pp. 30–44. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.007.
91. Islam M.S., Ahmed M.K., Habibullah-Al-Mamun M. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, vol. 62, pp. 10828–10835. DOI: 10.1021/jf502486q.
92. Chen L., Zhou S., Shi Y., Wang C., Li B., Li Y., Wu S. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 615, pp. 141–149. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.230.

93. Nawab J., Farooqi S., Xiaoping W., Khan S., Khan A. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 5558–5571. DOI: 10.1007/s11356-017-0764-x.
94. Sadiq N., Beauchemin D. *Analytica Chimica Acta*, 2014, vol. 851, pp. 23–29. DOI: 10.1016/j.aca.2014.09.017.
95. Djahed B., Taghavi M., Farzadkia M. et al. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, vol. 115, pp. 405–412. DOI: 10.1016/j.fct.2018.03.040.
96. Rubio-Armendáriz C., Paz S., Gutiérrez Á.J., Furtado V.G., González-Weller D., Revert C., Hardisson A. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18, no. 7, pp. 3833–3846. DOI: 10.3390/ijerph18073833.
97. Millour S., Noël L., Kadar A., Chekri R., Vastel C., Sirot V., Leblanc J., Guérin T. *Food Chemistry*, 2011, vol. 126 (4), pp. 1787–1799. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.086.
98. Baxter M., Breerton N. *The Food and Environment Research Agency*, 2015, pp. 1–69.
99. Nardi E.P., Evangelista F.S.B., Tormen L., Saint’Pierre T.D., Curtius A.J., Souza S.S., Barbosa F. *Food Chemistry*, 2009, vol. 112, no. 3, pp. 727–732. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.06.010.
100. Zhao F., Zhu Y., Meharg A.A. *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47 (9), pp. 3957–3966. DOI: 10.1021/es304295n.
101. Williams P.N., Villada A., Deacon C., Raab A., Figuerola J., Green A.J., Feldmann J., Meharg A.A. *Environmental Science and Technology*, 2007, vol. 41, pp. 6854–6859. DOI: 10.1021/es070627i.
102. Sun L., Zheng M., Liu H., Peng S., Huang J., Cui K., Nie L. *The Scientific World Journal*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1155/2014/596438.
103. Li Y., Zhao J., Zhang B., Liu Y., Xu X., Li Y., Li B., Gao Y., Chai Z. *Plant and Soil*, 2016, vol. 398, pp. 87–97. DOI: 10.1007/s11104-015-2627-x.
104. Skurikhina I.M. *Khimicheskii sostav rossiyskikh pishchevykh produktov: spravochnik*. [Chemical composition of Russian food products: reference book]. Moscow, 2002, 236 p. (in Russ.).
105. Patent 2779425 (RU). 06.09.2022. (in Russ.).

Received March 6, 2023

Revised September 1, 2023

Accepted September 14, 2023

#### Сведения об авторах

*Зайцева Нина Владимировна* – доктор медицинских наук, академик РАН, профессор, научный руководитель, znv@fcrisk.ru

*Уланова Татьяна Сергеевна* – доктор биологических наук, заведующая отделом химико-аналитических методов исследования, ulanova@fcrisk.ru

*Вейхман Галина Ахметовна* – кандидат фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории методов элементного анализа, veikhman\_ga@mail.ru

*Гилева Ксения Олеговна* – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории методов элементного анализа, ksenimanilova@mail.ru

*Стенно Елена Вячеславовна* – заведующая лабораторией методов элементного анализа, stenno@fcrisk.ru

*Недошитова Анна Владимировна* – научный сотрудник лаборатории методов элементного анализа, nedoshitova@fcrisk.ru

#### Information about authors

*Zaitseva Nina Vladimirovna* – Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Scientific Advisor, znv@fcrisk.ru

*Ulanova Tatyana Sergeevna* – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Chemical Analytical Research Methods, ulanova@fcrisk.ru

*Veikhman Galina Akhmetovna* – Candidate of Pharmaceutical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Elemental Analysis Methods, veikhman\_ga@mail.ru

*Gileva Ksenia Olegovna* – Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Laboratory of Elemental Analysis Methods, ksenimanilova@mail.ru

*Stenno Elena Vyacheslavovna* – Head of the Laboratory of Elemental Analysis Methods, stenno@fcrisk.ru

*Nedoshitova Anna Vladimirovna* – Researcher at the Laboratory of Elemental Analysis Methods, nedoshitova@fcrisk.ru