

# АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГИГИЕНЫ

## TOPICAL ISSUES OF HYGIENE

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2025



Онищенко Г.Г.<sup>1</sup>, Ракитский В.Н.<sup>2</sup>, Бондарева Л.Г.<sup>2</sup>, Федорова Н.Е.<sup>2</sup>

### Гигиенические аспекты накопления мышьяка в рыбе, выращенной в естественных и искусственных условиях

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 1410014, Мытищи, Россия

#### РЕЗЮМЕ

**Введение.** По прогнозам, мировое потребление рыбы на душу населения достигнет 21,2 кг в 2030 г. по сравнению со средним показателем 20,5 кг в 2018–2020 гг. Рыба накапливает мышьяк (As), который затем с пищей попадает в организм человека.

**Цель исследования** — оценка гигиенической безопасности для потребителя при употреблении в пищу рыбы, выращенной в естественных и искусственных условиях.

**Материалы и методы.** Объект исследования — осётр сибирский (*Acipenser baerii*). Использованы методы выделения общего As и его неорганических форм при микроволновом разложении, последовательного фракционирования для выделения As в виде сложных органических соединений. Определение As во всех фракциях и формах существования элемента проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Рассчитывали канцерогенный и неканцерогенный риски.

**Результаты.** Получены данные по распределению As в частях и органах осетра. Составлена последовательность убыви общего As: печень > (кишечник + желудок) с содержимым > икра ≈ филе > голова (без жабр) > скелет с визигой > жабры > кожа без чешуи. До 27% накопленного As связано с жировой тканью с образованием сложных соединений с липидами. Уровни канцерогенного риска для неорганических форм As по критериям приемлемости находятся ниже величины целевого риска. Ни один из образцов осетра не имел значений неканцерогенного риска > 1.

**Ограничение исследования.** В исследованиях использовался только один вид рыбы (осётр).

**Заключение.** Проведённое последовательное фракционирование форм As позволило определить долю жирорастворимых, водорастворимых соединений As в филе и икре осетра по отношению к общему содержанию. Сравнительный анализ соединений As в рыбе, выращенной в естественных и искусственных условиях, не выявил существенных различий в его распределении между двумя способами выращивания. В результате проведённых исследований установлено, что употребление осетра сибирского не представляет опасности для здоровья человека.

**Ключевые слова:** мышьяк; рыба; осётр; последовательное фракционирование; оценка риска

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

**Для цитирования:** Онищенко Г.Г., Ракитский В.Н., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е. Гигиенические аспекты накопления мышьяка в рыбе, выращенной в естественных и искусственных условиях. *Здравоохранение в Российской Федерации*. 2025; 69(1): 52–59. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-52-59>  
<https://elibrary.ru/bealpu>

**Для корреспонденции:** Бондарева Лидия Георгиевна, e-mail: [lydiabondareva@gmail.com](mailto:lydiabondareva@gmail.com)

**Участие авторов:** Ракитский В.Н., Онищенко Г.Г., Федорова Н.Е. — концепция и дизайн исследования; Бондарева Л.Г. — сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Федорова Н.Е. — сбор и обработка материала, написание текста, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

**Благодарность.** Авторы выражают признательность сотрудникам Центра коллективного пользования Сибирского федерального университета за помощь в проведении исследований.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 25.11.2024 / Принята к печати: 11.12.2024 / Опубликовано: 28.02.2025

Gennadiy G. Onishchenko<sup>1</sup>, Valery N. Rakitskiy<sup>2</sup>, Lydia G. Bondareva<sup>2</sup>, Natalya E. Fedorova<sup>2</sup>

## Hygienic aspects of accumulation of arsenic in fish grown in natural and artificial conditions

<sup>1</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, 119991, Russian Federation;

<sup>2</sup>Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 1410014, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** World consumption of fish per capita will reach 21.2 kg in 2030, compared to an average of 20.5 kg in 2018–2020. Fish accumulate arsenic, which then enters the human body with food. An acute problem is the hygienic aspects of accumulation of arsenic in fish grown in natural and artificial (aquaculture) conditions.

**Purpose of the study.** Assessment of hygienic safety for consumers when eating fish grown under natural conditions versus those raised on fish farms.

**Materials and methods.** The objects of the study are Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*). The methods of isolating total arsenic and inorganic arsenic by microwave decomposition, as well as the method of sequential fractionation for isolating arsenic in the form of complex organic compounds were used. Arsenic in all fractions and forms of existence of the element was determined by ICP-MC. Carcinogenic and non-carcinogenic risks were calculated.

**Results.** Data on arsenic distribution in sturgeon parts and organs were obtained. Based on this, the following sequence of total arsenic decrease was compiled: liver > (intestine + stomach) with contents > caviar ≈ fillet > head (without gills) > skeleton with viscera > gills > skin without scales. Up to 27% of all accumulated arsenic is associated with adipose tissue with the formation of complex compounds with lipids. The levels of carcinogenic risk for inorganic forms of arsenic according to the acceptance criteria are below the target risk value. None of the sturgeon samples had non-carcinogenic risk values > 1.

**Research limitations.** Only one species of fish (sturgeon) was used in the studies.

**Conclusion.** The conducted sequential fractionation of arsenic forms allowed detecting the proportion of fat-soluble, water-soluble arsenic compounds in sturgeon filets and caviar in relation to the total content. Comparative analysis of arsenic compounds in fish grown in natural and artificial conditions did not reveal significant differences in its distribution between the two methods of cultivation. As a result of the conducted studies, the use of Siberian sturgeon was established to do not pose a danger to human health.

**Keywords:** arsenic; fish; sturgeon; sequential fractionation; risk assessment

**Compliance with ethical standards.** The study does not require a biomedical ethics committee opinion.

**For citation:** Onishchenko G.G., Rakitskiy V.N., Bondareva L.G., Fedorova N.E. Hygienic aspects of accumulation of arsenic in fish grown in natural and artificial conditions. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii / Health Care of the Russian Federation, Russian journal.* 2025; 69(1): 52–59. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-52-59> <https://elibrary.ru/bealpu> (in Russian)

**For correspondence:** Lydia G. Bondareva, e-mail: [lydiabondareva@gmail.com](mailto:lydiabondareva@gmail.com)

**Contribution of the authors:** Rakitskiy V.N., Onishchenko G.G., Fedorova N.E. — concept and design of the study; Bondareva L.G. — collection and processing of material, writing the text, editing; Fedorova N.E. — collection and processing of material, writing the text, editing. All co-authors — approved the final version of the article, are responsible for the integrity of all parts of the article.

**Acknowledgment.** The authors are grateful to the staff of the Center for Collective Use of the Siberian Federal University for assistance in conducting the research. The study had no sponsorship.

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

Received: November 25, 2024 / Accepted: December 11, 2024 / Published: February 28, 2025

## Введение

По мере роста индустриализации и урбанизации возрастают глобальные риски загрязнения воды. При нынешнем сценарии загрязнение воды тяжёлыми металлами и металлоидами [1, 2] представляет серьёзную проблему из-за их негативного воздействия на экосистему. Особую тревожность вызывает биоаккумуляция металлов и металлоидов в пищевых цепях, где они могут перемещаться между различными трофическими уровнями [3], с последующим негативным влиянием на здоровье населения при употреблении, например, рыбы.

По прогнозам, мировое потребление рыбы на душу населения достигнет 21,2 кг в 2030 г. по сравнению со средним показателем 20,5 кг в 2018–2020 гг. [4].

За счёт рыбы обеспечивается до 15% ежедневного пищевого рациона животных белков 3 млрд человек в мире. При этом рост показателей объясняется, прежде всего, развитием аквакультуры, т. е. искусственного разведения рыбы и морепродуктов. Мясо рыбы считается высококачественным источником белков и витаминов, богатым незаменимыми аминокислотами, жирами типа омега-3, а также рядом микро- и макроэлементов [5, 6]. Тем не менее установлено, что рыба содержит переменное коли-

чество металлов и металлоидов (в том числе мышьяка), часто в концентрациях, превышающих установленные максимальные уровни [7–11], что вызывает споры о пользе и рисках, связанных с потреблением рыбы.

В водных экосистемах мышьяк (As) может существовать как в органической, так и в неорганической (более токсичной) форме (iAs) [12]. Водные организмы накапливают As, который затем попадает в организм человека с пищей. Большинство As-органических соединений обнаружено в морских организмах, например водорослях или жирной рыбе с общей концентрацией As 5–100 мг/г на сухой вес. As поглощается свободно плавающими микроскопическими растениями или водорослями, планктоном из морской воды. Большинство морских животных усваивают незначительную долю iAs из морской воды, поэтому его накопление связывают в основном с пищей [13, 14]. Это отражает метаболическую последовательность трансформаций, происходящих при миграции и накоплении As по пищевой цепи. Последовательность, начинающаяся с iAs, приводит к накоплению у высших видов животных сложных соединений, которые не могут быть напрямую синтезированы из iAs [15]. После поглощения водоросли быстро нивелируют токсичность iAs путём его восстановления и метилирования, что приводит к образованию,

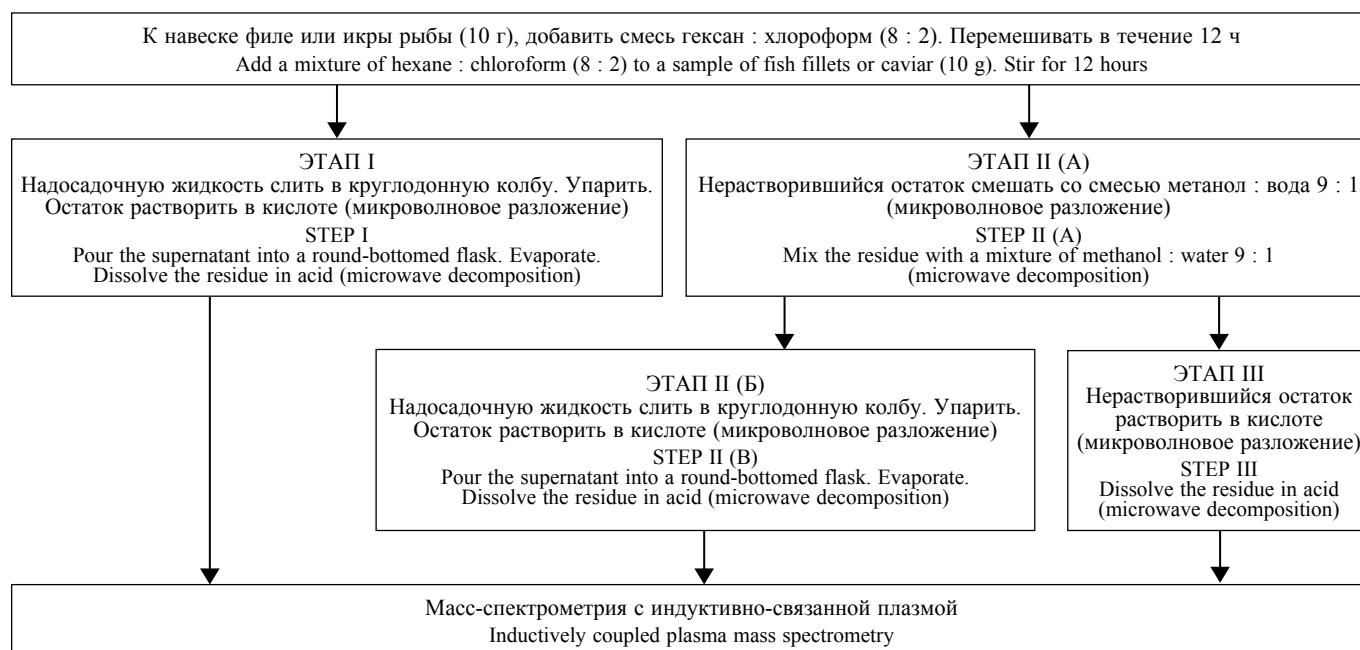


Схема последовательного химического фракционирования при определении форм нахождения As в рыбе (филе, икра).  
Scheme of sequential chemical fractionation in detecting the forms of arsenic in fish (fillet, caviar).

например, диметиларсониевой кислоты, других метилированных соединений As и арсеносахаров, в процессе которого участвует со-фермент S-аденозилметионин в качестве донора метильных групп и групп сахаров [16–18].

As неравномерно распределяется в тканях рыбы и морепродуктов. В основном он накапливается в экзоскелете беспозвоночных и в печени рыб [19]. Как было сказано выше, уровни общего As ( $As_{total}$ ) и отдельных видов соединений As варьируются. Например, iAs обнаруживается почти исключительно во внутренних органах (кишечнике, печени, желудке, сердце, жабрах), в то время как содержание As в мышцах в основном отражает уровень арсенобетаина [20]. Это указывает на то, что виды соединений As и его общая концентрация будут различаться в зависимости от того, какая часть рыбы потребляется [20].

**Цель** исследования — оценка гигиенической безопасности для потребителя при употреблении в пищу рыбы, выращенной в естественных и искусственных условиях.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследований использовали осетра сибирского (*Acipenser baeri*), выловленного в нижнем течении реки Енисей, и осетра, выращенного на ферме Руслов (ruslov.ru), расположенной выше по течению от Красноярска, на реке Енисей. Образцы осетра были любезно представлены сотрудниками Енисейского территориально-го управления Федерального агентства по рыболовству.

Исследовали тушки массой 1,5–2,0 кг, длиной 35–40 см. Отбор проб осуществляли согласно ГОСТ 31339–2006<sup>1</sup> и ГОСТ 24896–2013 «Рыба живая. Технические условия».<sup>2</sup> Тушки разделявали непосредственно после вылова (охлаждённое сырьё) в соответствии с ГОСТ 7636–85<sup>3</sup>.

В работе использовали методику определения  $As_{total}$ , iAs и его некоторых форм [21]. Последовательное химическое фракционирование проводили по методике, представленной на **рисунке**.

Содержание As во всех пробах измеряли с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после кислотного разложения с помощью микроволновой печи —  $As_{total}$  и As во всех фракциях после последовательного фракционирования.

Основные подходы, применённые при оценке риска, выбраны в соответствии с Р 2.1.10.3968–23<sup>4</sup>. Общий iAs определяли после перевода в пятивалентную форму при помощи пероксида водорода. Уровень риска рассчитывали для наименьшей и наибольшей обнаруженной концентрации для каждого объекта исследования.

Для расчёта экспозиции As и его соединений, присутствующих в филе и икре, использованы данные по потреблению рыбы на душу населения в год [21] и значения медианы измеренных концентраций в реальных образцах. Значение фактора канцерогенного потенциала для iAs и референтной дозы при хроническом поступлении выбрано в соответствии с Приложением 1 к Р 2.1.10.3968–23<sup>4</sup>. В наших расчётах при оценке риска учитывали референтную дозу для iAs RfD = 0,0000035, приведённую в Р 2.1.10.3968–234, а также коэффициенты пересчёта на съедобную часть пищевой продукции: T = 0,58 — для осетра, T = 1 — для икры.

В мировом сообществе используется, главным образом, величина Target Hazard Quotient (THQ), которая представляет собой неканцерогенный риск для здоровья, создаваемый в том числе потреблением рыбы с As. THQ оценивали в соответствии с рекомендациями

<sup>1</sup> ГОСТ 31339–2006 «Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб»

<sup>2</sup> ГОСТ 24896–2013 «Рыба живая. Технические условия».

<sup>3</sup> ГОСТ 7636–85 «Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа».

<sup>4</sup> Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания. Руководство 2.1.10.3968–23.

**Таблица 1.** Содержание  $totalAs$  и  $iAs$  в частях и органах дикого осетра *A. baerii* и его аквакультуре ( $n = 5$ ), min–max  
**Table 1.** Content of  $totalAs$  and  $iAs$  in parts and organs of wild sturgeon *A. baerii* and its aquaculture ( $n = 5$ ), min–max

Образец Sample	Концентрация, мг/кг сырого веса		Concentration, mg/kg, wet weight		Доля $iAs$ от $totalAs$ , %	
	$totalAs$		$iAs$		$iAs$ part per $totalAs$ , %	
	дикий осетр wild sturgeon	аквакультура aquaculture	дикий осетр wild sturgeon	аквакультура aquaculture	дикий осетр wild sturgeon	аквакультура aquaculture
Кожа (без чешуи) Skin (without scales)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	–
Голова (без жабр) Head (without gills)	0,013–0,043	0,012–0,034	2,45–3,51	2,91–3,24	0,5–2,3	0,4–1,0
Жабры   Gills	0,024–0,056	0,019–0,047	0,99–1,85	0,87–1,34	2,4–3,0	2,1–3,5
Скелет с визигой Skeleton with vizig	0,012–0,033	0,011–0,029	1,64–2,11	2,12–2,24	0,7–1,6	0,5–1,3
Кишечник + желудок, с содержимым Intestines + stomach, with contents	0,178–0,359	0,184–0,367	7,45–9,25	8,01–9,54	2,4–3,8	2,3–3,8
Печень   Liver	0,263–0,339	0,277–0,397	10,12–12,12	9,56–11,34	2,6–2,8	2,9–3,5
Филе   Fillet	0,042–0,071	0,032–0,074	2,22–2,81	2,18–3,41	1,9–2,5	1,5–2,2
Икра   Caviar	0,051–0,089	0,052–0,081	2,87–3,25	2,93–3,24	1,7–2,7	1,8–2,4

Агентства по охране окружающей среды США [22], по формуле (1):

$$THQ = [(E_f \cdot E_d \cdot Q_{MC} \cdot C) / (RfD \cdot BW \cdot E_r)] \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где THQ — целевой коэффициент опасности;  $E_f$  — частота воздействия, дни (365 дней);  $E_d$  — продолжительность воздействия в течение жизни, лет (70 лет);  $Q_{MC}$  — вес съеденной части, г;  $C$  — средняя концентрация As, мг/кг;  $RfD$  — пероральная референтная доза As, была установлена Агентством по охране окружающей среды США [22] на уровне  $3 \cdot 10^{-3}$  мг/кг/день;  $BW$  — масса тела, кг (60 кг для среднего взрослого человека),  $E_r$  — воздействие в течение всей жизни (365 дней  $\cdot$  70 лет).

Предполагаемые 70 лет для  $E_d$  и  $E_r$ , а также 365 дней, принятые для  $E_f$ , соответствовали рекомендациям Агентства по охране окружающей среды США. Если рассчитанное значение  $THQ < 1$ , то неканцерогенный риск для здоровья очень мал или отсутствует. Однако если значение  $\geq 1$ , то существует вероятность того, что употребление рыбы может привести к неканцерогенным неблагоприятным последствиям для здоровья.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета «Анализ данных» программы MS Excel 2023.

## Результаты

В табл. 1 представлены результаты определения  $totalAs$  и  $iAs$  в частях и органах осетра, выращенного в естественных и искусственных условиях (аквакультура). На основании представленных результатов составлена последовательность убыви содержания  $totalAs$ : печень > (кишечник + желудок) с содержимым > икра  $\approx$  филе > голова (без жабр) > скелет с визигой > жабры > кожа без чешуи. При этом последовательность органов идентична для рыбы, выращенной в естественных условиях, и для аквакультуры.

С другой стороны, при незначительной вариации доли  $iAs$  по отношению к  $totalAs$  распределение по частям и органам для рыбы выглядит немного иначе: (кишечник + желудок) с содержимым  $\approx$  печень > жабры > филе  $\approx$  икра > голова без жабр > скелет с визигой > кожа без чешуи. Такое распределение может быть обусловлено физиологи-

ей исследуемого вида рыб. Нельзя исключить, помимо пищевой цепи поступления As в рыбу (кишечник–желудок и далее печень), и водный путь, обусловленный постоянным пропусканием воды через жабры. Несмотря на то что содержание As в воде для рассматриваемой территории соответствовало санитарно-гигиеническим нормам<sup>5</sup> [21] и находилось в интервале 0,002–0,005 мг/дм<sup>3</sup>, наблюдается накопление  $iAs$  жабрами.

В табл. 2 приведены результаты последовательного химического фракционирования филе и икры осетра, выращенного в естественных условиях, в сопоставлении данными, полученными для рыбы, выращенной в искусственных условиях. Филе и икра были выбраны как наиболее часто употребляемые в пищу с минимальной термической обработкой.

В представленных результатах показано, что до 27% выделенного при фракционировании As образует соединения с липидами (этап I). При этом результаты для рыб, выращенных в естественных и искусственных условиях (аквакультура), сопоставимы и различаются в пределах погрешности. Степень выделения As колеблется от 94 до 100% по сумме всех этапов. Это свидетельствует о хорошей эффективности последовательного фракционирования при определении As в филе и икре рыбы. Последовательная экстракция даёт в том числе представление о массовом балансе между липидо- и водорастворимыми фракциями (табл. 3).

На первых двух этапах выделяется As, который присутствует в виде соединений  $iAs$  и большей частью — в виде органических соединений As. Филе осетра имеет жирность до 10% [23], икра — до 20% [24], поэтому в липидную фракцию было выделено до 19% и до 27% As от общего количества для филе и икры соответственно.

Наши исследования не выявили существенных различий в формах нахождения As у дикой и искусственно выращиваемой рыбы — аквакультуры. Установлено, что

<sup>5</sup> Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021.

**Таблица 2.** Результаты определения As при последовательном фракционировании для осетра (филе, икра), min–max  
**Table 2.** Results of the determination of As by the method of sequential fractionation for sturgeon (fillet, caviar), min–max

Объект исследования	As <sub>total</sub> , мг/кг   mg/kg	Концентрация выделенного As, мг/кг Concentration of As extracted, mg/kg				Баланс, % Recovery, %	
		гексан/CHCl <sub>3</sub> hexane/CHCl <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O/MeOH	кислотное разложение остатка acid digestion of the rest	сумма всех этапов sum of steps		
		кислотное разложение acid digestion	этап I (липиды) step I (lipid solution)	этап II (водорастворимые соединения) step II (water solution)	этап III (остаток) step III (rest)		I + II + III
Аквакультура Aquaculture	филе   fillet икра   caviar	2,18–3,41 2,93–3,24	0,33–0,67 0,72–0,73	1,68–2,40 1,89–1,96	0,04–0,33 0,31–0,43	2,05–3,40 2,92–3,11	94–100 96–100
Дикий осётр Wild sturgeon	филе   fillet икра   caviar	2,22–2,81 2,87–3,25	0,39–0,64 0,63–0,91	1,74–1,96 1,88–1,90	0,05–0,20 0,30–0,32	2,18–2,80 2,85–3,09	98–100 95–99

**Таблица 3.** Массовый баланс As между фракциями, % ( $M \pm \sigma$ )**Table 3.** Mass balance of As between fractions, % ( $M \pm \sigma$ )

Образец Sample	Этап I (липиды) Step I (lipid solution)		Этап II (водорастворимые соединения) Step II (water solution)		Этап III (остаток) Step III (rest)	
	дикий осётр wild sturgeon	аквакультура aquaculture	дикий осётр wild sturgeon	аквакультура aquaculture	дикий осётр wild sturgeon	аквакультура aquaculture
Филе   Fillet	19,41 ± 4,10	16,77 ± 4,19	75,85 ± 2,80	79,23 ± 6,87	4,77 ± 2,01	7,46 ± 4,26
Икра   Caviar	26,52 ± 3,72	24,06 ± 1,97	63,26 ± 2,19	64,02 ± 2,57	10,22 ± 0,85	11,93 ± 1,61

уровни канцерогенного риска по критериям приемлемости находятся ниже величины целевого риска, в соответствии с Р 2.1.10.3968–23<sup>4</sup>. Для iAs полученное значение составило  $7,16 \cdot 10^{-10}$ . Ни один из образцов, исследуемых в нашем исследовании, не имел значений ТНҚ > 1, и, следовательно, употребление этой рыбы не представляет риска для потребителей [25].

### Обсуждение

Аквакультура является одним из основных секторов производства продуктов питания, на её долю приходится около 46% объёма производства рыбы и 52% потребления населения во всём мире. Анализ информационных источников не дал массива данных по содержанию As в аквакультурах, за небольшим исключением. Так, в России проводились исследования по накоплению и трансформации As в черноморских мидиях. Мидии выращивались на фермах вокруг полуострова Крым [26].

Мировому сообществу были представлены исследования по накоплению As при выращивании на фермах Тайваня тилипии и креветок. Установлено, что содержание As варьирует от 0,33 до 1,7 мкг/г [27]. Кроме того, исследовалось содержание As в аквакультуре, выращиваемой на фермах Кот-д'Ивуаре. Результаты показали, что средние концентрации As в мышцах рыб и морепродуктов в лагуне Аби колебались от 0,01 до 1,26 мкг/г [28]. Концентрация As в тилипии и челюстных костях значительно различалась в зависимости от места и сезона, при этом более высокие концентрации наблюдались в Тендо и в сезон дождей [28]. Учёные из Индии исследовали содержание As у 12 видов рыб, собранных из загрязнённых As систем аквакультуры. Обнаружено, что карп накапливает наименьшее количество As ( $< 0,05 \pm 0,00$  мг/кг), Мозамбикская тилипия — наибольшее ( $1,0 \pm 0,18$  мг/кг) [29].

Чтобы оценить влияние условий роста рыбы на содержание As, необходимо сравнить условия содержания рыбы в природе и при выращивании на ферме. N. Ruangwises и соавт. выявили, что концентрации общего As и его неорганических форм в мышечной ткани 4 видов пресноводных рыб из природных источников и аквакультуры (которые использовали воду из природных источников) в Таиланде, существенно не различались [30]. По результатам данного исследования было сделано предположение о том, что регулярная очистка вод на аквафермах или добавление чистой воды (воды с низкой концентрацией As) в садки с рыбой может снизить концентрацию As в донных отложениях, воде и рыбе. K.S. Ноу и соавт. анализировали содержание As в пресноводной рыбе, добываемой при рыбном промысле, аквакультуре в водохранилищах, городских реках и озёрах, а также в близлежащих донных отложениях и источниках воды для оценки воздействия на окружающую среду [31]. В России подобных исследований не проводилось либо данные не были опубликованы.

Ранее в исследованиях по распределению As в тканях рыбы, в частности рыбьем жире, были идентифицированы арсенилипиды [32–34], разработаны методы определения жирорастворимых сложных соединений As. Так, был представлен метод, включающий фракционирование с использованием последовательной экстракции, разделяющей жирорастворимые формы As на неполярные и полярные фракции арсенилипидов [33]. Наиболее распространёнными экстрагентами для экстракции водорастворимых видов As являются вода, метанол или их смеси. До сих пор экстракцию жирорастворимых форм As проводили в основном с помощью гексана, эфира, CHCl<sub>3</sub> и их смесей.

Существует мнение о том, что в реальных биологических образцах могут присутствовать в том числе неизвестные соединения As, которые невозможно перевести

## Актуальные вопросы гигиены

в раствор относительно щадящими растворителями, и природа этих соединений не изучена [35].

При оценке воздействия на основе ограниченных данных о  $iAs$  был сделан ряд предположений для оценки вклада  $iAs$  в  $totalAs$ . В рыбе доля  $iAs$  невелика и имеет тенденцию к снижению по мере увеличения  $totalAs$ , где соотношение зависит от вида рыбы, особенно от кормовой базы [21, 34]. Рассматриваемый реальный показатель для расчёта воздействия на человека с пищей было установлен как фиксированное значение для  $iAs$  0,03 мг/кг в рыбе и 0,1 мг/кг в морепродуктах [19]. В проведённых нами ранее исследованиях, в том числе по осетру русскому [36, 37], показано, что любое воздействие на рыбу (например, кулинарная обработка, хранение при глубокой заморозке) может приводить к неодолимым эффектам, выраженным в существенном перераспределении  $As$  по формам образующихся сложных соединений, в том числе к увеличению доли  $iAs$ .

Токсическое действие  $As$  зависит от степени окисления, химической формы нахождения, дозы воздействия, растворимости в биологических средах и скорости выведения. Химическая форма является основным фактором, определяющим риски для здоровья человека, и полагают, что  $iAs$  более токсичен, чем органические формы [38, 39]. Формы  $As$  сильно различаются в зависимости от организма, окружающей среды и географического положения [21, 38, 39].

Эта изменчивость, выражающаяся разной токсичностью форм  $As$  для человека, затрудняет точную оценку риска, особенно когда анализ риска ограничивается  $totalAs$ , и необходимо определить неорганические (токсичные) и органические (менее токсичные) фракции [27]. В литературе существует общее мнение, что около 85–95%  $As$  в съедобных частях морской рыбы представляют собой органические формы  $As$  (например, арсенобетанин) [28].

Поскольку мониторинг содержания  $As$  в пищевых продуктах, в частности рыбе, прежде всего актуален для оценки потенциального негативного воздействия на человека, то на завершающем этапе работы целесообразен расчёт рисков для человека. На основании проведённой оценки уровней канцерогенного риска установлено, что для филе и икры осетра уровни канцерогенного риска по критериям приемлемости находятся ниже величины целевого риска. Содержание органических соединений  $As$  в филе, а также икре значительно превышает содержание неорганических. Несмотря на это, потенциальный риск, который может быть получен от органических соединений  $As$ , ввиду их малой токсичности может не учитываться.

Относительно общей вероятности возникновения неканцерогенных эффектов  $As$  следует упомянуть то, что риск возникновения вредных эффектов от поступления  $iAs$  выше, чем от органического, и характеризуется как опасный. Следовательно, при ранжировании  $As$ -содержащих соединений по степени опасности возникновения неканцерогенных эффектов неорганические соединения  $As$  однозначно являются приоритетными.

Основные источники неопределённости при оценке рисков в настоящем исследовании связаны, в первую очередь, с отсутствием реальных эмпирически установленных значений фактора канцерогенного потенциала и референтных доз для  $As$ -органических веществ. Информация по количеству потребляемых на душу населения продуктов, получаемая из данных Росстата, тоже может отличаться от реальных сценариев условий жизнедеятельности для отдельно взятого региона. Однако, даже с учё-

том вышесказанного, следует отметить, что отдельный контроль органической и неорганической форм  $As$  актуален с гигиенической точки зрения, в особенности в продуктах из рыбы и гидробионтах.

Таким образом, максимально достоверные результаты по уровням рисков для  $As$ -содержащих соединений могут быть получены только после установления величины коэффициентов опасности и фактора канцерогенного потенциала для органических соединений  $As$ , а также проведения целенаправленно спланированных исследований с использованием экспериментально полученных данных и с учётом реальных сценариев образа жизни рассматриваемой популяции.

При оценке гигиенической безопасности при употреблении рыбы сопоставлялись данные, полученные в мировом сообществе, с нашими результатами. Группа экспертов Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов по загрязняющим веществам в пищевой цепи опубликовала научное заключение, в котором был оценён риск, связанный с наличием  $As$  в пищевых продуктах для здоровья человека [19]. Из более чем 100 тыс. данных о появлении  $As$  в пищевых продуктах примерно 98% были представлены как  $totalAs$ , и только несколько исследований учитывали различные виды  $As$ . Поскольку репрезентативные данные по видообразованию ограничены, группа экспертов не смогла оценить типичные соотношения между неорганическими и органическими формами  $As$  в пищевых продуктах [19].

*Ограничения исследования.* В исследованиях использовался только один вид рыбы (осётр).

## Заключение

В результате проведённых исследований изучены образцы осетра сибирского, выращенного в естественных и искусственных условиях (аквакультура). На основании полученных результатов предложена последовательность убыли уровня накопления общего  $As$  тканями и органами осетра: печень > (кишечник + желудок) с содержимым > икра  $\approx$  филе > голова (без жабр) > скелет с визигой > жабры > кожа без чешуи. При этом расположение убыли  $As$  по органам и тканям рыбы в последовательности идентично для рыбы, выращенной в естественных условиях, и аквакультуры. Доля  $iAs$  от  $totalAs$  в частях и органах рыбы выглядит следующим образом: (кишечник + желудок) с содержимым  $\approx$  печень > жабры > филе  $\approx$  икра > голова без жабр > скелет с визигой > кожа без чешуи. На наш взгляд, это может быть обосновано физиологическими особенностями рыбы.

В результате последовательного химического фракционирования установлена доля  $As$ , связанного с жирорастворимой фракцией в филе и икре осетра, которая составила до 19% и до 27%  $As$  от всего накопленного количества для филе и икры соответственно. Полученные значения коррелируют с содержанием жира в филе и икре рыбы.

Сделано заключение о том, что максимально допустимые уровни содержания  $totalAs$  в пищевой продукции, в частности рыбе, которые установлены в настоящее время в России, полностью обеспечивают её безопасность при употреблении населением. Рассчитан потенциально возможный неканцерогенный риск: 0,15–0,26 — для осетра, выращенного в природных условиях, 0,12–0,20 — в аквакультуре. Полученные значения не превышали установленный уровень — 1. Следовательно, употребление исследуемого вида рыбы не представляет риска.

## ЛИТЕРАТУРА

(п.п. 3–5, 7–11, 13–20, 22, 24, 25, 27–34, 38, 39 см. References)

1. *Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник – 2019*. Ростов-на-Дону: Росгидромет; 2020.
2. Черногаева Г.М., ред. *Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год*. М.: Росгидромет; 2022.
6. Управление Роспотребнадзора по Республике Алтай. Рыба и рыбопродукты, и их значение в питании. Available at: <https://pda.04.rospotrebnadzor.ru/index.php/press-center/healthy-lifestyle/13489-29102020.html>
12. Солoduхина М.А. Мышьяк в растениях природных и антропогенных ландшафтов Шерловогорского рудного района Забайкальского края. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014; (11–3): 377–82. <https://elibrary.ru/tacjch>
21. Ракитский В.Н., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е., Родионов А.С. Совершенствование подхода к аналитическому контролю мышьяка и его соединений. Апробация на реальных объектах. *Химическая безопасность*. 2023; 7(2): 134–52. <https://doi.org/10.25514/CHS.2023.2.25008> <https://elibrary.ru/gpkavb>
23. Басонов О.А., Судакова А.В. Химический состав и пищевая ценность мяса осетровых рыб разных генотипов при промышленном производстве. *Вестник ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022; (2): 178–84. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-2-178-184> <https://elibrary.ru/axmfzb>
26. Рябушко В. И., Козинцев А.Ф., Тончин А.М. Концентрация мышьяка в тканях культивируемой мидии *Mytilus Galloprovincialis* Lam., воде и донных осадках (Крым, Черное море). *Морской биологический журнал*. 2017; 2(3): 68–74. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06> <https://elibrary.ru/zqkywh>
35. Багрянцева О.В., Хотимченко С.А. Токсичность неорганических и органических форм мышьяка. *Вопросы питания*. 2021; 90(6): 6–17. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-6-6-17> <https://elibrary.ru/nwvhpz>
36. Родионов А.С., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е. Сопоставление потенциального риска от воздействия мышьяка при употреблении рыбы, выращенной в естественных и искусственных условиях, на примере радужной форели. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(5): 307–12. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-5-307-312> <https://elibrary.ru/nisntc>
37. Бондарева Л.Г., Родионов А.С., Синицкая Т.А., Федорова Н.Е. Потенциальные видоизменения форм нахождения мышьяка в рыбе в процессе переработки, на примере осетра русского. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(6): 356–62. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-6-357-363> <https://elibrary.ru/mlkuuj>

## REFERENCES

1. *Surface Water Quality of the Russian Federation. Yearbook – 2019 [Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik – 2019]*. Rostov-na-Donu: Rosgidromet; 2020. (in Russian)
2. Chernogaeva G.M., ed. *Review of the State and Pollution of the Environment in the Russian Federation for 2021 [Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2021 god]*. Moscow: Rosgidromet; 2022. (in Russian)
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Arsenic, metals, fibres, and dusts. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* 2012; 100(Pt. C): 11–465.
4. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030. Fish. OECD/FAO; 2021. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f5f1d519-dca8-4b55-8c0b-f7de6e7a7a48/content>
5. The State of Food and Agriculture; 2006. Available at: <https://www.fao.org/4/a0800e/a0800e00.htm>
6. Department of Rospotrebnadzor in the Altai Republic. Fish and fish products, and their importance in nutrition. Available at: <http://pda.04.rospotrebnadzor.ru/index.php/press-center/healthy-lifestyle/13489-29102020.html> (in Russian)
7. Gusso-Choueri P.K., Araújo G.S., Cruz A.C.F., Stremel T.R.O., Campos S.X., Abessa D.M.S., et al. Metals and arsenic in fish from a Ramsar site under past and present human pressures: Consumption risk factors to the local population. *Sci. Total Environ.* 2018; 628–629: 621–30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.005>
8. Avigliano E.A.F., Carvalho B.B., Velasco G.C., Tripodi P.D., Vianna M.E., Volpedo A.V.A. Nursery areas and connectivity of the adults anadromous catfish (*Genidens barbatus*) revealed by otolith-core microchemistry in the south-western Atlantic Ocean. *Marine Freshwater Res.* 2016; 68(5): 931–40. <https://doi.org/10.1071/MF16058>
9. Avigliano E., Maichak de Carvalho B., Invernizzi R., Olmedo M., Jasan R., Volpedo A.V. Arsenic, selenium, and metals in a commercial and vulnerable fish from southwestern Atlantic estuaries: distribution in water and tissues and public health risk assessment. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019; 26(8): 7994–8006. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04258-3>
10. Tavares L.E., Luque J.L. Community ecology of the metazoan parasites of white sea catfish, *Netuma barba* (Osteichthyes: Ariidae), from the coastal zone of the state of Rio De Janeiro, Brazil. *Braz. J. Biol.* 2004; 64(1): 169–76. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842004000100019>
11. Taylor V., Goodale B., Raab A., Schwerdtle T., Reimer K., Conklin S., et al. Human exposure to organic arsenic species from seafood. *Sci. Total Environ.* 2017; 580: 266–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.113>
12. Solodukhina M.A. Chelovecheskogo ore district of the Zabaikalskiy kraj. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014; (11-3): 377–82. <https://elibrary.ru/tacjch> (in Russian)
13. Francesconi K.A., Stick R.V., Edmonds J.S. Glycerolphosphorylarsenocholine and phosphatidylarsenocholine in Yelloweye Mullet (*Aldrichetta Forsteri*) following oral administration of arsenocholine. *Experientia*. 1990; 46(5): 464–6.
14. Sanders J.G., Osman R.W., Riedel G.F. Pathways of arsenic uptake and incorporation in estuarine phytoplankton and the filter-feeding invertebrates *Eurytemora affinis*, *Balanus improvisus* and *Crassostrea virginica*. *Marine Biology*. 1989; 103(3): 319–25.
15. Cullen W.R., Reimer K.J. Arsenic speciation in the environment. *Chemical Reviews*. 1989; 89(4): 713–64. <https://doi.org/10.1021/cr00094a002>
16. Francesconi K.A., Edmonds J.S. Arsenic and marine organisms. In: *Advances in Inorganic Chemistry*. Academic Press Inc: San Diego. 1997; 44: 147–89.
17. Borak J., Hosgood H.D. Seafood arsenic: implications for human risk assessment. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2007; 47(2): 204–12. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.09.005>
18. Phillips D.J.H. Arsenic in aquatic organisms — A review, emphasizing chemical speciation. *Aquatic Toxicology*. 1990; 16(3): 151–86. [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(90\)90036-O](https://doi.org/10.1016/0166-445X(90)90036-O)
19. European Food Safety Authority, Scientific Opinion on Arsenic in Food. *EFSA Journal*. 2009; 7(10): 1351.
20. Kirby J., Maher W. Tissue accumulation and distribution of arsenic compounds in three marine fish species: relationship to trophic position. *Appl. Organometal. Chem.* 2002; 16(2): 108–15. <https://doi.org/10.1002/aoc.268>
21. Rакитский В.Н., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е., Родионов А.С. Improvement of the approach in the analytical control of arsenic and its compounds. Approbation on real objects. *Химическая безопасность*. 2023; 7(2): 134–52. <https://doi.org/10.25514/CHS.2023.2.25008> <https://elibrary.ru/gpkavb> (in Russian)
22. USEPA. Assessing human health risks from chemically contaminated, fish and shellfish: A guidance manual. Washington, DC; 1989. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exec/ZipPDF.cgi/2000DGLF.PDF?Dockkey=2000DGLF.PDF>
23. Basonov O.A., Sudakova A.V. Chemical composition and nutritional value of meat of different genotypes of sturgeon in industrial production. *Vestnik ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2022; (2): 178–84. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-2-178-184> <https://elibrary.ru/axmfzb> (in Russian)
24. Wirth M., Kirschbaum F., Gessner J., Krüger A., Patriche N., Billard R. Chemical and biochemical composition of caviar from different sturgeon species and origins. *Nahrung*. 2000; 44(4): 233–7. <https://vk.cc/cIL4oN>
25. ATSDR. Toxicological profile for arsenic. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology. Atlanta, GA; 2007.
26. Ryabushko V.I., Kozintsev A.F., Toichkin A.M. Concentration of arsenic in the tissues of cultivated mussel *Mytilus Galloprovincialis* Lam., water and bottom sediments (Crimea, Black sea). *Morskoi biologicheskii zhurnal*. 2017; 2(3): 68–74.

Актуальные вопросы гигиены

- <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06> <https://elibrary.ru/zqkywh> (in Russian)
27. Kar S., Maity P.J., Jean J.-Sh., Liu Ch.-Ch. et al. Health risks for human intake of aquacultural fish: Arsenic bioaccumulation and contamination. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2011; 46(11): 1266–73. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.598814>
  28. Kouassi K.S., Claon S.J., N'Guettia K.R., Laurent S.K., Dakouo G.J., Allico J.D. Distribution and Contamination of Arsenic in Fish, Gastropods and Bivalves in the Aby and Tendo Lagoons in East of Ivory Coast. *Journal of Environmental Protection*. 2024; 15: 246–64. <https://doi.org/10.4236/jep.2024.153015>
  29. Santhana V.K., Raman R.K., Talukder A., Mahanty A., Sarkar D.J., Das B.K., et al. Arsenic Bioaccumulation and Identification of Low-Arsenic-Accumulating Food Fishes for Aquaculture in Arsenic-Contaminated Ponds and Associated Aquatic Ecosystems. *Biol. Trace Elem. Res.* 2022; 200(6): 2923–36. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02858-0>
  30. Ruangwises N., Saipan P., Ruangwises S. Total and inorganic arsenic in natural and aquacultural freshwater fish in Thailand: a comparative study. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2012; 89(6): 1196–200. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0858-6>
  31. Hoy K.S., Davydiuk T., Chen X., Lau C., Schofield J.R.M., Lu X., et al. Arsenic speciation in freshwater fish: challenges and research needs. *Food Qual. Saf.* 2023; 7: fyad032. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyad032>
  32. Rumpel A., Edmonds J.S., Katsu M., Jensen K.B., Goessler W., Raber G., et al. Arsenic-containing long-chain fatty acids in cod-liver oil: a result of biosynthetic infidelity? *Angew Chem. Int. Ed. Engl.* 2008; 47(14): 2665–7. <https://doi.org/10.1002/anie.200705405>
  33. Taleshi M.S., Jensen K.B., Raber G., Edmonds J.S., Gunnlaugsdottir H., Francesconi K.A. Arsenic-containing hydrocarbons: natural compounds in oil from the fish capelin, *Mallotus villosus*. *Chem. Commun (Camb)*. 2008; (39): 4706–7. <https://doi.org/10.1039/b808049f>
  34. Amayo K.O., Raab A., Krupp E.M., Feldmann J. Identification of arsenolipids and their degradation products in cod-liver oil. *Talanta*. 2014; 118: 217–23. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.09.056>
  35. Bagryantseva O.V., Khotimchenko S.A. Risks associated with the consumption of inorganic and organic arsenic. *Voprosy pitaniya*. 2021; 90(6): 6–17. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-6-6-17> <https://elibrary.ru/nwvhpz> (in Russian)
  36. Rodionov A.S., Bondareva L.G., Fedorova N.E. Comparison of the potential risk from arsenic exposure when eating fish grown in natural and artificial conditions, using the example of rainbow trout. *Toksikologicheskii vestnik*. 2024; 32(5): 307–12. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-5-307-312> <https://elibrary.ru/nisntc> (in Russian)
  37. Bondareva L.G., Rodionov A.S., Sinitskaya T.A., Fedorova N.E. Potential transformations of arsenic forms in fish during cooking processing: a case study of Russian sturgeon. *Toksikologicheskii vestnik*. 2024; 32(6): 356–62. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-6-357-363> <https://elibrary.ru/mlkuuj> (in Russian)
  38. Maher W., Waring J., Krikowa F., Duncan E., Foster S. 2018. Ecological factors affecting the accumulation and speciation of arsenic in twelve Australian coastal Bivalve molluscs. *Environ. Chem.* 2018; 15(1): 46–57. <https://doi.org/10.1071/EN17106>
  39. USEPA. Technical Summary of Information. Washington, DC; 2003. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1002YTX.PDF?Dockkey=P1002YTX.PDF> [date of access Dec 9 2024].

Информация об авторах

Онищенко Геннадий Григорьевич, академик РАН, доктор мед. наук, профессор, зав. кафедрой экологии человека и гигиены окружающей среды медико-профилактического факультета, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), 119991, Москва, Россия

Ракитский Валерий Николаевич, академик РАН, доктор мед. наук, профессор, науч. руководитель Института гигиены, токсикологии пестицидов и химической безопасности, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 1410014, Мытищи, Россия. E-mail: vtov@yandex.ru

Бондарева Лидия Георгиевна, канд. хим. наук, вед. науч. сотр. отдела аналитических методов контроля ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 1410014, Мытищи, Россия. E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Федорова Наталья Евгеньевна, доктор биол. наук, гл. науч. сотр. отдела аналитических методов контроля ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 1410014, Мытищи, Россия. E-mail: natali53fed@yandex.ru

Information about the authors

Gennady G. Onishchenko, DSc (Medicine), academician of RAS, Head of the Department of Human Ecology and Environmental Hygiene of the Faculty of Preventive Medicine, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0135-7258>

Valery N. Rakitskiy, DSc (Medicine), academician of RAS, Scientific Director of the Institute of Hygiene, Pesticide Toxicology and Chemical Safety, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9959-6507> E-mail: vtov@yandex.ru

Lydia G. Bondareva, PhD (Chemistry), Senior Researcher, Department of an analytical control methods, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1482-6319> E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Natalya E. Fedorova, DSc (Biology), Chief Researcher, Department of an analytical control methods, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8278-6382> E-mail: natali53fed@yandex.ru