



Степанян А.А.¹, Ковшов А.А.^{1,2}, Исаев Д.С.¹, Шилов В.В.^{1,2}

Токсиколого-гигиеническая характеристика мышьяка в питьевой воде (нарративный обзор литературы)

¹ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия;

²ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Минздрава России, 191015, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. В статье систематизирована информация о содержании в воде мышьяка и вредном воздействии при её употреблении, а также приведены материалы по оценке экспозиции населения мышьяком, расчётах риска для здоровья населения. Выполнен анализ оригинальных исследований, посвящённых содержанию мышьяка в почве, водных объектах, отравлениям мышьяком. Использованы библиографические и реферативные базы данных: PubMed, Scopus, Web of Science, НЭБ (eLIBRARY.RU). По результатам целевого поиска отобраны 60 полнотекстовых публикаций, из которых 36 полностью соответствуют указанным критериям включения.

Геохимические провинции мышьяка обнаружены во многих странах, в том числе и в России. На таких территориях питьевая вода (преимущественно из подземных источников) является основным путём поступления мышьяка в организм человека, а загрязнение источников питьевого водоснабжения мышьяком стало ведущей гигиенической проблемой. Выявлены минимальные действующие концентрации неорганического мышьяка в питьевой воде, при которых наблюдаются патологические изменения: при 0,0062 мг/л — ишемическая болезнь сердца и артериальная гипертензия; 0,00988 мг/л — снижение когнитивных функций у детей; 0,023 мг/л — гиперкератинизация и пигментация кожи.

Ограничение исследования. В большинстве оригинальных исследований не учитываются факторы риска, модифицирующие действие мышьяка, оценка экспозиции нередко основана на единичных замерах его концентрации.

Заключение. Токсическое действие мышьяка на организм человека в целом известно, однако существуют неопределённости, связанные с хроническим действием его низких доз. При этом минимальная действующая концентрация, связанная с риском развития болезней органов кровообращения, ниже ПДК в 1,6 раза. Целесообразно обосновать разные референтные дозы для отдельных критических органов и систем, особенно сердечно-сосудистой и нервной, а также рассмотреть возможность изменения ПДК мышьяка в питьевой воде.

Ключевые слова: литературный обзор; мышьяк; питьевая вода; оценка риска для здоровья населения; хронический неканцерогенный риск; референтные уровни; референтная доза

Для цитирования: Степанян А.А., Ковшов А.А., Исаев Д.С., Шилов В.В. Токсиколого-гигиеническая характеристика мышьяка в питьевой воде (нарративный обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2026; 105(8): 911–917. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-8-911-917> <https://elibrary.ru/poklxf>

Для корреспонденции: Степанян Алекс Артурович, e-mail: a.stepanian@s-znc.ru

Вклад авторов: Степанян А.А. — сбор и анализ источников литературы, написание текста; Ковшов А.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование, формулирование выводов; Исаев Д.С. — обработка материала, редактирование; Шилов В.В. — редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

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

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 17.04.2026 / Поступила после доработки: 01.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 28.09.2026

Aleks A. Stepanyan¹, Aleksandr A. Kovshov^{1,2}, Daniil S. Isaev¹, Viktor V. Shilov^{1,2}

Toxicological and hygienic characteristics of arsenic in drinking water (narrative literature review)

¹Northwest Public Health Research Center, 191036, St. Petersburg, Russian Federation;

²North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 191015, St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

This article systematizes information about the arsenic content in water, its harmful effects when consumed, and provides materials on assessing public exposure to arsenic and health risks assessment. The analysis of original studies on the content of arsenic in soil, water bodies, arsenic poisoning performed via bibliographic and abstract databases: PubMed, Scopus, Web of Science, RSCI (eLIBRARY.RU). Based on the results of a targeted search, sixty full-text reports were selected, of which 36 fully meet the specified inclusion criteria. Geochemical arsenic provinces have been found in many countries around the world, including Russia. In such territories, drinking water (mainly from underground sources) is the main route of arsenic entry into the human body, and arsenic contamination of drinking water sources is a leading hygienic problem. Minimal effective concentrations of inorganic arsenic in drinking water were identified: 0.0062 mg/L — coronary artery disease and hypertension; 0.00988 mg/L — cognitive decline in children; 0.023 mg/L — hyperkeratinization and pigmentation of the skin.

Limitation. Most original studies fail to take into account risk factors that modify arsenic exposure, and exposure estimates are often based on single arsenic concentration measurements.

Conclusion. The toxic effect of arsenic on the human body is generally known, but there are uncertainties associated with the chronic effects of low doses of this element. At the same time, the minimal effective concentration associated with the risk of circulatory diseases developing is 1.6 times lower than the maximal permissible concentration (MPC). It is advisable to justify different reference doses for individual critical organs and systems, especially for effects on the cardiovascular and nervous systems, as well as to consider possible changes in the MPC of arsenic in drinking water.

Keywords: literature review; arsenic; drinking water; public health risk assessment; chronic non-carcinogenic risk; reference levels; reference dose

For citation: Stepanyan A.A., Kovshov A.A., Isaev D.S., Shilov V.V. Toxicological and hygienic characteristics of arsenic in drinking water (narrative literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(8): 911–917. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-8-911-917> <https://elibrary.ru/poklxf> (In Russ.)

For correspondence: Aleks A. Stepanyan, e-mail: a.stepanian@s-znc.ru

Contribution: Stepanyan A.A. — collection and analysis of literature sources, writing of the text; Kovshov A.A. — concept and design of the study, editing, formulation of conclusions; Isaev D.S. — processing of the material, editing; Shilov V.V. — editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Received: April 17, 2026 / Revised: June 1, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: September 28, 2026

В работе обобщены результаты российских и зарубежных исследований, посвящённых содержанию мышьяка в воде, его токсикологическому профилю, а также представлены сведения об оценке экспозиции и рисках для здоровья населения, ассоциированных с поступлением мышьяка в организм из питьевой воды. Проведён анализ оригинальных исследований, в которых изучены концентрации мышьяка в почве, водных объектах и клинические проявления интоксикации мышьяком. По результатам целевого поиска в библиографических и реферативных базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science, НЭБ (eLIBRARY.RU)) было отобрано 60 полнотекстовых публикаций, из которых 36 полностью соответствуют указанным критериям включения.

Мышьяк (As) — металлоид, сочетающий в себе свойства металла и неметалла, однако в большинстве случаев его классифицируют как металл [1–3]. Он широко распространён в земной коре, кларк составляет $\approx 3,4$ мг/кг. Более 200 природных минералов имеют в составе мышьяк, но лишь в небольшой степени — в элементарной форме [2]. Неорганический As в природных условиях встречается в почве и во многих видах горных пород, особенно в минералах и рудах, содержащих медь или свинец [1]. Мышьяк относится к спутникам золота, поэтому на территориях золоторудных месторождений его концентрация очень высока [3]. As обладает значительной реакционной способностью и часто встречается в сочетании с другими элементами в четырёх степенях окисления: -3 ; 0 ; $+3$ или $+5$ [2–5]. Многие соединения мышьяка водорастворимы, что обуславливает его способность мигрировать в водные объекты [1].

В природных условиях мышьяк может попадать в поверхностные и подземные водные объекты посредством вымывания на земную поверхность дождевой водой из приземной атмосферы (куда он попадает в результате испарения с поверхности почв), процессов суффозии (ветровой и дождевой эрозии мышьяковистых горных пород, выщелачивания из почвы и минералов в грунтовые воды) [1, 6], в составе продуктов извержений вулканов, а также морских аэрозолей [6–8].

Основная форма содержания мышьяка в водных системах — неорганическая, где он встречается в основном в формах As (V) и As (III). При нормальных условиях мышьяк в воде присутствует в виде растворимого неорганического As (V), поскольку он термодинамически более стабилен в воде, чем As (III) [2]. В подземных водах преобладающей формой содержания мышьяка являются соединения As (III), более токсичные, чем соединения As (V) [4–6, 9]. В большинстве случаев высокое содержание мышьяка — следствие природных процессов, протекающих в слабо промываемых молодых осадочных породах с замедленным потоком подземных вод, повышенным значением pH, низкими концентрациями растворённого кислорода и высокими концентрациями растворённых железа и марганца [4, 7].

Подземные воды с высоким содержанием мышьяка чаще формируются в водоносных горизонтах, образованных песчано-глинистыми или песчано-сланцевыми породами [7, 10, 11]. Кроме того, при интенсивной эксплуатации артезианских скважин и активизации движения подземных вод усиливается тепло- и массообмен между водой и горными породами, что способствует переходу мышьяка в подземные воды [10]. Так, в Бангладеш интенсивный отбор подземных вод на протяжении более 50 лет привёл к существенному понижению их уровня. В результате мышьяк содержащие горные породы вступили в прямой контакт с кислородом атмосферного воздуха, что вызвало цепь химических реакций, в результате которых мышьяк в воде перешёл в легко растворимую бесцветную и опасную для здоровья людей форму H_3AsO_4 [6].

Как показывают результаты многочисленных исследований, с повышенными концентрациями неорганического мышьяка в поверхностных и подземных водных объектах, в том числе в источниках питьевого водоснабжения, сталкиваются многие страны [1, 2, 4, 6, 7, 12–16].

Концентрация мышьяка в природных поверхностных и подземных водах, как правило, составляет $0,0005$ – $0,001$ мг/л,

но может превышать 1 и даже 5 мг/л в геохимических провинциях [1, 3, 7]. Люди, потребляющие воду из глубоких скважин, подвергаются большей экспозиции мышьяком по сравнению с теми, кто использует воду из неглубоких колодцев или поверхностные воды. Это может быть связано с залежами мышьяковой руды на большой глубине [12]. Термальные и подземные воды большинства стран, в том числе и России, могут содержать мышьяк со средним диапазоном концентраций 1 – 280 мг/л. Пресноводные бассейны отличаются большим разбросом концентраций мышьяка — от $0,0006$ до $0,025$ мг/л [13].

Предельно допустимая концентрация мышьяка в воде в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения и Агентства по охране окружающей среды США составляет $0,01$ мг/л [12]. В Российской Федерации, Японии [17] и Китае [18] принят аналогичный гигиенический норматив. В Канаде допустимая концентрация составляет $0,025$ мг/л [12]. В Индии установлен гигиенический норматив $0,01$ мг/л, однако допускается повышение до $0,05$ мг/л в случае невозможности использования другого источника водоснабжения [19]. В Бангладеш гигиенический норматив содержания мышьяка в воде — $0,05$ мг/л [20].

В геохимических провинциях основной путь поступления мышьяка в организм человека — питьевая вода, а загрязнение источников питьевого водоснабжения As стало ведущей гигиенической проблемой [12, 15]. Геохимические провинции мышьяка обнаружены в Англии, Боливии, Грузии, Италии, Казахстане, Канаде, Норвегии, США, Франции, Чили, Швеции, Японии [11], Бангладеш, Индии [1, 6, 12, 15].

В России подобные геохимические провинции имеются в Забайкальском, Красноярском, Алтайском, Пермском, Приморском, Ставропольском, Хабаровском краях, Оренбургской, Саратовской, Архангельской, Вологодской, Омской, Свердловской, Челябинской, Магаданской, Пензенской и Иркутской областях, в республиках Тыва, Саха и Дагестан, а также в Чукотском автономном округе [6, 12, 15].

В рамках исследований за период 2018–2019 гг. установлено, что концентрации мышьяка в питьевой воде преимущественно поверхностных источников девяти районов Самары и Самарской области находились в пределах от $0,002$ мг/л (Кировский район) до $0,026$ мг/л (Красноглинский район) [14]. В 24 подземных водоисточниках семи районов Саратовской области за период 2018–2021 гг. были определены повышенные концентрации мышьяка в пределах 1 – 6 ПДК. Максимальная концентрация мышьяка обнаружена в роднике Фёдоровского района — $0,069$ мг/л. Исследователи связывали это с гидрогеохимической аномалией на территории области [15]. Северные районы Дагестана снабжаются водой в основном за счёт подземных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна [10–12], содержащих мышьяк в концентрациях $0,01$ – $0,5$ мг/л [12, 21]. Чаще всего подземные воды содержат повышенные концентрации мышьяка в Бабаюртовском, Хасавюртовском, Кизлярском, Тарумовском и Ногайском районах Республики Дагестан [11].

В Забайкальском крае имеются многочисленные месторождения и рудопроявления мышьяка, золота и сурьмы, в которых создаются благоприятные условия для миграции и накопления мышьяка в подземных водах. Например, в г. Балей водоснабжение осуществляется из подземных источников посредством скважин глубиной 120 – 150 м, эксплуатирующих водоносный комплекс нижнемеловых осадочных отложений, в пробах воды которого отмечены повышенные концентрации мышьяка (от $0,02$ до $0,11$ мг/л) [3]. В Нерчинском районе в скважинах глубиной 100 – 120 м концентрации мышьяка в пробах воды регистрировались на уровне от $0,02$ до $4,3$ мг/л (до 86 ПДК). В воде системы централизованного водоснабжения мышьяк обнаружен на уровне $2,5$ мг/л (50 ПДК) [12]. В 2021–2022 гг. содержание мышьяка как в районе водозабора, так и в воде распределительных сетей Казани (источник водоснабжения — Куйбышевское водохранилище) составляло $0,211$ – $0,296$ мг/л, а в конечной точке потребления — $0,18$ мг/л [22]. В подземных водах северных районов Обь-Зайсанской склад-

чатой области отмечено повышенное содержание мышьяка: в Советском районе Новосибирска — от 0,013–0,085 [23] до 0,27 мг/л [24], в Новосибирском и Тогучинском районах — 0,036 мг/л [23].

При исследовании качества поверхностных вод верховья реки Черек Безенгийский (Кабардино-Балкарская Республика) установлены концентрации мышьяка в пределах 0,00146–0,00277 мг/л, а в водах речных притоков — 0,00076–0,02 мг/л [25]. На территории республик Башкортостан и Северная Осетия — Алания, а также в Тульской области обнаружены концентрации мышьяка в среднем 0,00021 и 0,0009 мг/л соответственно [26–29].

Таким образом, природно обусловленное высокое содержание мышьяка в подземных водах наблюдается во многих регионах, в то время как антропогенное, как правило, имеет локальный характер [7]. Основной причиной являются депрессионные воронки, формирующиеся вследствие длительной эксплуатации водоносного горизонта, усиливающие процессы подтягивания и накопления мышьяка в подземных водах на территории геохимических провинций [10]. Также влияют добыча полезных ископаемых, цветных металлов, сброс сточных вод и их осадков, выбросы угольных электростанций, стоки птицефабрик. На горнодобывающих и угольных электростанциях значительную роль играет выщелачивание мышьяка из хвостохранилищ заброшенных шахт и отвалов. Значительное количество As попадает в сточные воды при добыче золота с использованием цианида [1, 5–7].

Большинство случаев интоксикаций людей As связано с воздействием неорганического мышьяка, который в виде арсенатов и арсенитов хорошо всасывается в желудочно-кишечном тракте, легко проникает через плаценту [1]. При употреблении питьевой воды примерно 95% мышьяка абсорбируется в кишечнике, а выделяется преимущественно с мочой [1]. Согласно физиологически обоснованной фармакокинетической модели Эль-Масри — Кеньона, соотношение суточных доз поступления неорганического мышьяка и его выделения с мочой составляет $\approx 9 : 10$ [2].

Поступая в организм, As дестабилизирует более 200 ферментов, участвующих в биохимических реакциях клетки и синтезе ДНК, активизирует процессы пероксидации, связывает тиольные (сульфгидрильные) группы в тканевых белках [11]. Механизмы действия арсенатов и арсенитов несколько отличаются. Механизм действия арсената основан на замене фосфатной группы в ферментах. Например, он заменяет фосфат в глюкозо-6-фосфате и 6-фосфоглюконате *in vitro*, фосфат — в натриевом насосе и анионообменной транспортной системе эритроцитов человека. Также он уменьшает образование аденозинтрифосфата (АТФ) *in vitro* и заменяет фосфат в ферментативных реакциях. Результатом этого становится истощение АТФ в клеточных системах [1]. Однако многочисленные исследования показывают, что основа токсичности мышьяка — его превращение в арсенит. Механизм действия арсенита основан на реакциях с тиолсодержащими молекулами — глутатионом и цистеином. Метилированный трёхвалентный мышьяк в составе монометиларсоновой кислоты (III) является мощным ингибитором глутатион-редуктазы и тиоредоксинредуктазы. Арсенит ингибирует пируватдегидрогеназу, нарушая работу системы переноса электронов для производства АТФ [1].

Результаты исследований как *in vitro*, так и *in vivo* на людях и животных свидетельствуют о возможном усилении мышьяком перекисного окисления липидов, продукции супероксидов, образовании гидроксильных радикалов, повреждающих ДНК [1]. Хроническое поступление в организм мышьяка даже в малых дозах изменяет гены и белки, которые связаны с окислительным стрессом и воспалением, что может приводить к поражению практически всех органов и систем [1, 5, 12].

Во многих исследованиях сообщалось о сердечно-сосудистых эффектах при пероральной экспозиции неорганическими соединениями мышьяка. Воздействие неорганического мышьяка на сердце имеет множество последствий, в числе которых изменение деполяризации миокарда, нару-

шения сердечного ритма и развитие ишемической болезни сердца [1, 12]. Эти эффекты наблюдались как после острого, так и хронического воздействия неорганического мышьяка [1]. В Техасе исследователи В. Гонг и Дж. О'Брайан выявили, что ишемическая болезнь сердца была связана с воздействиями мышьяка в малых концентрациях (0,0022–0,0153 мг/л) [2]. Исследователи из Внутренней Монголии (Китай) установили прямую связь между концентрацией мышьяка в питьевой воде (0,00016–0,2 мг/л), содержанием его в ногтях на ногах и повышением заболеваемости болезнями системы кровообращения. В том же регионе выявлено увеличение частоты случаев удлинения интервала QT в зависимости от концентрации мышьяка в питьевой воде: увеличение на 3,9% при концентрации 0,02 мг/л; на 11% при концентрациях 0,11–0,3 мг/л; на 20,6% при концентрациях 0,43–0,69 мг/л [2]. Воздействие мышьяка также выражается в индуцировании развития артериальной гипертензии и атеросклероза. В Тайване повышенная частота артериальной гипертензии была связана с потреблением воды из скважин с концентрациями мышьяка в диапазоне 0,25–0,7 мг/л, а заболеваемости болезнями системы кровообращения — при концентрациях более 0,35 мг/л [1]. Среди жителей юго-запада Тайваня, подвергавшихся воздействию мышьяка в воде в концентрациях 0,7–0,93 мг/л, был распространён атеросклероз сонных артерий, на который указывал индекс CIMT (*Carotid Intima-Media Thickness* — толщина интима-медиа сонной артерии) [2]. В сельской местности Техаса (США) концентрация мышьяка в питьевой воде (0,0022–0,0153 мг/л) коррелировала с повышенной частотой возникновения гипертонии [2]. В штате Юта (США) выявлена связь между концентрациями мышьяка в питьевой воде (0,014–0,166 мг/л) и повышенной смертностью от гипертонической болезни [2]. Установлено значительное увеличение смертности от атеросклероза, аневризмы аорты и иных сосудистых патологий среди жителей США, употреблявших питьевую воду с содержанием мышьяка более 0,02 мг/л [1]. В экспериментальных исследованиях [2] выявлено, что атеросклероз был связан с концентрацией мышьяка в воде в диапазоне 0,05–0,0999 мг/л по сравнению с контрольной группой ($< 0,05$ мг/л). Исследователи из Чили выявили, что поступление в организм мышьяка с питьевой водой в концентрациях 0,6–0,8 мг/л увеличивает частоту акроцианоза и возникновения болезни Рейно. В расследовании хронического отравления детей в Чили выявлено утолщение артерий по всему организму, в том числе в поджелудочной железе. В одном из зарубежных исследований сообщалось о появлении периферического отёка у людей, которые пили колодезную воду, содержащую мышьяк в концентрациях более 7 мг/л в течение одной недели. В Японии при отравлении 220 людей мышьяком, содержащимся в соевом соусе, характерным был отёк лица, обычно затрагивающий веки. Расчётная доза в этом случае равнялась около 0,05 мг/кг/сут с экспозицией до двух-трёх недель. Отёк появился после первоначального воздействия и самопроизвольно разрешился. Этот эффект лёг в основу установления предельной допустимой острой пероральной дозы неорганического мышьяка с десятикратным коэффициентом запаса — 0,005 мг/кг/сут [1].

Наиболее серьёзным последствием воздействия мышьяка на сердечно-сосудистую систему является «болезнь чёрной стопы», характеризующаяся прогрессирующим нарушением кровообращения в руках и ногах, приводящим к некрозу и гангрене [1, 12]. Болезнь является эндемичной на о. Тайвань, где среднее содержание мышьяка в питьевой воде колеблется от 0,17 до 0,8 мг/л [1]. Чинг-Донг Ценг с соавт. (1968/1977) стратифицировали население, подвергшееся воздействию, на группы с низким ($< 0,3$ мг/л), средним (0,3–0,6 мг/л) или высоким ($> 0,6$ мг/л) уровнями воздействия. Дозы воздействия были разделены на контрольную, низкую, среднюю и высокую: 0,0008/0,014/0,038/0,065 мг/кг/сут соответственно. В результате исследования была обоснована безопасная доза мышьяка — 0,0008 мг/кг/сут [1].

Нервная система также подвергается негативному воздействию мышьяка при пероральном поступлении. Длительная экспозиция в дозе 0,03–0,1 мг/кг/сут приводит к развитию периферической нейропатии, которая характеризуется онемением кистей и стоп и ощущением покалывания с прогрессированием в мышечную слабость, опущением запястий и (или) лодыжек и снижением чувствительности (искажением) рефлексов [1, 12]. Гистологические признаки нейропатии включают угасающую аксонопатию и демиелинизацию. После прекращения воздействия нейропатия становится обратимой лишь частично, а восстановление, как правило, происходит медленно [1]. При этом есть основания полагать, что периферическая нейропатия может быть следствием поражения сосудов. Кроме того, некоторые исследователи отмечали связь между потреблением воды с повышенными концентрациями мышьяка и снижением IQ, а также нарушениями нейрокognитивного развития у потреблявших её детей [1, 2]. Так, в США обследовали две группы детей, потреблявших воду с разными концентрациями мышьяка – менее 0,005 и 0,005–0,01 мг/л. Показатели IQ, восприятия, рабочей памяти и понимания речи были статистически более низкими во второй группе [2]. В Китае обследовали три группы детей, потреблявших воду с разными концентрациями мышьяка, для определения влияния на уровень IQ: 87 детей – 0,19 мг/л, 253 ребёнка – 0,142 мг/л, 196 детей – 0,002 мг/л. Результаты тестов составили 95; 101 и 105 баллов соответственно [1]. В исследовании Ф. Парвеза и соавт. в 2011 г. изучена связь между концентрациями мышьяка в питьевой воде Бангладеш и координацией движений у детей в возрасте 8–11 лет с помощью тестов на равновесие, координацию движений рук, тонкое ручное управление, а также силу и ловкость. Авторы наблюдали обратную связь между показателями общей двигательной активности и координации тела и содержанием мышьяка в питьевой воде (средняя концентрация – 0,0433 мг/л) [2].

Наиболее характерное последствие длительного перорального воздействия неорганических соединений мышьяка даже в незначительных дозах (0,002–0,02 мг/кг/сут) – развитие поражений кожи [1]. Эти поражения часто используются в качестве диагностических критериев арсеникоза, для которого характерны гиперпигментация и гиперкератинизация кожи (особенно на ладонях и подошвах), образование множественных мозолей или бородавок [1, 12]. При длительных исследованиях перорального поступления As в более низких концентрациях (от 0,0004 до 0,01 мг/кг/сут), как правило, не наблюдали поражений кожи [1]. Однако в другом крупном исследовании выявлено повышение частоты кожных поражений, связанных с поступлением мышьяка с питьевой водой в концентрации 0,023 мг/л (доза 0,0012 мг/кг/сут). Механизм возникновения кожных эффектов до конца не изучен: симптомы, характерные для человека, не были обнаружены в экспериментах на животных. На основе эпидемиологических исследований определяли дозы неорганического мышьяка, оказывающие воздействие на кожу человека. Можно выделить следующие: Naque с соавт. (2003) – 0,002 мг/кг/сут; Guha Mazumder с соавт. (1988) – 0,006 мг/кг/сут; Borgoño с соавт. (1980) – 0,01 мг/кг/сут; Borgoño and Greiber (1972), Zaldívar (1974), Valentine с соавт. (1985) – 0,02 мг/кг/сут; Cebrián et al. (1983) – 0,022 мг/кг/сут [1]. В совокупности эти исследования показывают, что пороговая доза неорганического мышьяка для возникновения гиперпигментации и гиперкератоза составляет приблизительно 0,002 мг/кг/сут [1].

Пероральное воздействие низких доз мышьяка, как правило, не вызывает поражения органов дыхания. Однако в некоторых исследованиях сообщалось о незначительных респираторных симптомах, таких как кашель, выделение мокроты, ринорея и боль в горле у людей, получавших неорганический мышьяк перорально в дозах 0,03–0,05 мг/кг/сут [1]. Симптомы значительного поражения органов дыхания, в том числе отёк лёгких при пероральном поступлении мышьяка в дозах 8 мг/кг/сут, были вторичны и возникали как следствие поражения сердечно-сосудистой системы [1].

Неорганические соединения мышьяка оказывают раздражающее действие на ткани желудочно-кишечного тракта. Например, хроническое пероральное поступление As в дозах 0,005–0,01 мг/кг/сут приводит к развитию тошноты, рвоты, диареи и боли в животе [1, 12]. Были также отмечены увеличение и болезненность печени, а в крови иногда обнаруживали повышенный уровень печёночных ферментов [1, 12]. Эти эффекты чаще всего наблюдались после многократного воздействия мышьяка в дозах 0,01–0,1 мг/кг/сут, хотя сообщалось, что при хроническом воздействии мышьяк оказывает похожий эффект в дозе 0,006 мг/кг/сут [1].

В исследовании Хуанга (2014) было установлено, что употребление питьевой воды с содержанием мышьяка в концентрациях 0,9 мг/л было связано со статистически значимым повышением заболеваемости диабетом у взрослых в Камбодже [2]. Таким образом, можно предполагать, что поджелудочная железа имеет повышенную чувствительность к токсическому воздействию неорганических соединений мышьяка.

В большинстве клинических исследований острой и хронической интоксикации неорганическим мышьяком не сообщалось о клинически подтверждённом значительном повреждении почек даже при серьёзных нарушениях в других системах. В некоторых случаях отмечались повышенные уровни креатинина в сыворотке крови, а также наблюдалась лёгкая протеинурия, которая могла быть следствием поражения иных органов и систем [1].

Анемия и лейкопения являются частыми последствиями как острого, так и хронического воздействия на людей As в дозах 0,002 мг/кг/сут или более. Эти эффекты могут быть обусловлены как прямым цитотоксическим или гемолитическим воздействием на клетки крови, так и подавлением эритропоэза, поскольку мышьяк влияет на группу ферментов, ответственных за синтез и деградацию гема, в том числе за ингибирование копропорфириногенаксидазы и гем-синтазы, а также активацию гем-оксигеназы [1].

В некоторых исследованиях указывалось, что воздействие мышьяка, содержащегося в питьевой воде, приводит к неблагоприятным репродуктивным последствиям, которые выражались в увеличении частоты репродуктивных потерь, что объясняется проникновением мышьяка через плаценту. Обследование 96 женщин в Бангладеш и 533 женщин из Западной Бенгалии (Индия), которые в течение 5–10 лет употребляли воду, содержащую мышьяк в концентрациях 0,05–0,1 мг/л (дозы 0,006–0,008 мг/кг/сут), показало значительное увеличение числа самопроизвольных аборт ($p = 0,008$), мертворождений ($p = 0,046$) и преждевременных родов ($p = 0,018$) по сравнению с группой, не подвергавшейся воздействию [1, 2]. Что касается последствий для здоровья плода и новорождённых (низкая масса тела при рождении) и развития нейрокognитивных эффектов, предполагаемая доза оценивается в 0,000079 мг/кг/сут (концентрация в воде 0,0029 мг/л) и 0,000105 мг/кг/сут (концентрация в воде 0,004 мг/л) [2].

Отдельно стоит рассматривать канцерогенный эффект воздействия мышьяка, выражающийся, по данным эпидемиологических исследований, в развитии злокачественных новообразований кожи, мочевого пузыря, почек, печени, лёгких и предстательной железы. Парадоксально, но воздействие неорганических форм мышьяка не приводило к статистически значимому росту частоты злокачественных новообразований в экспериментах на животных. В настоящее время, согласно US EPA, для As комбинированный фактор канцерогенного потенциала составляет 32 мг/кг/сут по действию на лёгкие и мочевой пузырь. В Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания» (далее – Руководство) фактор канцерогенного потенциала равен 1,5 мг/кг/сут.

Согласно Руководству, референтная доза мышьяка в питьевой воде составляет 0,0000035 мг/кг/сут. В соответствии с представленными в Руководстве формулами для получения такой дозы концентрация мышьяка в воде должна составлять 0,00013 мг/л (0,013 ПДК). Однако в 2025 г. на сай-

те US EPA был размещён обновлённый токсикологический обзор, в котором была пересмотрена референтная доза (RfD) мышьяка [30]. Так, новая RfD мышьяка в питьевой воде, основанная на увеличении заболеваемости людей диабетом и ишемической болезнью сердца, составляет $6 \cdot 10^{-5}$ мг/кг/сут (0,00006 мг/кг/сут) [2], что в 17 раз больше RfD, зафиксированной в Руководстве. Для получения такой дозы концентрация мышьяка в воде должна составлять 0,0022 мг/л. Это соответствует 0,22 ПДК при стандартных параметрах экспозиции (2 л воды в сутки, масса тела человека 70 кг, воздействие в течение 350 дней в году и 30 лет для неканцерогенных эффектов).

В мировой практике при использовании современных методов лабораторного контроля нижний предел количественного определения мышьяка в воде — концентрация 0,0001 мг/л. Наиболее популярным методом является атомно-абсорбционная спектрометрия [31]. Что касается России, то на сайте Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (<https://fgis.gost.ru>) размещено множество аттестованных методик исследования мышьяка в питьевой воде, среди которых одна из наиболее чувствительных — ФР.1.31.2015.19729 «Вода питьевая, природная (поверхностная, подземная), очищенная сточная, атмосферные осадки и снежный покров. Методика измерений массовой концентрации мышьяка и селена методом атомно-эмиссионной спектрометрии». Диапазон измерений массовой концентрации мышьяка данной методики составил от 0,0004 до 1 мг/дм³.

В то же время для измерения концентрации неорганического мышьяка в воде в рамках производственного лабораторного контроля и социально-гигиенического мониторинга используют семь основных методик (с диапазонами определения мышьяка в воде) [12, 30, 32–36]:

- ПНД Ф 14.1:2.4.135–98 «Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» (0,005–50 мг/л);
- ГОСТ Р 57162–2016 «Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией» (0,005–5 мг/л);
- ГОСТ Р 51309–99 «Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии» (0,005–0,3 мг/л);
- ГОСТ 31870–2012 «Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии» (0,005–0,3 мг/л);
- МУ 31–09/04 «Количественный химический анализ проб питьевых, природных и сточных вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации мышьяка методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА» (0,002–0,2 мг/л);
- ГОСТ 31866–2012 «Вода питьевая. Определение содержания элементов методом инверсионной вольтамперометрии» (0,001–0,2 мг/л);
- ПНД Ф 14.1:2.4.140–98 «Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций бериллия, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, сурьмы, хрома в питьевых, природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией» (0,0005–0,3 мг/л).

Таким образом, нижний предел количественного определения мышьяка вышеперечисленных методик в Российской Федерации варьирует в пределах от 0,0004 до 0,005 мг/л. Однако в большинстве исследований применяется ГОСТ Р 57162–2016, для которого нижним пределом обнаружения мышьяка является концентрация в 0,005 мг/л [12, 30, 32–36]. Использование таких методик приводит к значительным неопределёностям при оценке риска для здоровья населения и может стать одним из доводов против ужесточения действующей ПДК мышьяка в питьевой воде до 0,002 мг/л, со-

ответствующей референтной дозе, принятой US EPA в 2025 г. Поэтому необходимо экономико-гигиеническое обоснование использования более чувствительных методик (с нижним пределом количественного определения не выше 0,001 мг/л). Кроме того, обсуждение пересмотра ПДК потребует анализа технической достижимости данного норматива, поскольку не исключено, что в силу особенностей ряда геохимических провинций питьевая вода в отдельных случаях даже с учётом применения наилучших доступных технологий очистки объективно не сможет соответствовать предлагаемому нормативу содержания мышьяка. Следовательно, соотношения «риск — возможности контроля» и «риск — техническая достижимость» требуют дальнейшего изучения.

Ограничения исследования. Не во всех изученных научных работах учтены социально-экономические и поведенческие факторы риска (курение и др.), а также совместная экспозиция с другими токсичными веществами (свинец, кадмий, марганец), которые могут усиливать эффекты воздействия мышьяка. Также оценка экспозиции в большинстве эпидемиологических исследований основывалась на единичных или редких замерах концентрации мышьяка в воде из централизованных источников, тогда как индивидуальная экспозиция могла значительно варьировать в зависимости от потребления воды из разных источников, фактического объёма выпиваемой воды, продолжительности проживания на данной территории и способов водоподготовки. Указанные ограничения могут приводить как к недооценке, так и к переоценке связей между низкими концентрациями мышьяка и выявленными эффектами, что необходимо учитывать при пересмотре гигиенических нормативов.

Заключение

Обзор показал, что негативные эффекты возникали при длительном употреблении людьми воды с концентрациями неорганического мышьяка, не превышавшими отечественных ПДК: 0,0062 мг/л (0,62 ПДК) — ИБС и артериальная гипертензия; 0,0099 мг/л (0,99 ПДК) — снижение когнитивных функций у детей; 0,01 мг/л (1 ПДК) — нарушение проводимости сердца.

В 2025 г. US EPA была установлена новая референтная доза мышьяка в питьевой воде $6 \cdot 10^{-5}$ мг/кг/сут, что в 17 раз выше, чем в действующем Руководстве Р 2.1.10.3968–23. Доза $6 \cdot 10^{-5}$ мг/кг/сут соответствует концентрации мышьяка в воде 0,0022 мг/л, это составляет 0,22 действующей в России ПДК. Новая RfD выше, но её пересмотр не отменяет того, что реальные эффекты у людей могут наблюдаться при концентрациях ниже 0,01 мг/л. По результатам анализа установлено, что отдельные клинические эффекты возникают при различных концентрациях и дозах мышьяка, в связи с чем рекомендуется установить разные референтные дозы мышьяка для отдельных критических органов и систем.

Используемые методики не всегда позволяют определить мышьяк в концентрациях ниже 0,005 мг/л, при этом не исключено, что в отдельных случаях даже применение наилучших доступных технологий не позволит снизить концентрацию мышьяка в питьевой воде до уровня менее 0,01 мг/л.

Снижение действующей ПДК мышьяка в питьевой воде до уровня, соответствующего референтной дозе в $6 \cdot 10^{-5}$ мг/кг/сут, установленной US EPA в 2025 г., требует решения двух самостоятельных задач. Во-первых, необходимо наличие аттестованной методики количественного определения мышьяка с нижним пределом не более 0,5 предлагаемого норматива, тогда как распространённые в России методики преимущественно указывают предел 0,005 мг/л. Во-вторых, требуется оценка технической достижимости такого норматива в геохимических провинциях, где даже применение наилучших доступных технологий очистки воды может не обеспечивать уменьшение концентрации мышьяка до уровня ниже действующей ПДК (0,01 мг/л). Без решения указанных задач введение более жёсткого норматива невозможно независимо от его гигиенической обоснованности.

Литература

(п.п. 1, 2, 5, 17–20, 31 см. References)

3. Нимаева Б.В., Михайлова Л.А., Белякова Е.В. Гигиенический анализ содержания мышьяка в подземных водах и оценка риска для здоровья населения. В кн.: *Современные проблемы экологии и здоровья населения: материалы II Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, и V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*. Иркутск; 2023: 96–100. <https://doi.org/10.12731/978-5-98277-383-8-art20> <https://elibrary.ru/hzzfsx>
4. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. *Поведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Трансформация, адсорбция / десорбция, миграция*. Новосибирск; 2012.
6. Воробьев А.Е., Шесняк Е.Л., Воробьев К.А. Загрязнение природных пресных вод мышьяком: от Казахстана до Дагестана. *Труды университета*. 2021; (1): 61–6. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_61 <https://elibrary.ru/mrrsgs>
7. Самедов Ш.Г., Ибрагимова Т.И. Загрязнение подземных вод мышьяком равнинной части Дагестана. *Экология и промышленность России*. 2015; 19(5): 61–3. <https://elibrary.ru/tuiykn>
8. Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В., Лиманцева О.А., Teng M. Модель формирования загрязнения подземных вод мышьяком. Причины загрязнения. *Геохимия*. 2010; (7): 773–8. <https://elibrary.ru/mtjahh>
9. Коваленко К.А., Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И. Марганцевые руды как перспективный сорбент для удаления соединений мышьяка из подземных вод. *Вода: химия и экология*. 2013; (10): 80–4. <https://elibrary.ru/rovuykn>
10. Курбанова Л.М., Самедов Ш.Г., Газалиев И.М., Абдулмутаимова Т.О. Мышьяк в подземных водах Северо-Дагестанского артезианского бассейна. *Геохимия*. 2013; (3): 262. <https://doi.org/10.7868/S0016752513030047> <https://elibrary.ru/puxthf>
11. Исаханова А.Т., Алиев З.М., Муташев Р.К., Шапиев Б.И. Очистка природных вод от соединений мышьяка. *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2008; (1): 26–9. <https://elibrary.ru/inlyml>
12. Устинова О.Ю., Шур П.З., Носов А.Е. Санитарно-гигиеническая характеристика риска и клиническая оценка причиненного вреда здоровью населения геохимической провинции при длительном поступлении мышьяка с питьевой водой. *Анализ риска здоровью*. 2019; (4): 148–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.16> <https://elibrary.ru/tsvipp>
13. Лешкова И.В., Устинова О.Ю., Шур П.З. Оценка потенциального канцерогенного и неканцерогенного рисков здоровью населения геохимической провинции, обусловленного потреблением питьевой воды с повышенным содержанием мышьяка. В кн.: *Анализ риска здоровью – 2021. Внешнесредовые, социальные, медицинские и поведенческие аспекты. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2021: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Том 1*. Пермь; 2021: 359–64. <https://elibrary.ru/knhcuq>
14. Сазонова О.В., Сергеев А.К., Чупахина Л.В., Рязанова Т.К., Судакова Т.В. Анализ риска здоровью населения, обусловленного загрязнением питьевой воды (опыт Самарской области). *Анализ риска здоровью*. 2021; (2): 41–51. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.2.04> <https://elibrary.ru/efwvcd>
15. Савина К.А., Панкратова Ю.А. Мышьяк в питьевой воде как фактор индивидуального риска здоровью. В кн.: *Анализ риска здоровью – 2021. Внешнесредовые, социальные, медицинские и поведенческие аспекты. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2021: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Том 1*. Пермь; 2021: 365–9. <https://elibrary.ru/qlgttz>
16. Кикю П.Ф., Кислицына Л.В., Богданова В.Д., Сабирова К.М. Гигиеническая оценка качества питьевой воды и риски для здоровья населения Приморского края. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(1): 94–101. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-94-101> <https://elibrary.ru/ywahit>
21. Абдулмутаимова Т.О., Рамазанов О.М. Биомаркеры экспозиции мышьяка в условиях биогеохимических провинций. *Токсикологический вестник*. 2023; 31(6): 399–405. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-6-399-405> <https://elibrary.ru/ngauf>
22. Степанова Н.Ю., Емельянова А.В., Зубкова А.Д. Содержания мышьяка в питьевой воде и оценка риска здоровью населения города Казани. В кн.: *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции*. Пенза; 2022: 370–4. <https://elibrary.ru/lvqsgd>
23. Максимова А.А., Черных А.В., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф. и др. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023; 334(5): 17–26. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/4033> <https://elibrary.ru/ywhexo>
24. Яндолла Н.И. Мышьяк в природных водах восточной части Новосибирской области. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2025; (2/3): 47–52. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2025-2-3-47-52> <https://elibrary.ru/eytzik>
25. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Потенциально токсичные элементы в поверхностных водах бассейна реки Черек Безенгийский. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022; (5): 105–15. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-5-109-105-115> <https://elibrary.ru/xwlsdh>
26. Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Рафикова Л.А., Бактыбаева З.Б., Рахимова А.Р., Аллаярова Г.Р. и др. Эколого-гигиенические риски здоровью населения, связанные с употреблением питьевой воды централизованного водоснабжения (на примере агропромышленных районов Башкортостана). *Эпоха науки*. 2025; (42): 661–8. <https://elibrary.ru/xnrmvt>
27. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон. *Геология и геофизика Юга России*. 2025; 15(2): 219–30. <https://doi.org/10.46698/VNC.2025.46.62.001> <https://elibrary.ru/cbupey>
28. Горелкина А.И., Савинова Л.Н. Мониторинговые исследования и систематизация данных концентрации тяжелых металлов в реке Упа (г. Тула). В кн.: *Приоритетные направления развития науки и технологий: Сборник докладов XXXV Международной научно-практической конференции*. Тула; 2024: 92–7. <https://elibrary.ru/rikupd>
29. Савинова Л.Н., Векшина В.А., Горелкина А.И. Прогноз содержания некоторых тяжелых металлов в реке Упа (г. Тула). В кн.: *Приоритетные направления развития науки и технологий: Сборник докладов XXXV Международной научно-практической конференции*. Тула; 2024: 97–105. <https://elibrary.ru/uuaews>
30. Ашурбекова Т.Н., Исаева Н.Г., Мурзаева А.Н., Мусинова Э.М., Гаджимусаева З.Г., Абдурагимов Р.Н. Сравнительный анализ качества артезианских вод. *Теоретические и прикладная экология*. 2018; (3): 40–7. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-040-047> <https://elibrary.ru/yxswff>
32. Ашурбекова Т.Н., Мусинова Э.М., Гаджимусаева З.Г. О качестве воды артезианских скважин. *Известия Дагестанского ГАУ*. 2019; (1): 10–5. <https://elibrary.ru/izyhef>
33. Ашурбекова Т.Н., Гаджимусаева З.Г., Исаева Н.Г., Мусинова Э.М., Абдулмаликов Г.Г., Мутуев М.У. Анализ подземных вод поселка Богатыревка. *Известия Дагестанского ГАУ*. 2020; (2): 7–11. <https://elibrary.ru/qrcfca>
34. Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А., Пустовалова О.В., Пескова Е.В. Влияние повышенного содержания мышьяка в питьевой воде на изменения биохимических показателей негативных эффектов у детей, проживающих на территории природной геохимической провинции. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(8): 834–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-8-834-840> <https://elibrary.ru/tpyepn>
35. Язиков Е.Г., Мишанькин А.Ю., Осипова Н.А., Филимонов Е.А., Карпенко Ю.А., Собянин Ю.П. Геохимические особенности природных вод территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-Якутия). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021; 332(2): 176–89. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3054> <https://elibrary.ru/lbmzfu>
36. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2021; 11(3): 172–84. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.20.60.014> <https://elibrary.ru/kzjjij>

References

1. U.S. Department of Health and Human Services. Centers for Disease Control and Prevention (U.S.). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for arsenic; 2007. Available at: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/95224>
2. IRIS Toxicological Review of Inorganic Arsenic; 2025. Available at: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/recordisplay.cfm?deid=253756
3. Nimaeva B.V., Mikhailova L.A., Belyakova E.V. Hygienic analysis of arsenic levels in groundwater and public health risk assessment. In: *Modern Problems of Ecology and Public Health. Proceeding of the The II All-Russian Conference with International Participation, Dedicated to the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences, and the V All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientist [Sovremennyye problemy ekologii i zdorov'ya naseleniya: materialy II Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 300-letiyu Rossiiskoi akademii nauk, i V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh]*. Irkutsk; 2023: 96–100. <https://doi.org/10.12731/978-5-98277-383-8-art20> <https://elibrary.ru/hzzfsx> (in Russian)
4. Putilina V.S., Galickaya I.V., YUganova T.I. *The Behavior of Arsenic in Soils, Rocks, and Groundwater. Transformation, Adsorption / Desorption, Migration [Povedenie mysh'yaka v pochvakh, gornyykh porodakh i podzemnykh vodakh. Transformatsiya, adsorbsiya / desorbsiya, migratsiya]*. Novosibirsk; 2011. (in Russian)
5. Bhat A., O'Hara T., Tian F., Singh B. Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water. *Environ. Sci.: Adv.* 2023; 2(2): 171–95. <https://doi.org/10.1039/d2va00218c> <https://elibrary.ru/pbgofj>
6. Vorobyov A.E., Shchesnyak E.L., Vorobyov K.A. Arsenic pollution of natural fresh waters: from Kazakhstan to Dagestan. *Tруды университета*. 2021; (1): 61–6. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_61 <https://elibrary.ru/mrrsgs> (in Russian)
7. Samedov Sh.G., Ibragimova T.I. Arsenic contamination of groundwater in the lowland part of Dagestan. *Экология и промышленность России*. 2015; 19(5): 61–3. <https://elibrary.ru/tuiykn> (in Russian)
8. Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V., Limantseva O.A., Teng M. Model for the formation of arsenic contamination in groundwaters: 3. Causes of contamination. *Geochemistry International*. 2010; 48(7): 725–30. <https://elibrary.ru/mwivuo>

Review article

9. Kovalenko K.A., Bochkarev G.R., Pushkareva G.I. Manganese ores as perspective sorbent for arsenic compound removal from underground waters. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2013; (10): 80–4. <https://elibrary.ru/rovykn> (in Russian)
10. Kurbanova L.M., Samedov S.G., Gazaliev I.M., Abdulmutalimova T.O. Arsenic in the groundwaters of the North Dagestan artesian basin. *Geochemistry International*. 2013; 51(3): 237–9. <https://elibrary.ru/rfdndx>
11. Isakhanova A.T., Aliev Z.M., Mutashv R.K., Shapiev B.I. Purification of natural waters from arsenic compounds. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*. 2008; (1): 26–9. <https://elibrary.ru/inlyml> (in Russian)
12. Ustinova O.Yu., Shur P.Z., Nosov A.E. Sanitary-hygienic characteristics of health risk and clinical assessment of damage to health done to population living in a specific geochemical province under long-term exposure to arsenic introduced with drinking water. *Health Risk Analysis*. 2019; (4): 148–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.16> <https://elibrary.ru/dgepxy>
13. Leshkova I.V., Ustinova O.Yu., Shur P.Z. Assessment of potential carcinogenic and non-carcinogenic risks to the health of the population of the geochemical province caused by the consumption of drinking water with a high content of arsenic. In: *Health Risk Analysis – 2021. Environmental, Social, Medical, and Behavioral Aspects. In Conjunction with the International Meeting on Environment and health RISE-2021: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Volume 1 [Analiz riska zdorov'yu-2021. Vneshnesredovye, sotsial'nye, meditsinskie i povedencheskije aspekty. Sovmestno s mezhdunarodnoi vstrechei po okruzhayushchei srede i zdorov'yu RISE-2021: Materialy XI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Tom 1]. Perm'; 2021: 359–64. <https://elibrary.ru/knhcuy> (in Russian)*
14. Sazonova O.V., Sergeev A.K., Chupakhina L.V., Ryazanova T.K., Sudakova T.V. Analyzing health risks caused by contaminated drinking water (experience gained in Samara region). *Health Risk Analysis*. 2021; (2): 42–52. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.2.04> <https://elibrary.ru/hkfwzc>
15. Savina K.A., Pankratova Yu.A. Arsenic in drinking water as an individual health risk factor. In: *Health Risk Analysis – 2021. Environmental, Social, Medical, and Behavioral Aspects. In Conjunction with the International Meeting on Environment and health RISE-2021: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Volume 1 [Analiz riska zdorov'yu-2021. Vneshnesredovye, sotsial'nye, meditsinskie i povedencheskije aspekty. Sovmestno s mezhdunarodnoi vstrechei po okruzhayushchei srede i zdorov'yu RISE-2021: Materialy XI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Tom 1]. Perm'; 2021: 365–9. <https://elibrary.ru/qlqtz> (in Russian)*
16. Kiku P.F., Kisilitsyna L.V., Bogdanova V.D., Sabirova K.M. Hygienic assessment of drinking water quality and risks to the health of the Primorsky territory population. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(1): 94–101. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-94-101> <https://elibrary.ru/ywahrt>
17. Water quality standards based on article 4 of the Law on Water Supply Facilities. Available at: <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2002/11/s1108-5f.html> (in Japanese)
18. GB 5749-2022 Standards for Drinking Water Quality. National Standard of the People's Republic of China. Available at: https://favv-afscs.be/sites/default/files/export/vtp/cn/03/20240606_GB5749_2022.pdf
19. IS 10500: 2012 Indian Standard. Drinking water – specification (Second Revision). Available at: <https://law.resource.org/pub/in/bis/S06/is.10500.2012.pdf>
20. Drinking water quality in Bangladesh. Bangladesh MICS 2012–2013: Water Quality Thematic Report, Government of Bangladesh, Bangladesh Bureau of Statistics, and UNICEF; 2018. Available at: <https://www.unicef.org/bangladesh/sites/unicef.org.bangladesh/files/2018-10/Drinking%20Water%20Quality%20in%20Bangladesh.pdf>
21. Abdulmutalimova T.O., Ramazanov O.M. Biomarkers of arsenic exposure in biogeochemical provinces. *Toxikologicheskii vestnik*. 2023; 31(6): 399–405. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-6-399-405> <https://elibrary.ru/ngauuf> (in Russian)
22. Stepanova N.Yu., Emelyanova A.V., Zubkova A.D. Risk assessment of high arsenic content in the drinking water of the Kazan city. In: *Ecology and Life Safety: Collection of Articles of the XXII International Scientific and Practical Conference [Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeystel'nosti: Sbornik statei XXII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Penza; 2022: 370–4. <https://elibrary.ru/lvqsgd> (in Russian)
23. Maksimova A.A., Chernykh A.V., Novikov D.A., Dultsev F.F., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., et al. Toxic elements in groundwater in the northern regions of the Ob-Zaysan folded region. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2023; 334(5): 17–26. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/4033> <https://elibrary.ru/ywhexo> (in Russian)
24. Yandola N.I. Arsenic in natural waters of the eastern part of the Novosibirsk region. *Interesko Geo-Sibir'*. 2025; 2(3): 47–52. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2025-2-3-47-52> <https://elibrary.ru/eytzik> (in Russian)
25. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Potentially toxic elements in the surface waters of the Cherek Bezengysky river basin. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2022; (5): 105–15. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-5-109-105-115> <https://elibrary.ru/xwlsdh> (in Russian)
26. Valeev T.K., Sulymanov R.A., Rafikova L.A., Baktybayeva Z.B., Rakhimova A.R., Allayarova G.R., et al. Environmental and hygienic risks to public health associated with drinking water from centralised water supply (on the example of agro-industrial districts of Bashkortostan). *Epokha nauki*. 2025; (42): 661–8. <https://elibrary.ru/xnrmvt> (in Russian)
27. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon river basin. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2025; 15(2): 219–30. <https://doi.org/10.46698/VNC.2025.46.62.001> <https://elibrary.ru/cbupey> (in Russian)
28. Gorelkina A.I., Savinova L.N. Monitoring studies and systematization of data on the concentration of heavy metals in the Upa River (Tula). In: *Priority Directions of Science and Technology Development: Collection of Reports of the XXXV International Scientific and Practical Conference [Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i tekhnologii: Sbornik dokladov XXXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Tula; 2024: 92–7. <https://elibrary.ru/rikupd> (in Russian)
29. Savinova L.N., Vekshina V.A., Gorelkina A.I. Forecast of the content of some heavy metals in the Upa River (Tula). In: *Priority Directions of Science and Technology Development: Collection of Reports of the XXXV International Scientific and Practical Conference [Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i tekhnologii: Sbornik dokladov XXXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Tula; 2024: 97–105. <https://elibrary.ru/uauaews> (in Russian)
30. Ashurbekova T.N., Isaeva N.G., Murzaeva A.N., Musinova E.M., Gadzhimusaeva Z.G., Abduragimov R.A. Comparative analysis of artesian water quality. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018; (3): 40–7. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-040-047> <https://elibrary.ru/yxswff> (in Russian)
31. WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda; 2022. Available at: <https://who.int/publications/i/item/9789240045064>
32. Ashurbekova T.N., Musinova E.M., Gadzhimusaeva Z.G. Artesian water quality. *Izvestiya Dagestanskogo GAU*. 2019; (1): 10–5. <https://elibrary.ru/izyhcf> (in Russian)
33. Ashurbekova T.N., Gadzhimusaeva Z.G., Isaeva N.G., Musinova E.M., Abdulmalikov G.G., Mutuev M.U. Analysis of underground waters in village Bogatyrevka. *Izvestiya Dagestanskogo GAU*. 2020; (2): 7–11. <https://elibrary.ru/qrcfca> (in Russian)
34. Koldibekova Ju.V., Zemlyanova M.A., Pustovalova O.V., Peskova E.V. Negative impacts exerted by elevated arsenic concentrations in drinking water on biochemical parameters in children living in a specific geochemical province. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(8): 834–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-8-834-840> <https://elibrary.ru/tpyepn> (in Russian)
35. Yazikov E.G., Mishankin A.Yu., Osipova N.A., Filimonenko E.A., Karpenko Yu.A., Sobyannin Yu.P. Geochemical features of natural waters in the Vyun gold deposit (the Republic of Sakha (Yakutia)). *Inzhiniring georesursov*. 2021; 332(2): 176–89. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3054> <https://elibrary.ru/lbmzfu> (in Russian)
36. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka river basin and geochemical features of the region. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2021; 11(3): 172–84. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.20.60.014> <https://elibrary.ru/kzjjij> (in Russian)

Сведения об авторах

Степанян Алекс Артурович, мл. науч. сотр. отделения коммунальной гигиены ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.stepanian@s-znc.ru

Ковшов Александр Александрович, канд. мед. наук, и. о. руководителя отд. гигиены, вед. науч. сотр. ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.kovshov@s-znc.ru

Исаев Даниил Сергеевич, зав. отделением коммунальной гигиены, мл. науч. сотр. ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d.isaev@s-znc.ru

Шилов Виктор Васильевич, доктор мед. наук, гл. науч. сотр. ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vshilov@inbox.ru

About the authors

Aleks A. Stepanyan, junior researcher at the Communal Hygiene Department, Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8153-1131> E-mail: a.stepanian@s-znc.ru

Aleksandr A. Kovshov, PhD (Medicine), acting head, Hygiene Department, leading researcher, Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9453-8431> E-mail: a.kovshov@s-znc.ru

Daniil S. Isaev, head, Communal Hygiene Department, junior researcher, Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9165-1399> E-mail: d.isaev@s-znc.ru

Viktor V. Shilov, DSc (Medicine), Chief Researcher, Northwest Public Health Research Center, St. Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3256-2609> E-mail: vshilov@inbox.ru