

© БАБАЯН Г.Г., САКОЯН А.Г., 2020

Бабаян Г.Г., Сакоян А.Г.

## Тяжёлые металлы и мышьяк в питьевой воде и оценка риска здоровью населения региона с развитой горнодобывающей промышленностью

Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, 0025, Ереван, Республика Армения

**Введение.** Водозабор питьевой воды для городов и сёл южной Армении осуществляется из малых горных рек бассейнов Вохчи и Мегри, вода которых очищается на пяти очистных станциях. В бассейнах рек сосредоточены основные медно-молибденовые и золоторудные промышленные центры республики. Целью исследования является изучение тяжёлых металлов Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sn, Sb, Se, Zn, Hg, Te в системах централизованного питьевого водоснабжения и оценка рисков питьевой воды для здоровья населения.

**Материал и методы.** В течение 2016–2017 гг. из 43 пунктов отбора взято и проанализировано 53 основные пробы воды, из которых 14 – из поверхностных источников водоснабжения, 16 – со станций очистки воды, 33 – из водопроводных сетей. Тяжёлые металлы определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Для оценки качества воды в местах водозабора использованы экологические (региональные) нормативы и национальные и международные стандарты питьевых вод. Оценён риск развития неканцерогенных и канцерогенных эффектов при пероральном их поступлении и дермальной экспозиции водопроводной воды.

**Результаты.** В местах водозабора регионально-фоновые уровни поверхностных вод превышают концентрации алюминия, железа, молибдена, олова, сурьмы (1,1–13,3 раза). Эффективность очистки воды на очистных станциях по разным металлам составляет 12–69%. Концентрации тяжёлых металлов в питьевых водах не превышают нормы. Риск развития у населения неканцерогенных эффектов при хроническом воздействии питьевой воды на организм человека несущественен ( $HI < 1$ ), а суммарный канцерогенный риск превышает безопасный предел развития рака по мышьяку ( $CR = 9,59 \cdot 10^{-5}$ ).

**Заключение.** Допустимое качество питьевой воды, поступающей к потребителю, ещё не показатель надёжного и безопасного питьевого водоснабжения на изученной территории ввиду загрязнённости воды в местах водозабора, устаревших технологий очистки, плохого санитарно-технического состояния станций и водопроводных сетей.

**Ключевые слова:** качество питьевой воды; тяжёлые металлы; горнорудная промышленность; оценка риска для здоровья населения.

**Для цитирования:** Бабаян Г.Г., Сакоян А.Г. Тяжёлые металлы и мышьяк в питьевой воде и оценка риска здоровью населения региона с развитой горнодобывающей промышленностью. Гигиена и санитария. 2020; 99 (7): 725-732. DOI: <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-7-725-732>

**Для корреспонденции:** Бабаян Гаяне Грантовна, доктор тех. наук, старш. науч. сотр. отдела геохимии Центра эколого-ноосферных исследований НАН РА Республики Армения. E-mail: [gayane.babayan@cens.am](mailto:gayane.babayan@cens.am)

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

**Финансирование.** Исследование проведено в рамках проекта «Оценка влияния горнорудной промышленности на качество воды поверхностных источников питьевого водоснабжения гг. Капан, Каджаран, Мегри и Агарак» при финансовой поддержке Государственного комитета по науке при Министерстве образования и науки РА (грант 15Т-1Е091).

**Участие авторов:** сбор и обработка материала – Сакоян А.Г.; статистическая обработка – Бабаян Г.Г.; написание текста – Бабаян Г.Г.; редактирование – Бабаян Г.Г.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все соавторы

Поступила 24.04.2019

Принята к печати 19.09.2019

Опубликована 28.08.2020

Gayane H. Babayan, Astghik G. Sakoyan

## Heavy metals and arsenic in drinking water and health risk assessment of the region with the developed mining industry

Center for Ecological-Noosphere Studies NAS RA, Yerevan 0025, Republic of Armenia

**Introduction.** Drinking water intended for South Armenia's towns and rural communities is abstracted from minor mountain rivers belonging to the basins of the Voghchi and Meghri, the water of which is treated at five water treatment plants. The river basins are home to the major copper molybdenum and gold ore mining centers of the republic.

**The purpose of this research** was to study heavy metals Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sn, Sb, Se, Zn, Hg, Te in centralized drinking water supply systems and assess drinking water-caused health risks to the population.

**Material and methods.** In 2016–2017 from 43 sampling sites a total of 53 basic water samples were taken, including 14– from surface water supply sources, 16 – from water treatment plants, 33– from water supply networks. Heavy metals were determined by the atomic absorption method. To assess the quality of water on water abstraction sites relevant ecological (regional) norms and national and international standards were used. The risk of development of noncarcinogenic and carcinogenic effects was assessed in the case of oral intake of and dermal exposure to tap water.

**Results.** On water abstraction sites, background regional levels of surface waters exceeded the concentration of aluminum, iron, molybdenum, tin, antimony (by as 13.3–1.1 times). Water treatment efficiency at water treatment plants is estimated at 12% - 69% depending on different metals. Concentrations of heavy metals in drinking water do not exceed the norms. The risk of development of noncarcinogenic effects in the population at chronic exposure to drinking water is insignificant ( $HI < 1$ ), whereas a total carcinogenic risk exceeds a safety limit for arsenic ( $CR = 9.59 \times 10^{-5}$ ).

**Conclusion.** *The acceptable quality of drinking water supplied to consumers is not yet an index of sustainable and safe water supply in the studied region because of a water pollution level on intake sites, obsolete water treatment technologies, poor sanitation and technical condition of plants and water networks.*

**К e y w o r d s :** *drinking water quality; mining industry; public health risk assessment.*

**For citation:** Babayan G.H., Sakoyan A.G. Heavy metals and arsenic in drinking water and health risk assessment of the region with the developed mining industry. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (7): 725-732. DOI: <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-7-725-732> (In Russian)

**For correspondence:** Gayane H. Babayan, MD, Ph.D., DSci., senior researcher of the geochemical department at the Center for Ecological-Noosphere Studies (CENS) NAS RA, Yerevan 0025, Armenia. E-mail: [info@cens.am](mailto:info@cens.am); website: <https://cens.am/>

**Information about the authors:** Babayan G.H., <https://orcid.org/0000-0001-5381-8744>

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

**Acknowledgment.** This research was done in the frames of a project "Assessment of Mining Impact on the Quality of Surface Sources of Drinking Water Supplied to Towns of Kapan, Kajaran, Meghri and Agarak" under financial support of the State Committee for Science to the Ministry of Education and Science RA (grant 15T-1E091).

**Contribution:** Babayan G.H. – statistical treatment, writing and editing. Sakoyan A.G. – collection and treatment material, collection and treatment material.

All co-authors - approval of the final version of the manuscript, responsibility for the integrity of all parts of the manuscript.

Received: April 24, 2020

Accepted: September 19, 2020

Published: August 28, 2020

## Введение

Прогрессирующие антропогенные нагрузки на окружающую среду во всём мире обуславливают дефицит доброкачественной питьевой воды. Армения в этом отношении находится в относительно благоприятных условиях, поскольку водозабор для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и сёл республики примерно на 90% осуществляется из хорошо защищённых от загрязнения подземных источников [1]. В отличие от них для населения южных регионов республики (гг. Капан, Каджаран, Мегри, Агарак и сёл Ачаран, Сюник и Карчеван) используются поверхностные воды. Их качество обычно хуже подземных, нестабильно в разные сезоны года и в большей степени зависит от антропогенных факторов [1, 2]. Головные водозаборные сооружения находятся на малых горных реках Чанахчи, Аджигадж, Гярд, Вохчи, Звар, Личк, Вагравар бассейнов рр. Вохчи и Мегри (бассейн р. Аракс). Вода очищается на пяти очистных станциях – Гехи, Чанахчи, Каджаран, Звар и Агарак. Речные водоприёмники и очистные станции воды построены ещё в 70-х годах прошлого века. Для них характерны устаревшие технологии, неудовлетворительное санитарно-техническое состояние и недостаточный производственный контроль качества воды [2]. Именно на этой территории южной Армении (бассейны рек Вохчи и Мегри) сосредоточены основные горнорудные промышленные центры республики: медно-молибденовые, золоторудные, золото-полиметаллические и золото-сульфидные месторождения (Капанское, Цавское и Зангезурское), а также их горнорудные производства в городах Капан, Каджаран, Мегри и Агарак [3]. Горнодобывающую деятельность осуществляют частные компании, у которых ввиду либеральной законодательной базы и недостаточного государственного контроля проведение природоохранных мероприятий находится на низком уровне [4, 5]. О сложившейся неблагоприятной экологической ситуации в регионе свидетельствуют результаты геохимической оценки почвенного покрова городских территорий и детских площадок, токсикологической оценки сельскохозяйственной продукции, анализа донных отложений рек [6]. Особенно значимыми могут быть негативные последствия воздействия горных работ на малые горные реки.

Цель исследования – изучение наиболее актуальных для региона с развитой горнорудной промышленностью тяжёлых металлов (Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sn, Sb, Se, Zn, Hg, Te) в системах централизованного питьевого водоснабжения и оценка рисков, связанных с качеством питьевой воды, для здоровья населения. Такие исследования в регионе на протяжении последних 35 лет практически не проводи-

лись. Загрязнение тяжёлыми металлами при недостаточной водоподготовке на очистных станциях воды может вызвать необратимые последствия для здоровья населения южной Армении.

## Материал и методы

Территория исследования (площадь примерно 3 тыс. км<sup>2</sup>, население 130 тыс. человек) представляет собой сложное сочетание складчатых, складчато-глыбовых и вулканических гор, лавовых плато, межгорных аллювиальных и озёрных котловин, узких и глубоких речных долин с резкой сменой различных ландшафтов [7]. Породы представлены комплексом всех вулканических и интрузивных образований магматических пород, начиная от ультраосновных до кислых и щелочных. Сложный рельеф обуславливает многообразие климатических условий: субтропический сухой, умеренный, горный [4]. Среди многочисленных месторождений и рудопроявлений региона – медно-молибденовые, золото-медные, медные, золото-полиметаллические и др. [3]. В молибден-меднопорфировых месторождениях Каджаранского рудного поля находится примерно 5% общих и 7% подтверждённых мировых запасов молибдена. Разработка, разведка, доразведка и освоение новых месторождений в регионе в настоящее время продолжают. Эксплуатируются Зангезурский и Капанский горно-обогатительные комбинаты и Тертерасарская и Агаракская обогатительные фабрики, действуют 6 хвостохранилищ. На всей территории скопилось большое количество горных отвалов и пустых пород [3, 4].

Головные водозаборные сооружения питьевой воды находятся на малых горных реках Чанахчи, Аджигадж, Гярд (верхнее течение р. Вохчи, площадь 1341 м<sup>2</sup>, длина – 59 км, естественные ресурсы подземных вод – 5 м<sup>3</sup>, среднегодовой сток – 327,6 м<sup>3</sup>/с) и Звар, Личк и Вагравар (верхнее течение р. Мегри 664 м<sup>2</sup>, 35 км, 1,63 м<sup>3</sup>, 88,2 м<sup>3</sup>/с соответственно) [8]. Для рек характерно преимущественно поверхностное питание, весенне-летнее половодье (75–80% общего годового стока), большие уклоны, бурное течение и слабая извилистость русел [7, 8]. Поскольку реки на этих участках имеют небольшую глубину, для управления наносима построены головные отстойники. Очистные станции Гехи и Звар введены в эксплуатацию в 1980-м, Агарак – в 1975-м; Чанахчи – в 1973-м, Каджаран – в 1970 гг., их мощность составляет 33,2; 7; 5,6; 5,2 и 5 тыс. м<sup>3</sup>/сут соответственно [2]. Основные сооружения станций состоят из горизонтальных отстойников, дозаторов коагулянта и извести, медленных фильтров с кварцевым песком и хлораторных станций. Водозаборные сооружения, здания и их крыши, промывочные насосы, внутренние подводящие сети, отстойники, фильтры



Рис. 1. Схема водоснабжения.

и другие конструкции в той или иной степени нуждаются в модернизации, капитальном и текущем ремонте [2].

Места отбора проб выбраны в соответствии со схемой водоснабжения (рис. 1) [9, 10] и состоят из следующих пунктов: 1) водозаборные сооружения (поверхностные источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения); 2) приёмные камеры станций очистки (входящая на очистку вода); 3) контактный резервуар чистой воды (выходящая после очистки вода); 4) после бассейнов суточного регулирования (питьевая вода); 5) распределительные сети, потребитель – уличные фонтанчики, краны жилых зданий (питьевая вода).

Контроль качества полевых работ осуществлялся в результате анализа повторных, дублирующих и нулевых проб (replicate, duplicate samples, field blankes – Transport, Equipment, Transfer). Пробы отбирались в 0,5–1,5-литровые новые полиэтиленовые бутылки и перевозились в лабораторию в холодильнике ( $t = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В качестве консерванта использовали концентрированную азотную кислоту (до  $\text{pH} \leq 2,0$ ) [11]. Содержания общей ртути определялись методом беспламенной (метод холодного пара) атомно-абсорбционной спектроскопии (Perkin Elmer AAnalyst 800). Пробы воды перед анализом стабилизировались раствором перманганата калия и восстанавливались хлоридом олова (II). Для измерений использовали ртутьгидридную приставку MHS 15 (ISO 12846:2012). Остальные тяжёлые металлы определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермическим атомизатором (ISO15586:2003). Точность аналитических работ проверена анализом стандартных растворов (стандарт № 9300281) и повторным анализом проб воды ( $n = 2-3$ ). Достоверность измерений составляла: Ag 3,85; Al 5,26; As 9,24; Cd 0,58; Cu 1,55; Fe 2,25; Mo 1,25; Ni 2,04; Pb 2,34; Sn 3,52; Sb 5,56; Se 3,95; Zn 1,25; Hg 3,52; Te 2,54%, точность – 4,89; 8,25; 11,25; 2,54; 2,52; 5,21; 2,85; 4,03; 6,25; 4,56; 5,26; 7,25; 2,52; 4,25; 3,25% соответственно. Пределы обнаружения прибора составляли: Ag 0,7; Al 0,1; As 0,8; Cd 0,03; Cu 0,1; Fe 50; Mo 0,5; Ni 0,3; Pb 0,6; Sn 0,08; Sb 0,9; Se 0,8; Zn 10; Hg 0,6; Te 0,6 мкг/л. В течение 2016–2017 гг. из 43 пунктов отбора взяты и проанализированы 53 основные пробы воды, из которых 14 – из поверхностных источников водоснабжения, 16 – со станций очистки воды, 33 – из водопроводных сетей (рис. 2).

Для оценки качества собранного материала рассчитаны некоторые статистические параметры – среднеквадратичное отклонение (SD) и коэффициент вариации ( $C_v$ ), построены диаграммы размаха (Box plots) [12]. Для оценки качества воды в местах водозабора использованы экологические нормативы для рек бассейна реки Вохчи (р. Чанахчи), Гехи (рр. Аджибадж, Гярд) и Мегри (рр. Личк, Звар, Вагравар) Южного бассейна территориального управления РА [13]. Из 5 статусов качества воды регионально-фоновые уровни тяжёлых металлов соответствовали второму классу. Для оценки качества питьевых вод использованы национальные гигиенические требования к качеству воды [14], нормативы, рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения [15] и Европейским советом [16].

Оценён риск развития неканцерогенных и канцерогенных эффектов при хроническом действии тяжёлых металлов на организм человека (взрослые и дети) при пероральном ( $R_{\text{ing}}$ ) их поступлении и дермальной ( $R_{\text{derm}}$ ) экспозиции водопроводной воды. Оценка риска канцерогенных эффектов – вероятности развития рака у индивидуума на всём протяжении жизни – рассчитана по формулам [17–19]:

$$CR_{\text{ing}} = \text{CDI} \cdot \text{SF} \quad (1),$$

$$CR_{\text{derm}} = \text{CDI} \cdot (\text{SF}/\text{GIABS}) \quad (2),$$

где CDI – средняя суточная доза, мг/кг; SF – фактор наклона,  $(\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{день}))^{-1}$  (для As – 1,5); GIABS – безразмерный фактор желудочно-кишечной абсорбции. Характеристика риска развития эффектов для отдельных металлов проводилась для неканцерогенного риска на основе расчёта коэффициента опасности (HQ):

$$HQ_{\text{ing}} = \text{DI} / \text{RfD} \quad (3),$$

$$HQ_{\text{derm}} = \text{DI} / (\text{RfD} \cdot \text{GIABS}) \quad (4),$$

где RfD – референтная (безопасная) доза, мг/кг. Средняя суточная доза при пероральном поступлении тяжёлых металлов с питьевой водой рассчитана по формуле:

$$I = (C_w \cdot V \cdot \text{EF} \cdot \text{ED}) / (\text{BW} \cdot \text{AT} \cdot 365) \quad (5),$$

где  $C_w$  – максимальная концентрация вещества в воде; V – величина водопотребления (2,5 л/сут – взрослые и 0,78 л/сут – дети); EF – частота воздействия 350 дней/год; ED – продолжительность воздействия (взрослые – 20 лет, дети – 6 лет); BW – масса тела (взрослые – 80 кг, дети – 15 кг); AT – период осреднения экспозиции. Средняя суточная доза при дермальной (накожной) экспозиции водопроводной (питьевой) воды рассчитана по формуле:

$$\text{DAD} = (\text{DAe} \cdot \text{EV} \cdot \text{ED} \cdot \text{EF} \cdot \text{SA}) / (\text{BW} \cdot \text{AT} \cdot 365 \cdot 1000) \quad (6),$$

где DAe – адсорбированная доза за одно событие на экспонированную площадь кожи, равная для неорганических веществ  $\text{Kp} \cdot \text{C}_w \cdot \text{te}$  ( $\text{Kp}$  – коэффициент кожной проницаемости для Al, As, Cd, Cu, Fe, Mo, Se составлял 0,001, а для Zn – 0,0006, te – продолжительность одного события: взрослые – 0,71, дети – 0,54 ч/событие); EV – число контактов/день, равное 1). Индекс опасности для условий одновременного поступления изученных тяжёлых металлов несколькими путями (пероральным и дермальным) рассчитан по формуле:

$$\text{HI} = \sum \text{HQ} \quad (7).$$

В качестве допустимого суммарного индекса опасности питьевой воды для населения в целом использована величина  $\text{HI} < 1$ , а индивидуального риска –  $< 1 \cdot 10^{-4}$  (EPA Office of Water) [19].

## Результаты

Пределы изменения концентраций тяжёлых металлов в воде поверхностных источников водоснабжения Чанахчи, Аджибадж, Гярд, Вохчи, Звар, Личк и Вагравар составляют: Ag – 0,7–1,68; Al – 17–799; Ar – 0,8–3,62; Ca – 0,03–0,58; Cu – 0,1–15,0; Fe – 35–175; Mo – 3,3–17,9; Ni – 1,02–2,52; Pb – 0,6–1,95; Sn – 0,08–0,22; Sb – 0,9–3,85; Se – 1–5; Zn – 3–18 мкг/л. Регионально-фоновые уровни поверхностных вод [3] в местах водозабора превышают следующие тяжёлые металлы (раз): Al – Чанахчи (13,3), Вагравар (4,2); Fe – Чанахчи (2,3; 1,3), Вагравар (1,2), Звар (1,1), Личк (1,1); Mo – Звар (1,5; 1,1), Вагравар (1,1); Sn – Гярд (1,83), Вагравар (1,3), Личк (1,1), Аджибадж (1,1); Sb – Личк (4,4), Звар (4,4; 1,2), Вагравар (2,3; 1,1). Результаты первичной статистической обработки концентраций тяжёлых металлов в воде поверхностных источников водоснабжения свидетельствуют об их качественной неоднородности по алюминию, сурьме,



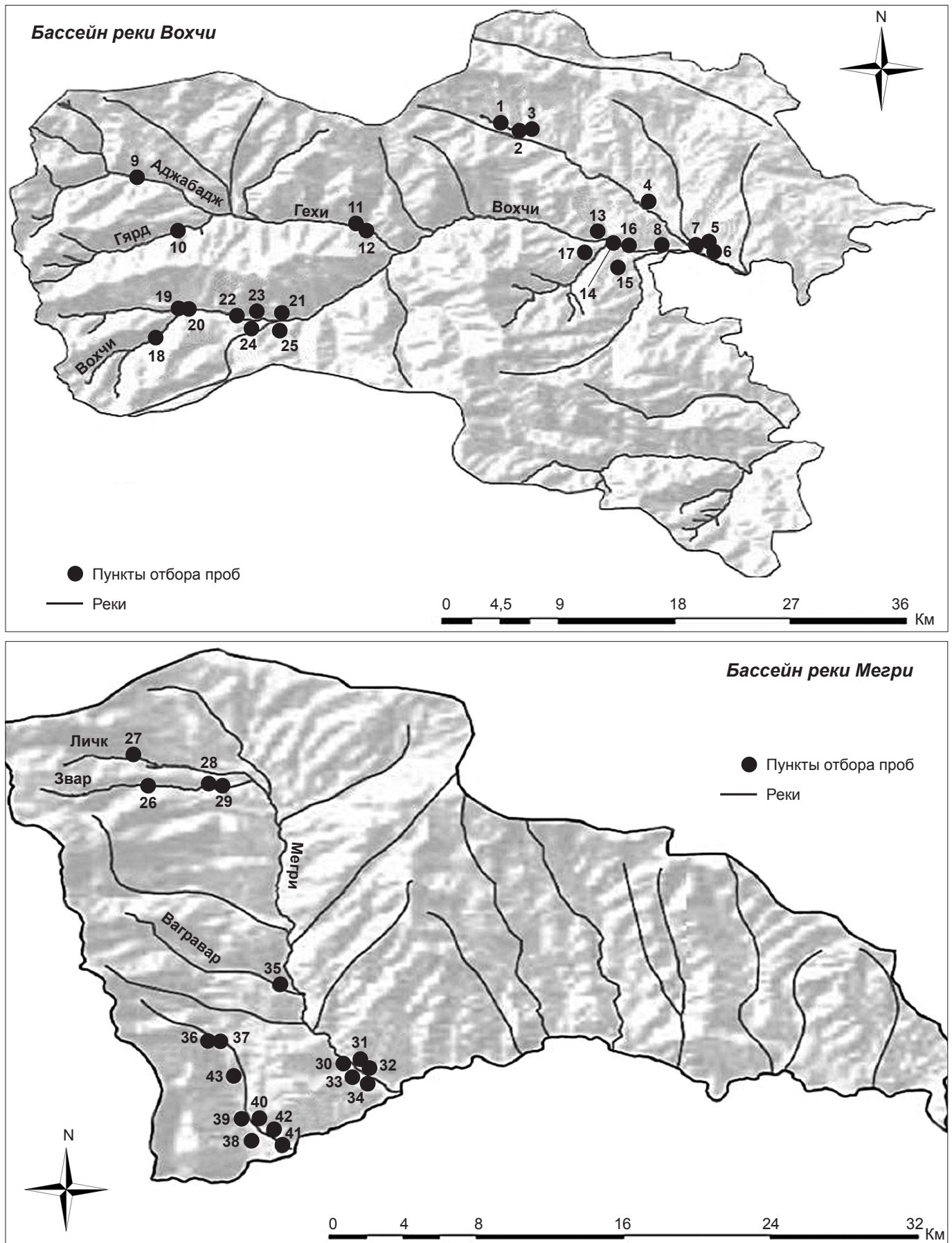


Рис. 2. Пункты отбора проб воды.

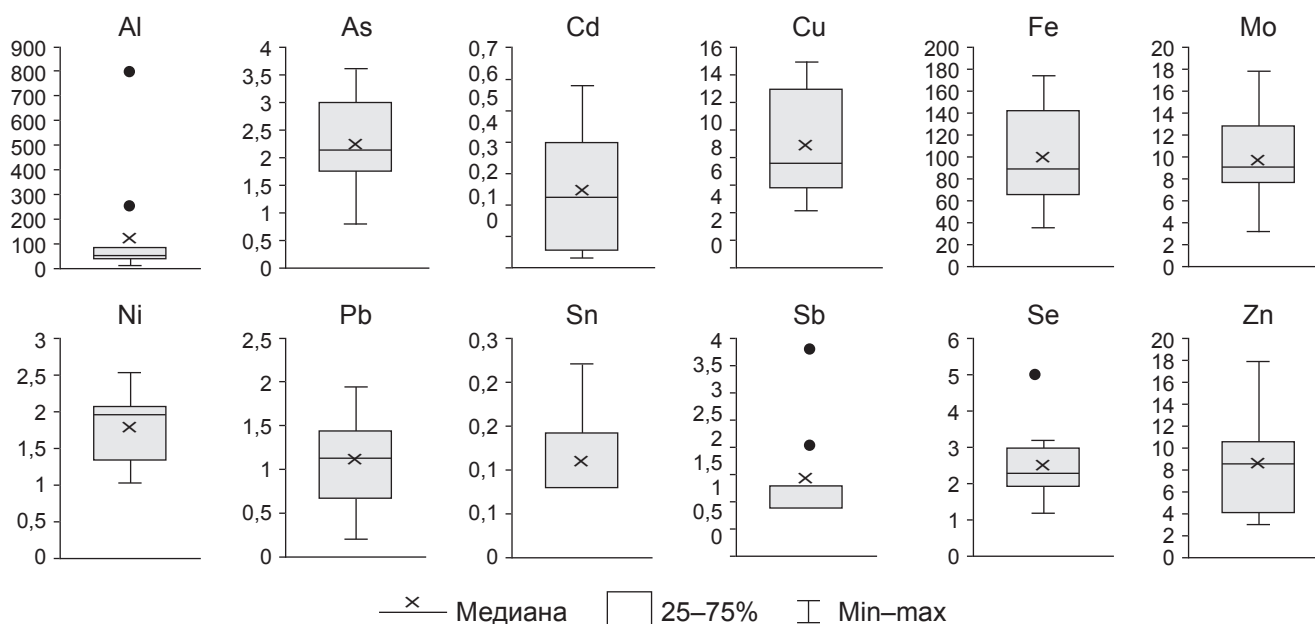


Рис. 3. Диаграмма размаха Box plots тяжёлых металлов и мышьяка в местах водозабора.

кадмию, селену, олову, цинку. Для алюминия, сурьмы и селена наблюдаются также выбросы концентраций (рис. 3).

Степень снижения концентрации для Al после очистки воды на станциях Гехи, Чанахчи, Каджаран, Звар и Агарак составляет 16–49; As – 21–51; Cd – 12–63; Cu – 17–50, Fe – 17–49, Mo – 25–60, Ni – 14–69, Pb – 26–63, Se – 23–56, Zn – 13–55% соответственно. Содержание Ag, Sn, Sb, Hg и Te во всех пробах было меньше предела обнаружения прибора (рис. 4).

Полученные данные свидетельствуют о сравнительно хорошей очистке воды на станциях Агарак и Гехи и плохой – в Каджаране и Мегри.

Концентрации тяжёлых металлов в пробах питьевой воды, отобранных из водопроводных сетей (уличные фонтанчики, краны многоэтажных зданий и частных домов) городов Капан, Каджаран, Мегри, Агарак и сёл Ачаран, Сюник и Карчеван, не превышают национальные и международные нормативы питьевых вод (табл. 1).

Исключение составляет только повышенная концентрация железа в 2 пунктах г. Мегри (338,7 и 336,3 мкг/л), что однозначно связано с локальным загрязнением воды материалами труб. Содержание Ag, Ni, Pb, Sn, Sb, Hg и Te во всех пробах было меньше предела обнаружения прибора. Наибольшие концентрации алюминия отмечены в пробах питьевой воды г. Агарак; кадмия – г. Каджаран; молибдена, цинка, меди и железа – г. Мегри.

Оценён риск для здоровья населения, подключённого к системам централизованного водоснабжения, в Чанахчи, Гехи, Каджаране, Мегри и Агарак при пероральном и дермальном (накожном) поступлении приоритетных для региона тяжёлых металлов с питьевой водой (табл. 2, 3).

Оценка риска неканцерогенных эффектов при хроническом воздействии показала, что коэффициент опасности каждого изученного металла с питьевой водой при прямом приёме внутрь и всасывание через кожу не превышает единицы ( $HI < 1$ ). Процентный вклад каждого металла по значе-

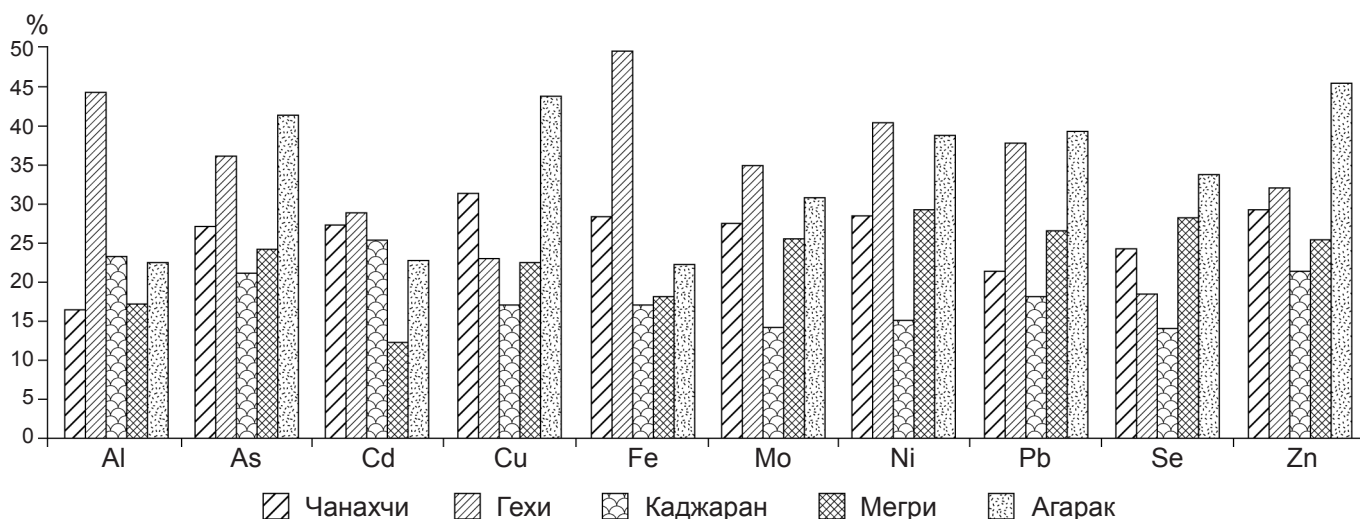


Рис. 4. Сравнительная характеристика снижения средних концентраций тяжёлых металлов и мышьяка (%) после очистки воды.

Таблица 1

Статистические параметры тяжёлых металлов и мышьяка в питьевой воде и их сравнительная характеристика с национальными и международными стандартами

Показатель	Число проб	Мин., мкг/л	Макс., мкг/л	Сред., мкг/л	SD	C <sub>v</sub>	Норма РА [12], мкг/л	ВОЗ [19], мкг/л	Директива ЕС [4], мкг/л
Al	33	14,5	52,5	32,6	10,8	33,2	500	200	200
As	33	0,80	1,81	1,21	0,71	58,4	50	10	10
Cd	33	0,03	0,20	0,10	0,05	52,9	1	3	5
Cu	33	1,0	27,0	6,0	4,7	78,8	100	200	200
Fe	33	35,2	338,7*	91,5	73,4	80,2	300	300	200
Mo	33	2,5	9,9	5,8	2,0	34,2	250	70	—
Se	33	0,9	2,2	1,18	0,92	77,9	10	10	10
Zn	33	1,2	5,5	1,85	2,1	57,6	500	—**	—

Примечание. \* — значения, превышающие норму; \*\* — норматив отсутствует.

Таблица 2

Оценка неканцерогенного и канцерогенного риска для здоровья населения по отдельным системам водоснабжения

Система водоснабжения	Взрослые			Дети			CR		
	HQ <sub>ing</sub>	HQ <sub>derm</sub>	HI	HQ <sub>ing</sub>	HQ <sub>derm</sub>	HI	CR <sub>ing</sub>	CR <sub>derm</sub>	Σ CR
Чанахчи	1,23 · 10 <sup>-1</sup>	1,26 · 10 <sup>-3</sup>	1,24 · 10 <sup>-1</sup>	2,05 · 10 <sup>-1</sup>	1,65 · 10 <sup>-3</sup>	2,06 · 10 <sup>-1</sup>	1,62 · 10 <sup>-5*</sup>	8,64 · 10 <sup>-8</sup>	1,63 · 10 <sup>-5*</sup>
Гехи	1,78 · 10 <sup>-1</sup>	1,57 · 10 <sup>-3</sup>	1,80 · 10 <sup>-1</sup>	2,97 · 10 <sup>-1</sup>	2,06 · 10 <sup>-3</sup>	2,99 · 10 <sup>-1</sup>	2,50 · 10 <sup>-5*</sup>	1,34 · 10 <sup>-7</sup>	2,52 · 10 <sup>-5*</sup>
Каджаран	1,75 · 10 <sup>-1</sup>	1,74 · 10 <sup>-3</sup>	1,77 · 10 <sup>-1</sup>	2,91 · 10 <sup>-1</sup>	2,28 · 10 <sup>-3</sup>	2,93 · 10 <sup>-1</sup>	2,27 · 10 <sup>-5*</sup>	1,21 · 10 <sup>-7</sup>	2,28 · 10 <sup>-5*</sup>
Мегри	1,62E · 10 <sup>-1</sup>	1,41 · 10 <sup>-3</sup>	1,64 · 10 <sup>-1</sup>	2,70 · 10 <sup>-1</sup>	1,86 · 10 <sup>-3</sup>	2,72 · 10 <sup>-1</sup>	1,58 · 10 <sup>-5*</sup>	8,43 · 10 <sup>-8</sup>	1,59 · 10 <sup>-5*</sup>
Агарак	1,44E · 10 <sup>-1</sup>	1,63 · 10 <sup>-3</sup>	1,46 · 10 <sup>-1</sup>	2,41 · 10 <sup>-1</sup>	2,14 · 10 <sup>-3</sup>	2,42 · 10 <sup>-1</sup>	1,56 · 10 <sup>-5*</sup>	8,33 · 10 <sup>-8</sup>	1,57 · 10 <sup>-5*</sup>

Примечание. \* — значения, превышающие допустимый уровень канцерогенного риска.

нию коэффициента опасности составляет: мышьяк — 62,71, молибден — 22,19, селен — 4,62, кадмий — 4,33, медь — 2,78, железо — 2,44, алюминий — 0,68, цинк — 0,25%. При этом значения коэффициента для взрослых и детей примерно одинаковы. Процентный вклад в общий неканцерогенный риск в среднем для перорального пути поступления составляет 99,03, для дермального — 0,97%, а для отдельных систем водоснабжения — Гехи — 22,77; Каджаран — 22,34; Мегри — 20,72; Агарак — 18,44; Чанахчи — 15,73%.

Оценка риска канцерогенных эффектов при хроническом пероральном воздействии питьевой воды в течение всей жизни показала, что индивидуальный канцерогенный риск (CR) развития рака по мышьяку составляет  $9,53 \cdot 10^{-5}$  и превышает безопасный предел ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) [19]. Для всех изученных систем водоснабжения получены близкие значения канцерогенного риска ( $1,57 \cdot 10^{-5}$ – $2,28 \cdot 10^{-5}$ ).

## Обсуждение

Сфера горнорудной промышленности Армении имеет свою особую долю в национальной экономике, около 80% которой сосредоточено на юге страны [4]. В высокогорных районах на формирование химического состава воды определяющее значение имеет влияние вертикальной (высотной) зональности, где в силу геологического строения встречается множество проявлений полиметаллических руд [3]. К природным высоким фоновым уровням концентраций тяжёлых металлов накладывается влияние прямого и косвенного воздействия горнорудной промышленности. Многими исследованиями показано, что осушение месторождений, отбор воды из рек для технологических процессов, сброс загрязнённых дренажных и сточных вод в поверхностные водоёмы и водотоки, подземные горизонты и др. приводит к истоще-

Таблица 3

Оценка неканцерогенного и канцерогенного риска для здоровья населения по отдельным тяжёлым металлам и мышьяку

Показатель	Взрослые			Дети			CR		
	HQ <sub>ing</sub>	HQ <sub>derm</sub>	HI	HQ <sub>ing</sub>	HQ <sub>derm</sub>	HI	CR <sub>ing</sub>	CR <sub>derm</sub>	Σ CR
Al	5,10 · 10 <sup>-3</sup>	2,85 · 10 <sup>-5</sup>	5,14 · 10 <sup>-3</sup>	8,50 · 10 <sup>-3</sup>	3,75E–05	8,54 · 10 <sup>-3</sup>	—*	—	—
As	4,95 · 10 <sup>-1</sup>	2,76 · 10 <sup>-3</sup>	4,98 · 10 <sup>-1</sup>	8,23 · 10 <sup>-1</sup>	3,63 · 10 <sup>-3</sup>	8,26 · 10 <sup>-1</sup>	9,53 · 10 <sup>-5**</sup>	5,09 · 10 <sup>-7</sup>	9,59 · 10 <sup>-5**</sup>
Cd	3,06 · 10 <sup>-2</sup>	3,41 · 10 <sup>-3</sup>	3,40 · 10 <sup>-2</sup>	5,09 · 10 <sup>-2</sup>	4,48 · 10 <sup>-3</sup>	5,53 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—
Cu	2,24 · 10 <sup>-2</sup>	1,25 · 10 <sup>-4</sup>	2,25 · 10 <sup>-2</sup>	3,72 · 10 <sup>-2</sup>	1,64E–04	3,73 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—
Fe	1,31 · 10 <sup>-1</sup>	7,31 · 10 <sup>-4</sup>	1,32 · 10 <sup>-1</sup>	2,91 · 10 <sup>-1</sup>	1,28 · 10 <sup>-3</sup>	2,93 · 10 <sup>-1</sup>	—	—	—
Mo	1,31 · 10 <sup>-1</sup>	7,31 · 10 <sup>-4</sup>	1,32 · 10 <sup>-1</sup>	2,91 · 10 <sup>-1</sup>	1,28 · 10 <sup>-3</sup>	2,93 · 10 <sup>-1</sup>	—	—	—
Se	1,31 · 10 <sup>-1</sup>	7,31 · 10 <sup>-4</sup>	1,32 · 10 <sup>-1</sup>	2,91 · 10 <sup>-1</sup>	1,28 · 10 <sup>-3</sup>	2,93 · 10 <sup>-1</sup>	—	—	—
Zn	1,89 · 10 <sup>-3</sup>	6,33 · 10 <sup>-6</sup>	1,90 · 10 <sup>-3</sup>	3,15 · 10 <sup>-1</sup>	8,33 · 10 <sup>-6</sup>	3,16 · 10 <sup>-3</sup>	—	—	—

Примечание. \* — не является канцерогеном для человека; \*\* — значения, превышающие допустимый уровень канцерогенного риска.



нию запасов вод, изменению их режимов и в итоге — к ухудшению качества воды [20–22]. Изученные поверхностные воды таких регионов отличаются повышенным содержанием тяжёлых металлов и ярко выраженной их изменчивостью в разные гидрологические сезоны [23, 24]. Часто загрязнение воды источников питьевого водоснабжения при недостаточной водоочистке приводит к загрязнению питьевой воды и рискам для здоровья населения [25–27].

Согласно полученным результатам, концентрации тяжёлых металлов в водах рек Аджигадж, Гярд, Чанахчи, Вохчи, Звар, Личк, и Вагравар превышают регионально-фоновые концентрации по алюминию, железу, молибдену, сурьме. Водозаборы практически всех станций очистки воды находятся в верхних течениях рек, где нет других источников загрязнения, кроме месторождений металлов, скоплений отвалов пустых пород и некондиционных руд. Содержащиеся в них сульфиды металлов в кислородной среде окисляются и обогащают подземные и поверхностные воды серной кислотой. Она растворяет и разрушает алюмосиликаты в породах и насыщает воду алюминием, железом и другими металлами. Повышенные значения молибдена в воде территориально коррелируют с локализацией медно-молибденовых месторождений и Агаракского и Зангезурского горно-обогатительных комбинатов. В сезон паводка и интенсивных дождей в связи с гидрологическими и морфологическими особенностями горных быстротекущих рек наблюдается резкое повышение концентрации взвешенных веществ в поступающей на очистку воде, что приводит к ухудшению качества очистки воды и повышению концентраций тяжёлых металлов в воде. Именно загрязнённость входящей на очистку воды на станции Мегри является основной причиной загрязнения питьевой воды. Вторичным загрязнением воды в распределительных сетях можно объяснить выраженную изменчивость концентраций алюминия, цинка, молибдена, сурьмы, селена, железа в пробах питьевой воды, отобранных в разные временные отрезки и в разных пунктах одной и той же системы водоснабжения. При этом, если вероятность развития у человека вредных неканцерогенных эффектов при ежедневном употреблении питьевой воды в течение жизни характеризуется как допустимая, то индивидуальный канцерогенный риск развития рака по мышьяку превышает безопасный уровень.

Проведённые исследования были ограничены во времени и количестве и могут иметь в основном рекомендательный характер. Кроме этого, не проведена оценка экологического состояния водотоков путём определения загрязняющих

веществ в руде, отвалах, сточных водах. Такие исследования позволили бы изучить условия миграции тяжёлых металлов с территории месторождений и более детально обосновать антропогенное влияние горнорудной промышленности. Однако полученные результаты достаточны для обоснования необходимости организации контроля за содержанием тяжёлых металлов и проведения восстановительных мероприятий.

## Заключение

1. Концентрации алюминия, железа, молибдена, олова и сурьмы в воде источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и сёл южной Армении в 1,1–13,3 раза превышают регионально-фоновые уровни поверхностных вод, что в условиях отсутствия альтернативных источников загрязнения свидетельствует о прямом и косвенном влиянии горнопромышленного техногенеза на формирование качества воды. Степень снижения концентрации тяжёлых металлов после очистки воды составляет 12–69%. Качество питьевой воды, поступающей к потребителю, не превышало национальные и международные стандарты (исключая локальное загрязнение воды железом).

2. Риск развития у населения неканцерогенных эффектов при пероральном и дермальном хроническом воздействии питьевой воды на организм человека в течение всей жизни незначителен. Изученные тяжёлые металлы, мышьяк и системы питьевого водоснабжения по убыванию коэффициента опасности ранжированы в следующие ряды (%):

As (62,71) – Mo (22,19) – Se (4,62) – Cd (4,33) – Cu (2,78) – Fe (2,44) – Al (0,68) – Zn (0,25);

Гехи (22,77) – Каджаран (22,34) – Мегри (20,72) – Агарак (18,44) – Чанахчи (15,73).

Суммарный риск развития канцерогенных эффектов взрослого и детского населения составляет  $9,59 \cdot 10^{-5}$  и превышает безопасный предел развития рака по мышьяку.

3. Допустимое качество питьевой воды, поступающей к потребителю, ещё не показатель надёжного и безопасного питьевого водоснабжения на изученной территории ввиду загрязнённости воды в местах водозабора, устаревших технологий очистки, плохого санитарно-технического состояния станций и водопроводных сетей. Отчёт по результатам научных исследований и предложения по природоохранным и восстановительным мероприятиям представлены в региональный муниципальный орган.

## Литература

(п.п. 1, 6, 10, 11, 15, 16, 18–21, 23–27 см. References)

- |   |   |
|---|---|
| <p>2. «Армводоканал». Водоснабжение и водоотведение: Годовые отчёты (2005–2016 гг.) Ереван; 2017.</p> <p>3. Алоян П.Г. <i>Геология горнорудных регионов Армении</i>. Ереван; 2001.</p> <p>4. Статистический комитет Республики Армения. Отчёт национального статистического управления за 2008–2014. Окружающая среда и природные ресурсы. Available at: <a href="http://www.armstat.am">http://www.armstat.am</a></p> <p>5. Сагатеян А.К. <i>Особенности распределения тяжёлых металлов на территории Армении</i>. Ереван; 2004.</p> <p>7. Национальный атлас Армении. Ереван; 2007.</p> <p>8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 09. Закавказье и Дагестан. Выпуск 2. Бассейн р. Аракс. Ленинград: Гидрометеиздат; 1973.</p> <p>9. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М.; 1984.</p> | <p>12. Пузаченко Ю.Г. <i>Математические методы в экологических и географических исследованиях</i>. М.; 2004.</p> <p>13. Решение правительства РА № 75 «Об определении норм обеспечения качества воды отдельных водных бассейнов Республики Армения в зависимости от особенностей местности». Ереван; 2011.</p> <p>14. СанПиН N2-III-A2-1. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Ереван; 2002.</p> <p>17. МЗ РФ. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.; 2004.</p> <p>22. Аржанова В.С. Влияние горнопромышленного техногенеза на речные воды. <i>География и природные ресурсы</i>. 2010; (1): 39–45.</p> |
|---|---|

## References

- |   |   |
|---|---|
| <p>1. Babayan G.H., Aghababayan K.A. Present-day ecological state of water objects of the Republic of Armenia. <i>Water Res.</i> 2008; 35(2): 234–9.</p> <p>2. «Armvodokanal». Water supply and sanitation: Annual reports (2005–2016). Erevan; 2017. (in Armenian)</p> | <p>3. Aloyan P.G. Geology of Armenia's mining regions. Erevan; 2001. (in Armenian)</p> <p>4. Statistical Committee of the Republic of Armenia. Report of the National Statistical Agency. Environment and Natural Resources in the Republic of Armenia for 2008–2016. Available at: <a href="http://armstat.am">http://armstat.am</a> (in Armenian)</p> |
|---|---|

5. Sagatelyan A.K. *Features of the Distribution of Heavy Metals in Armenia*. Yerevan; 2004. (in Armenian)
6. Tepanosyan G., Sahakyan L., Belyaeva O., Asmaryan S., Saghatlyan A. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. *Sci Total Environ*. 2018; 639: 900–9. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.211>
7. National Atlas of Armenia. Yerevan; 2007. (in Armenian)
8. Surface water resources of the USSR. Volume 09. Transcaucasia and Dagestan. Issue 2. The basin of the river Araks. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. (in Russian)
9. SNiP 2.04.02-84. Water supply. External networks and facilities. Moscow; 1984. (in Russian)
10. Ray C., Jain R., eds. *Drinking Water Treatment. Focusing on Appropriate Technology and Sustainability*. Dordrecht: Springer; 2011.
11. Jones J.D., ed. *Standard Operating Procedures for Surface Water Quality Sampling, Prepared by the Surface Water Section*. Washington; 2012.
12. Puzachenko Yu.G. *Mathematical Methods in Environmental and Geographical Research [Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh]*. Moscow; 2004. (in Russian)
13. The decision of the RA government № 75 «On establishing norms for water quality of certain water basins of the Republic of Armenia depending on the characteristics of the terrain». Yerevan; 2011. (in Armenian)
14. Regulations N2-III-U2-1. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Yerevan; 2002. (in Armenian)
15. WHO. Guidelines for drinking water quality. Geneva; 2011.
16. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*. 1998; L330: 32–54.
17. Ministry of Health of the Russian Federation. Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to chemicals that pollute the environment. Moscow; 2004. (in Russian)
18. USEPA. Risk assessment guidance for superfund, volume 1. Human health evaluation manual (part A), report EPA/540/1-89/002. Washington; 1989.
19. The Risk Assessment Information System. Available at: [http://rais.ornl.gov/cgi-bin/prg/RISK\\_search](http://rais.ornl.gov/cgi-bin/prg/RISK_search)
20. Okogbue C.O., Ukpai S.N. Evaluation of trace element contents in groundwater in Abakaliki metropolis and around the abandoned mine sites in the southern part, southeastern Nigeria. *Environ Earth Sci*. 2013; 70: 3351–62. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2401-4>
21. Mlayah A., Lachaal F., Chekirbane A., Khadar S., Ferreira da Silva E. The fate of base metals in the environment and water quality in the Mellegue Watershed, Northwest Tunisia. *Mine Water Environ*. 2017; 36(2): 163–79. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10230-017-0430-z>
22. Arzhanova V.S. Effect of mining and industrial technogenesis on river waters. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010; (1): 39–45. (in Russian)
23. Muhammad S., Tahir Shah M., Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan Region, northern Pakistan. *Microchem J*. 2011; 98(2): 334–43. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.microc.2011.03.003>
24. Obiora S.C., Chukwu A., Davies T.C. Contamination of the potable water supply in the lead–zinc mining communities of Enyigba, southeastern Nigeria. *Mine Water Environ*. 2019; 38(1): 148–57. DOI: <http://doi.org/doi.org/10.1007/s10230-018-0550-0>
25. Arah I. Monitoring water quality in river bodies of mining communities in Ghana. *AJHSS*. 2015; 3(1): 20–8.
26. Bortey-Sam N., Nakayama S.M., Ikenaka Y., Akoto O., Baidoo E., Mizukawa H. et al. Health risk assessment of heavy metals and metalloid in drinking water from communities near gold mines in Tarkwa, Ghana. *Environ Monit Assess*. 2015; 187(7): 397. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10661-015-4630-3>
27. Gabrielyan A.V., Shahnazaryan G.A., Minasyan S.H. Distribution and identification of sources of heavy metals in the Voghji River basin impacted by mining activities (Armenia). *J Chem*. 2018; 2018: 7172426. DOI: <http://doi.org/10.1155/2018/7172426>