

Абдулмуталимова Т.О.^{1,2}, Рамазанов О.М.¹

Биомаркеры экспозиции мышьяка в условиях биогеохимических провинций

¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ФГБУН «Объединённый институт высоких температур» Российской академии наук, 367030, г. Махачкала, Российская Федерация;

²Институт геологии ФГБУН «Дагестанский федеральный исследовательский центр» Российской академии наук, 367010, г. Махачкала, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Введение. Многие металлы оказывают негативное воздействие на здоровье человека по различным токсикологическим механизмам. Свинец, мышьяк, кадмий и ртуть – это наиболее распространенные токсические металлы в окружающей среде, а их негативное воздействие на здоровье хорошо изучено и подтверждено большим объемом данных по экспозиции человека во всем мире. Одним из прямых методов оценки воздействия контаминантов на здоровье населения является применение биологических маркеров, позволяющих определить наличие вещества или его метаболита в биологических тканях человека и дозу, полученную от всех источников поступления этого вещества.

Цель исследования – определение зависимости содержания мышьяка в биологических образцах (волосах) экспонируемых жителей от уровня его содержания в питьевой воде и обоснование эффективности использования данного биомаркера в условиях гидрогеохимической провинции на территории Республики Дагестан.

Материал и методы. В рамках данного исследования измерялось содержание мышьяка в волосах экспонируемых жителей с дальнейшим сопоставлением полученных данных с его содержанием в питьевых подземных водах. Для определения содержания мышьяка в волосах экспонируемых жителей использовался атомно-абсорбционный метод с предварительной подготовкой образцов биосубстрата согласно МУК 4.1.776–99. Социо-демографические данные, а также информация по условиям проживания и окружающей среде были получены из опросника. Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью электронных таблиц Microsoft Excel, в ходе которого была выведена регрессионная модель зависимости содержания мышьяка в волосах испытуемых от его уровня в потребляемой питьевой воде.

Результаты. Анализ полученных данных подтверждает, что при хроническом пероральном поступлении следовых доз мышьяка в организм человека, происходит его накопление в волосах. В ходе данного исследования была выявлена корреляционная зависимость между содержанием мышьяка в волосах экспонируемых жителей от его содержания в потребляемой питьевой воде, а также выявлена прямая пропорциональная зависимость между этими величинами. Так, при увеличении концентрации мышьяка в воде на 0,1 мг/л содержание мышьяка в волосах возрастает на 0,14 мкг/г. Таким образом, в работе обосновано использование волос экспонируемых жителей в качестве биомаркера длительной экспозиции малых доз мышьяка в условиях биогеохимической провинции.

Ограничением исследования является небольшой размер выборки. Однако это не препятствует оценке эффективности использования волос в качестве биомаркера воздействия мышьяка и предварительным выводам для последующего углубленного анализа биомониторинга в условиях биогеохимических провинций.

Заключение. В условиях биогеохимических провинций, как правило, содержание природных токсичных элементов характеризуется следовыми количествами, что не позволяет развиваться у экспонируемых жителей ранним проявлениям острых и подострых эффектов. В таких условиях использование биомаркеров позволит выявить уровень нагрузки на организм и своевременно применить превентивные методы до появления клинических признаков интоксикации. Кумулятивные свойства мышьяка характеризуются его способностью связываться с сульфгидрильными группами кератина и в результате даже малые дозы мышьяка накапливаются в волосах при длительной экспозиции. Таким образом, волосы экспонируемых жителей являются эффективным биомаркером экспозиции мышьяка в условиях биогеохимических провинций.

Ключевые слова: мышьяк; токсичность; биомаркеры; гидрогеохимическая провинция; природные воды

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

Для цитирования: Абдулмуталимова 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>

Для корреспонденции: Абдулмуталимова Тамила Омариевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики филиал ФГБУН ОИВТ РАН, 367030, г. Махачкала, Россия. E-mail: tamila4@mail.ru

Участие авторов: Абдулмуталимова Т.О. – концепция и дизайн исследования, статистическая обработка данных, написание текста, редактирование; Рамазанов О.М. – проведение полевых работ, сбор и обработка материала, проведение химического анализа, написание текста. *Все соавторы* – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Дата поступления: 23 октября 2023 / Дата принятия в печать: 03 декабря 2023 / Дата публикации: 29 декабря 2023

Tamila O. Abdulmutalimova^{1,2}, Omari M. Ramazanov¹

Biomarkers of arsenic exposure in biogeochemical provinces

¹Institute for Problems of Geothermy and Renewable Energy, branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 367030, Makhachkala, Russian Federation;

²Institute of Geology of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 367010, Makhachkala, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the direct methods of assessing the impact of contaminants on public health is the use of biological markers that allow determining the presence of a substance or its metabolite in human biological tissues and the dose received from all sources of this substance.

The purpose of this study was to determine the dependence of arsenic content in biological samples (hair) of exposed residents on the level of its content in drinking water and to substantiate the effectiveness of the use of this biomarker in the conditions of a hydrogeochemical province in the Republic of Dagestan.

Material and methods. During this research the arsenic content in the hair of the exposed residents was measured with further comparison of the data obtained with its content in drinking groundwater. To determine the arsenic content in the hair of the exposed residents, an atomic absorption method was used with preliminary preparation of biosubstrate samples. Socio-demographic data were obtained from a questionnaire. Statistical data processing was carried out using Microsoft Excel.

Results. In the course of this study, a correlation was revealed between the arsenic content in the hair of the exposed residents and its content in the drinking water consumed, and a direct proportional relationship between these values was also revealed. Thus, with an increase in the concentration of arsenic in water by 0.1 mg/l, the arsenic content in the hair increases by 0.14 mkg/g. So, using of the hair of exposed residents as a biomarker of long-term exposure is recommended to small doses of arsenic in a biogeochemical province.

Limitation of the study is the small sample size. However, this does not prevent the assessment of the effectiveness of using hair as a biomarker of arsenic exposure and preliminary conclusions for subsequent in-depth analysis of biomonitoring in the conditions of biogeochemical provinces.

Conclusion. As a rule, the content of natural toxic elements is characterized by trace amounts in the conditions of biogeochemical provinces. Biomonitoring will reveal the level of stress on the body and timely apply preventive methods before the clinical signs of intoxication are revealed.

Keywords: arsenic; toxicity; biomarkers; hydrogeochemical province; groundwaters

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Abdulmutalimova T.O., Ramazanov O.M. Biomarkers of arsenic exposure in biogeochemical provinces. *Toksikologicheskii vestnik / Toxicological Review*. 2023; 31(6): 399–405. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-6-399-405> (In Russian)

For correspondence: *Tamila O. Abdulmutalimova*, Candidate of Biological Sciences, senior researcher at the Laboratory of Energy, Institute for Problems of Geothermy and Renewable Energy, branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 367030, Makhachkala, Russian Federation. E-mail: tamila4@mail.ru

Authors contribution: *Abdulmutalimova T.O.* – setting the purpose of the study, concept and design of the study, statistical data processing, text writing, editing; *Ramazanov O.M.* – conducting field work, collecting and processing material, conducting chemical analysis, writing the text. *All co-authors* – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Date of receipt: October 23, 2023 / Date of acceptance for printing: December 3, 2023 / Date of publication: December 29, 2023

Введение

Использование биологических маркеров — показателей, характеризующих взаимодействие организма с потенциально опасными агентами различной природы, предоставляет наиболее точную информацию о воздействии химических загрязнителей на организм. Данные биомониторинга напрямую отражают общее содержание вредных веществ в организме или их биологическое воздействие при поступлении в организм по всем путям, а также индивидуальные различия в уровнях экспозиции, скорости обмена веществ и экскреции. Такие данные часто являются наиболее актуальным показателем для оценки воздействия на здоровье, особенно для биоаккумулирующих или стойких загрязнителей, которые хранятся в организме на протяжении долгого времени [1–3].

Обследования с использованием биомаркеров экспозиции могут количественно оценить ранние сигналы, которые являются предикторами развития или усиления негативного воздействия на здоровье. Биомаркеры экспозиции используются для выявления и измерения следов химических веществ в тканях или биологических жидкостях, метаболитов ксенобиотиков или физиологических последствий экспозиции. При выборе подходящего анализита в пробах биологических материалов человека важно учитывать кинетику интересующих биомаркеров [2–6]. Фармакокинетическими индикаторами экспозиции мышьяка являются его концентрации в крови, моче, волосах и ногтях [7–10]. Между уровнем содержания мышьяка в волосах, суточной моче и уровнем его в питьевой воде и пище выявлена линейная корреляционная связь [11–13]. Так, например, потребление мышьяка с питьевой водой и пищей 10 мкг/л и 10–20 мкг/сутки, соответственно, сочетается с его концентрацией в волосах до 0,1 мкг/г. Различные биологические материалы отражают экспозицию на протяжении разных периодов времени. При остром отравлении мышьяком наиболее эффективными биомаркерами

являются кровь и моча, повышенное содержание мышьяка в которых можно определить в первые сутки после его поступления. При хронической экспозиции к следовым количествам мышьяка, вследствие быстрого выведения, уровень его содержания в крови и моче не является надежным индикатором [14]. Для идентификации долговременной экспозиции используются пробы волос и ногтей, структура и гистогенез которых позволяют использовать их для биомониторинга содержания следовых элементов [15–20]. Содержание мышьяка в волосах часто используется в качестве индикатора длительной экспозиции к неорганическому мышьяку [21–25]. Волосы являются наиболее информативным биосубстратом, т. к. при хроническом воздействии мышьяка они вовлечены в процесс «хранения» (депонирования) и аккумуляции (концентрирования) путём связывания с сульфгидрильными группами кератина и тем самым более пригодны для целей как клинической, так и гигиенической донозологической диагностики. Многими исследователями обнаружено, что концентрация мышьяка в волосах жителей положительно коррелирует с его уровнем в питьевой воде, отобранной в местах их проживания. Важно также учитывать, что органический мышьяк и его соединения, которые могут поступать в организм человека, как правило, в форме арсенобетаина и арсенохолина, не накапливаются в волосах [26]. Таким образом, содержание мышьяка в волосах может характеризовать воздействие на организм только неорганического мышьяка и его соединений, поступающих с питьевой водой и продуктами питания. Накапливаясь в корне волоса, соединения мышьяка затем распределяются по всей длине волоса, максимальная концентрация которого обнаруживается в прикорневой части волоса. Однако следует учитывать, что накопление мышьяка в организме человека может проходить у всех людей по-разному, что обусловлено индивидуальными особенностями организма. Поэтому, результаты анализа содержания мышьяка

в биосубстратах человека следует интерпретировать с учётом дополнительных анамнестических и клинических данных.

Пробы материалов человека драгоценны и их сбор трудоёмок и затратен. Поэтому адекватные методы обработки, транспортировки и хранения материалов крайне важны. Преимуществами использования волос в качестве биомаркера экспозиции к мышьяку являются неинвазивный отбор и отсутствие требований к особым условиям транспортировки и хранения, что особенно ценно, если исследуемые населённые пункты находятся далеко от пунктов проведения анализа, как, например, в случае с проведением данного исследования.

Так как экспонируемые жители в условиях биогеохимических провинций, как правило, подвержены длительному поступлению малых доз природных контаминантов, использование волос в качестве диагностического биосубстрата позволит оценить ранние сигналы, которые являются предикторами развития или усиления негативного воздействия на здоровье.

В Республике Дагестан ранее была выявлена гидрогеохимическая провинция с высоким содержанием природного мышьяка [27]. Жители, использующие подземные воды для питьевого водоснабжения, подвергаются канцерогенному риску на уровне недопустимого для населения [28]. Пространственный анализ содержания мышьяка в питьевых подземных водах выявил неравномерность его содержания в пределах от 0,01 до 0,5 мг/л.

Материал и методы

В рамках данного исследования измерялось содержание мышьяка в волосах экспонируемых жителей в лабораторных условиях методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с электротермической атомизацией «МГА-915МД» с гидридной приставкой. Социально-демографические данные, а также информация об условиях проживания и окружающей среде были получены из опросника, разработанного для данного исследования с учётом региональных особенностей.

Выборка была сформирована из 97 человек (73 (75%) женщины и 24 (25%) мужчины) старше 30 лет (средний возраст – 51 год), постоянно проживающих на территории населённых пунктов с различным уровнем содержания мышьяка (0,01–0,5 мг/л) в питьевых артезианских водах Республики Дагестан. Все участники исследования заполняли анкету с указанием пола, возраста и длительности проживания в данном населённом пункте. Вопросы анкеты позволяли объек-

тивно оценить фактическое водопотребление, возможные дополнительные источники поступления мышьяка и исключить факторы, которые могут исказить результаты исследования, такие как использование окрашивающих веществ для волос или других специальных средств. В анкету также включены вопросы об употреблении табака и алкоголя, что может являться дополнительным источником поступления мышьяка в организм человека. Указанные параметры опросника служили критерием формирования выборки для исследования.

Волосы состригались с 4–5-и разных мест затылочной волосистой части головы, ближе к шее, далее объединялись в пучок толщиной 2–3 мм и длиной до 3–5 см (непосредственно от корня волос), в количестве не менее 0,1 г. Согласно методике, волосы должны быть чистыми, без кондиционера, лака, геля, пенки, средств для укладки волос и пр. Химическая завивка, окраска и обесцвечивание не являются затруднением для дальнейшего проведения анализа. Для хранения использовались бумажные конверты. Специальных условий хранения и транспортировки не требовалось.

Согласно данным, фоновый уровень содержания мышьяка в волосах людей, не подвергающихся экспозиции мышьяка, находится в диапазоне 0,1–0,2 мг/кг (IARC), в некоторых источниках за фоновый уровень содержания мышьяка в волосах приняты концентрации 0,08–0,25 мг/кг. Содержание мышьяка в волосах выше 1,0 мг/кг указывает на наличие активной экспозиции к мышьяку с возможным проявлением признаков хронической интоксикации (арсенозов). Этот показатель рекомендуется учитывать как пороговый [29].

Интерпретацию измеряемых уровней биомаркеров экспозиции химическими веществами осуществляли на основе сравнения с допустимыми (референтными) значениями.

Статистический анализ полученных данных проводили на персональном компьютере с помощью электронных таблиц Microsoft Excel, в ходе которого была выведена регрессионная модель зависимости содержания мышьяка в волосах обследуемых от его уровня в потребляемой питьевой воде.

Результаты

В ходе исследования получены данные, подтверждающие накопление мышьяка в волосах жителей населённых пунктов, использующих для питьевого водоснабжения подземные воды с повышенным содержанием природного мышьяка. Результаты анализа содержания мышьяка в волосах представлены в таблице и на рис. 1.

Распределение содержания мышьяка в волосах жителей Северного Дагестана**Arsenic distribution in hair samples of North Daghestan population**

Содержание мышьяка в волосах, мкг/г	Число образцов	Частота встречаемости, %
< 0,5	56	57,7
0,5–0,9	31	32
≥ 1	10	10,3

Таким образом, 10% обследованных жителей могут быть отнесены в группу риска по арсенозу, так как содержание мышьяка в волосах превышает пороговые значения и подтверждается накопление мышьяка в организме. Следует отметить, что содержание мышьяка в волосах выше 1 мкг/г обнаружено у лиц, потребляющих воду с содержанием мышьяка 0,5 мг/л.

Согласно диаграмме, мы видим, что образцы, в которых выявлено высокое содержание мышьяка (от 0,4 мг/л) соответствуют образцам питьевой воды с высоким содержанием мышьяка (выше 0,8 мг/л).

С целью выявления зависимости концентрации мышьяка (As) в волосах местного населения от его содержания в потребляемой питьевой воде была построена линейная регрессия (рис. 2).

При выявлении зависимости содержания мышьяка в волосах обследованных лиц от его содержания в питьевой воде, получено уравнение регрессии: $y = 1,3661x + 0,1395$. Согласно приведённому уравнению, при значении концентрации мышьяка (As) в воде, равной 0,1 мг/л (значение x), концентрация мышьяка в волосах может составить примерно 0,28 мкг/г (значение y). Или при увеличении концентрации мышьяка в воде на 0,1 мг/л содержание мышьяка в волосах возрастает на 0,14 мкг/г.

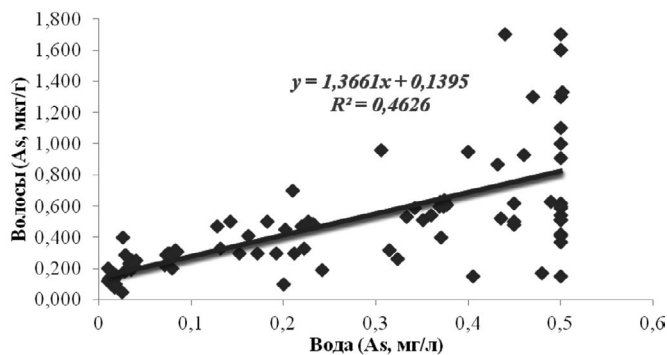


Рис. 2. Зависимость содержанием мышьяка в волосах обследованных лиц от его концентрации в потребляемой питьевой воде.

Fig. 2. Relationship between water arsenic and hair arsenic.

Тесноту линейной связи оценивает коэффициент корреляции, который равен 0,6801 ($\sqrt{R^2} = \sqrt{0,4626}$). Так как значение коэффициента составило $\sim 0,7$, это свидетельствует о наличии тесной связи между параметрами. Коэффициент детерминации составил 0,4626, т. е. 46% вариации содержания мышьяка (y) в волосах населения Северного Дагестана объясняется вариацией фактора x — концентрацией мышьяка в потребляемой воде. Фактическое значение F -критерия Фишера составило 81,8. Табличное значение критерия при пятипроцентном уровне значимости и степенях свободы $\kappa_1 = 1$ и $\kappa_2 = 95$ составляет $F_{\text{табл}} = 3,945$. Так как $F_{\text{факт}} = 81,8 > F_{\text{табл}} = 3,945$, то уравнение регрессии признается статистически значимым.

Стандартные ошибки для параметров регрессии составили $m_a = 0,048$ и $m_b = 0,1511$. Фактические значения t -критерия Стьюдента — $t_a = 2,8848$ и $t_b = 9,0430$.

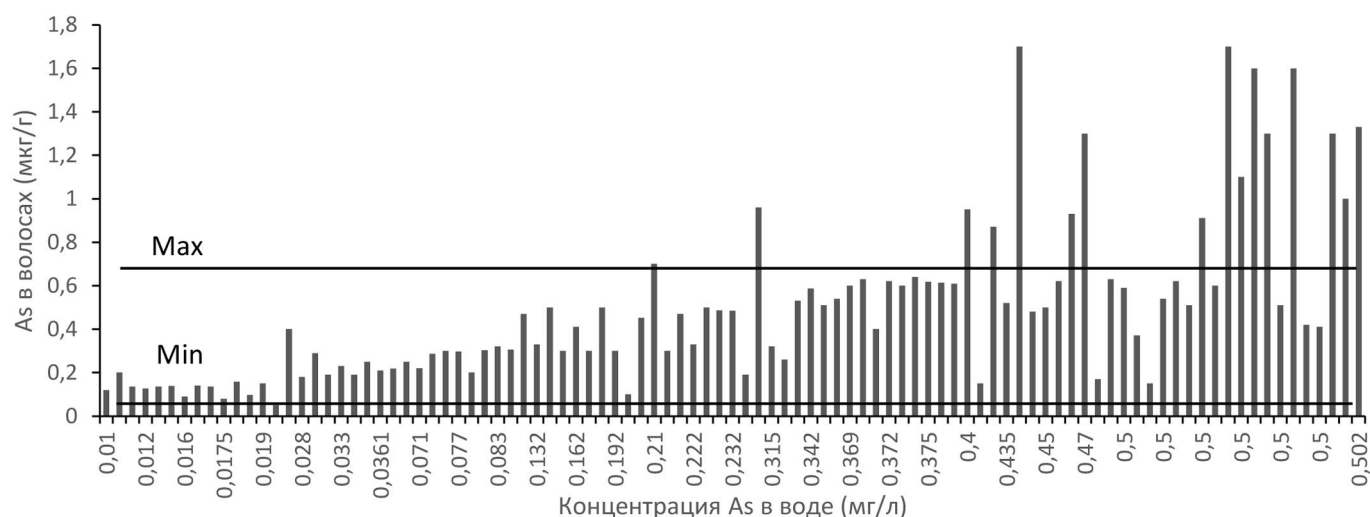


Рис. 1. Диаграмма содержания мышьяка в образцах волос и питьевой воды.

Fig. 1. Arsenic concentrations in hair and water samples.

Обсуждение

Используя волосы в качестве биомаркера экспозиции к мышьяку, можно получить информацию о кумулятивной экспозиции на протяжении предшествующих месяцев и лет, что крайне актуально в условиях биогеохимических провинций со следовым содержанием некоторых токсичных контаминантов. Использование биомаркеров позволяет выявить нагрузку на организм экспонируемых жителей и разработать рекомендации с превентивными мерами. Полученные в ходе данного исследования результаты отражают актуальность темы исследования. В дальнейшем планируется проведение детальных исследований в населенном пункте, где было выявлено самое высокое содержание мышьяка (с. Кардоновка, содержание мышьяка составило 0,5–0,6 мг/л) с определением биохимических индикаторов интоксикации мышьяком.

Ограничением исследования является небольшой размер выборки. Однако это не препятствует оценке эффективности использования волос в качестве биомаркера воздействия мышьяка и предварительным выводам для последующего углубленного анализа биомониторинга в условиях биогеохимических провинций.

Заключение

Результаты определения мышьяка в волосах людей подтверждают предположение о его куму-

ляции в организме человека вследствие хронической пероральной экспозиции.

Была выявлена достоверная корреляция между уровнем содержания мышьяка в воде и волосах экспонированного населения. Среди 57,7% обследованных лиц содержание мышьяка в волосах составляет менее 0,5 мкг/г; у 32% — в пределах 0,5–0,9 мкг/г и у 10,3% — выше 1,0 мкг/г (выше порогового значения в волосах, при котором могут наблюдаться симптомы арсенозов). Осмотр кожных покровов у обследованных лиц врачами местных ЛПУ не выявил явных клинических признаков арсенодерматитов, однако были выявлены отдельные типичные симптомы, такие как ладонно-подошвенный кератоз, частичная алопеция, гиперпигментация, линии Мее на ногтях, что также может свидетельствовать о хронической экспозиции к мышьяку. Следовательно, используя волосы в качестве биомаркера экспозиции к мышьяку, можно получить информацию о кумулятивной экспозиции на протяжении предшествующих месяцев и лет, что крайне актуально в условиях биогеохимических провинций со следовым содержанием некоторых токсичных контаминантов.

В дальнейшем планируется проведение детальных исследований в населённом пункте с. Кардоновка, где было выявлено самое высокое содержание мышьяка (0,5–0,6 мг/л) с определением биохимических индикаторов интоксикации мышьяком.

ЛИТЕРАТУРА

(п.п. 3–9, 11–26, 29 см. в References)

1. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Чашин В.П., Гудков А.Б. Научные принципы применения биомаркеров в медико-экологических исследованиях (обзор литературы). *Экология человека*. 2019; 9: 4–14.
2. Ревич Б.А. Биомониторинг металлов в организме человека. *Микроэлементы в медицине*. 2005; 6 (4): 11–6.
10. Скальный А.В. *Химические элементы в физиологии и экологии человека*. М.: ОНИКС 21 век, Мир; 2004. (In Russian)
27. Абдулмуталимова Т.О., Ревич Б.А., Газалиев И.М. Мышьяк в питьевых артезианских водах Северного Дагестана и риски здоровью населения. *Разведка и охрана недр*. 2018; 1: 37–41.
28. Абдулмуталимова Т.О. Оценка канцерогенного риска здоровью населения при использовании подземных вод с высоким содержанием мышьяка в качестве источников питьевого водоснабжения на примере Республики Дагестан. *Токсикологический вестник*. 2019; 6: 39–44.

REFERENCES

1. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Chashchin V.P., Gudkov A.B. Scientific Principles of Use of Biomarkers in Medico-Ecological Studies (Review). *Ekologiya cheloveka*. 2019; 9: 4–14. (In Russian)
2. Revich B.A. Biomonitoring of metals in the human body. *Mikroelementy v meditsine*. 2005; 6 (4): 3–12. (In Russian)
3. *Human biomonitoring: facts and figures*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2015.
4. Biomarkers in Risk Assessment: Validity and Validation (Environmental health criteria; 222). WHO International Programme on Chemical Safety, 2001. Available at: <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc222.htm> (accessed: 28.03.19).
5. Jakubowski M. *Lead Biomarkers and Human Biomonitoring*. Knudsen L.E., Merlo D.F. (ed.). Cambridge: UK, 2012.
6. Hughes M.F. Biomarkers of exposure: A case study with inorganic arsenic. *Environmental Health Perspective*. 2006; 114 (11): 1790–6.
7. Agahian B., et al. Arsenic levels in fingernails as a biological indicator of exposure to arsenic. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1990; 51(12): 646–51.
8. Atalla L.T., Silva C.M., Lima F.W. Activation analysis of arsenic in human hair—Some observations on the problems of external contamination. *Ann. Acad. Brasil. Cien.* 1965; 37: 432–41.
9. Calderon R.L., et al. Excretion of arsenic in urine as a function of exposure to arsenic in drinking water. *Environ. Health. Perspect.* 1999; 107: 663–7.
10. Skalny A.V. *Chemical elements in human physiology and ecology [Khimicheskie elementy v fiziologii i ekologii cheloveka]*. Moscow: ONYX 21st century, Mir; 2004. (In Russian)
11. Vahter M. Mechanism of arsenic biotransformation. *Toxicology*. 2002; 18: 211–7.
12. Valentine J.L., Kang H.K., Spivey G. Arsenic levels in human blood, urine, and hair in response to exposure via drinking water. *Environ Res.* 1979; 20: 24–32.
13. Biggs M.L., et al. Relationship of urinary arsenic to intake estimates and a biomarker of effect, bladder cell micronuclei. *Mutat. Res.* 1997; 386: 185–95.
14. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Arsenic Toxicological Profile. Atlanta, GA: ATSDR. 2007. Available at: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=22&tid=3>
15. Ratnaike R.N. Acute and chronic arsenic toxicity. *Postgraduate Medical Journal*. 2003; 79: 391–6.
16. Ya'n'ez J., Fierro V., Mansilla H., Figueroa L., Cornejo L., Barnes R.M. Arsenic speciation in human hair: A new perspective for epidemiological assessment in chronic arsenicism. *Journal of Environmental Monitoring*. 2005; 7: 1335–41.

17. Gault A.G., Rowland A.L., Charnock J.M., Wogelius R.A., Morilla I.G., Vong S. Poly A.D. Arsenic in hair and nails of individuals exposed to arsenic rich groundwaters in Kandal province, Cambodia. *Science of the Total Environment*. 2008; 393: 168–76.
18. Bhattacharya P., Jacks G., Frisbie S.H., Smith E., Naidu R., Sarkar B. Arsenic in the environment: A global perspective. In: B. Sarkar, ed. *Heavy Metals in the environment* New York. NY: Marcel Dekker, Inc; 2002: 147–215.
19. Hindmarsh J.T. Arsenic, its clinical and environmental significance. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*. 2000; 13: 165–72.
20. Hinwood A.L., Sim M.R., Jolley D., Klerk N., Bastone E.B., Gerostamoulos J., Drummer O.H. Hair and toenail arsenic concentrations of residents living in areas with high environmental arsenic concentrations. *Environmental Medicine*. 2003; 111(2): 187–93.
21. Armienta M.A., Rodriguez R., Cruz O. Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapán, México. *Bull. environ. Contam. Toxicol.* 1997; 59: 583–9.
22. Curry A.S., Pounds C.A. Arsenic in hair. *J. Forensic. Sci. Soc.* 1977; 17: 37–44.
23. Andrea L., et al. Hair and Toenail Arsenic Concentrations of Residents Living in Areas with High Environmental Arsenic Concentrations. *Environmental Health Perspectives*. 2003; 111(2): 187–93.
24. Maes D., Pate D.B. The absorption of arsenic into single human head hairs. *J. Forensic Sci.* 1977; 22: 89–94.
25. Smith H. The interpretation of the arsenic content of human hair. *J. Forensic Sci. Soc.* 1964; 240: 192–9.
26. Vahter M. Mechanism of arsenic biotransformation. *Toxicology*. 2002; 181: 211–7.
27. Abdulmutalimova T.O., Revich B.A., Gazaliev I.M. Arsenic in drinking artesian water and health risk assessment. *Razvedka I ohrana nedr.* 2018; 1: 37–41.
28. Abdulmutalimova T.O. Cancer risk assessment and groundwater with high arsenic contamination for drinking in Daghestan Republic. *Toxicologiceskij vestnik*. 2019; 6: 39–44. (In Russian)
29. Toxicological profile for arsenic. U.S. department of health and human services public health service agency for toxic substances and disease registry. Atlanta, Georgia; 2007.

ОБ АВТОРАХ:

Абдулмуталимова Тамила Омариевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиала ФГБУН «Объединённый институт высоких температур» Российской академии наук, 367030, г. Махачкала, Россия. E-mail: tamila4@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4743-6154>

Рамазанов Омари Магомедович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиала ФГБУН «Объединённый институт высоких температур» Российской академии наук, 367030, г. Махачкала, Россия. E-mail: omari50@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-6228-7795>

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Tamila O. Abdulmutalimova – Candidate of Biological Sciences, senior researcher at the Laboratory of Energy, Institute for Problems of Geothermy and Renewable Energy, branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 367030, Makhachkala, Russian Federation. E-mail: tamila4@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4743-6154>

Omari M. Ramazanov – Candidate of Chemical Sciences, senior researcher at the Laboratory of Energy, Institute for Problems of Geothermy and Renewable Energy, branch of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 367030, Makhachkala, Russian Federation. E-mail: omari50@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-6228-7795>

