

Читать
онлайн
Read
onlineРахманин Ю.А.^{1,2}, Егорова Н.А.¹, Михайлова Р.И.¹, Рыжова И.Н.¹, Кочеткова М.Г.¹

О содержании и контроле кремния в воде водоисточников и питьевой воде (обзор литературы)

¹ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия;

²ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 141014, Мытищи, Российская Федерация

Введение. Присутствие соединений кремния (Si) в воде водоисточников и питьевой воде остаётся актуальной проблемой, поскольку всё ещё нет достаточного понимания роли этого элемента в предупреждении и развитии болезней человека. Не сформировано единого мнения и о необходимости установления гигиенических предельно допустимых концентраций (ПДК) кремния, а также о целесообразности контроля его содержания в воде. Существуют противоположные точки зрения на действие присутствующего в питьевой воде Si: одни исследователи однозначно настаивают на положительных его эффектах, другие — на отрицательном влиянии на здоровье человека. Ни одна из этих точек зрения не является полностью подтверждённой и окончательно доказанной.

Методы поиска литературы: по базам научных данных Scopus, CyberLeninka, PubMed; выборочный; аналитико-синтетический; типологический.

Основная часть. В обзоре приводятся данные, свидетельствующие о значимости контроля содержания кремния в питьевой воде. Рассматриваются результаты ряда исследований, посвящённых оценке способности кремния, поступающего с питьевой водой, противодействовать токсическому действию алюминия на ткани головного мозга, таким образом снижая риск развития деменции и болезни Альцгеймера. Приводятся примеры изучения возможной связи содержания кремния в питьевой воде с увеличением случаев хронических болезней почек невыясненной этиологии (на примерах Индии и Индонезии), а также данные об отрицательных последствиях для здоровья длительного употребления кремнийсодержащей воды в кремниевой провинции Чувашии. Обобщены сведения о содержании кремния в воде водоисточников и питьевой воде в Российской Федерации и за рубежом, а также об используемых в настоящее время методах аналитического контроля кремния в воде.

Заключение. Многие вопросы контроля содержания кремния в питьевой воде и воде водоисточников остаются нерешёнными, для ответа на них необходимы совместные действия токсикологов, эпидемиологов, химиков, специалистов по гигиене и санитарной охране водоёмов.

Ключевые слова: кремний в воде водоисточников и питьевой воде; эффекты в организме; методы контроля в воде; обзор

Для цитирования: Рахманин Ю.А., Егорова Н.А., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н., Кочеткова М.Г. О содержании и контроле кремния в воде водоисточников и питьевой воде (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2023; 102(3): 229–234. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-229-234> <https://elibrary.ru/rowwuyr>

Для корреспонденции: Егорова Наталья Александровна, доктор мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены, НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва. E-mail: NEgorova@cspmz.ru

Участие авторов: Рахманин Ю.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Егорова Н.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Михайлова Р.И. — концепция и дизайн исследования, редактирование, ответственность за целостность всех частей статьи; Рыжова И.Н. — концепция и дизайн статьи, сбор и обработка материала; Кочеткова М.Г. — сбор и обработка материала, ответственность за целостность всех частей статьи.

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

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 02.02.2023 / Принята к печати: 24.03.2023 / Опубликовано: 20.04.2023

Yurii A. Rakhmanin^{1,2}, Natalija A. Egorova¹, Rufina I. Mikhailova¹, Irina N. Ryzhova¹, Marina G. Kochetkova¹

On the content and control of silicon in water sources and drinking water (literature review)

¹Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation;

²Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, 141014, Moscow Region, Mytishi, Russian Federation

Introduction. The problem of the presence of silicon in water sources and drinking water remains relevant, since there is still no sufficient understanding of the role of silicon contained in drinking water in the prevention and development of human diseases, there is no consensus on the need to establish hygienic maximum concentration limits for silicon and the feasibility of monitoring the silicon content in water. There are two opposing points of view on the effect of silicon presented in drinking water: on its definitely positive effects, and on its negative impact on human health. None of these points of view is fully confirmed and definitively proven.

Literature Search Methods. Literature search methods on Scopus, CyberLeninka, PubMed databases: selective, analytical-synthetic, typological.

The main part. The review provides evidence of the importance of controlling the content of silicon in drinking water. The results of a number of studies devoted to assessing the ability of silicon supplied with drinking water to counteract the toxic effect of aluminum on brain tissue, thus reducing the risk of dementia and Alzheimer's disease, are considered. Examples are given of studying the possible relationship between silicon content in drinking water and an increase in cases of chronic kidney disease of unknown etiology (on the examples of India and Indonesia), and the data on the negative health effects of long-term drinking of silicon-containing water in the silicon province of Chuvashia. Information is also given on the content of silicon in the water of water sources and drinking water in the Russian Federation and abroad, also the currently used methods for the analytical control of silicon in water.

Conclusion. *The problem of the content and control of silicon in drinking water and water sources includes many unresolved issues, which will be considered by the joint actions of toxicologists, epidemiologists, chemists, specialists in hygiene and sanitary protection of water bodies.*

Keywords: *silicon in water sources and drinking water; effects in the body; water control methods; review*

For citation: Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Mikhailova R.I., Ryzhova I.N., Kochetkova M.G. On the content and control of silicon in water sources and drinking water (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(3): 229-234. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-229-234> <https://elibrary.ru/rowwyr> (in Russian)

For correspondence: Nataliya A. Egorova, MD., PhD, DSci., leading researcher of the Hygiene department of the Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation. E-mail: NEgorova@cspmrz.ru

Information about authors:

Rakhmanin Yu.A., <https://orcid.org/0000-0003-2067-8014>
Mikhailova R.I., <https://orcid.org/0000-0001-7194-9131>
Kochetkova M.G., <https://orcid.org/0000-0001-9616-4517>

Egorova N.A., <https://orcid.org/0000-0001-6751-6149>
Ryzhova I.N., <https://orcid.org/0000-0003-0696-5359>

Contribution: *Rakhmanin Yu.A.* – concept and design of the study, editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; *Mikhailova R.I.* – concept and design of the study, editing; *Egorova N.A.* – concept and design of the study, collection and processing of material, writing text, editing; *Ryzhova I.N.* – concept and design of the study, collection and processing of material; *Kochetkova M.G.* – collection and processing of material, approval of the final version of the article.

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

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: February 2, 2022 / Accepted: March 24, 2022 / Published: April 20, 2023

Введение

Проблема присутствия кремния (Si) в воде водоисточников и питьевой воде имеет более чем полувековую историю. Она остаётся актуальной, поскольку до сих пор нет достаточного понимания механизмов биологического действия соединений Si при поступлении в организм с питьевой водой, его роли в предупреждении и развитии болезней человека, не сформировано единого мнения и о необходимости установления гигиенических ПДК кремния, а также о целесообразности контроля его содержания в воде.

Кремний, «король неорганического мира», долго считавшийся биологически инертным, с течением времени продемонстрировал широкий спектр эффектов в организме человека, причём в зависимости от точек зрения, как положительных, так и отрицательных [1–4]. Из положительных воздействий на здоровье растворимых форм биодоступного Si (кремниевых кислот) наиболее часто упоминаются предупреждение остеопороза, поддержание в оптимальном состоянии костной, соединительнотканной и сосудистой систем, снижение риска развития атеросклероза, болезни Альцгеймера и рассеянного склероза, нормализация процессов перекисного окисления липидов и антиоксидантной защиты. Подчёркивается особое значение данного элемента для беременных женщин, новорождённых и детей первого года жизни, а также для людей пожилого возраста. Кремний улучшает структурную целостность кожи, волос и ногтей, ускоряет кальцификацию костей, оказывает иммуномодулирующее и противовоспалительное действие [5–8]. Однако существуют данные и противоположного толка. Хорошо известны работы В.Л. Сусликова, Н.В. Толмачевой, С.П. Сапожникова (2007, 2010, 2011, 2001) и других исследователей, длительно наблюдавших за состоянием здоровья населения Чувашской Республики в биогеохимической провинции с повышенным содержанием кремния в питьевой воде [3, 4, 9–12]. В последние годы в научной печати стали появляться работы, где рассматривается возможная связь наличия кремния в питьевой воде с развитием хронических болезней почек (ХБП) невыясненной этиологии. Эти болезни встречаются преимущественно у населения географически неоднородных сельских местностей различных регионов мира и развиваются без каких-либо известных факторов риска, таких как диабет, гипертония, гломерулонефрит или генетическая патология почек [13, 14]. Интересно отметить, что, несмотря на диссонанс мнений, в общей массе зарубежных работ, посвящённых разным оценкам содержания кремния в питьевой воде, неожиданно можно встретить отдельные сообщения, подчёркивающие важность гигиенического нормирования и систематического определения содержания Si в водоисточниках и питьевой воде [5, 15].

Контроль содержания кремния в воде водоисточников и питьевой воде за рубежом

Хотя отношение к наличию Si в питьевой воде за рубежом весьма спокойное, в большинстве стран нет гигиенических нормативов содержания этого элемента, исследователи проявляют интерес к уровням концентраций кремния в воде водоисточников и питьевой воде. Например, при изучении роли антагонизма кремния и алюминия (Al) в риске развития болезни Альцгеймера, а также в странах, где население страдает от ХБП, при поиске её действительных этиологических причин. Многие исследования проводились для подтверждения разнонаправленных гипотез: положительного значения кремния в защите ткани мозга от негативного действия алюминия и отрицательного значения кремния при развитии ХБП. Почти всегда подчёркивается предварительность возможных выводов по каждой из этих гипотез и необходимость накопления для их обоснования новых материалов в связи с неполнотой знаний о механизме биологического действия кремния, пробелов в проведении эпидемиологических исследований.

Поскольку в нашей стране многие специалисты в области гигиены воды указывают на неоправданность сохранения ПДК кремния в воде как не имеющей достаточного экспериментального и эпидемиологического подтверждения [3, 4], целесообразно остановиться на некоторых деталях результатов работ, посвящённых действию кремния на человека при поступлении с питьевой водой, контролю Si в воде водоисточников и питьевой воде.

Значимость контроля содержания Si в свете оценки его возможного влияния на здоровье при поступлении в организм с питьевой водой

В последние годы проведён ряд исследований, посвящённых оценке способности Si противодействовать токсическому действию на ткани головного мозга содержащегося в воде алюминия. Токсичность Al для головного мозга объясняют усилением окислительного стресса с генерированием реактивных форм кислорода, повышением уровня липопероксидов, индуцированием конформации бета-листа в белке нейрофиламента, аккумуляцией бета-амилоида во внеклеточном пространстве, повреждением нейронов со снижением когнитивных функций, развитием деменции и болезни Альцгеймера [6, 16–19].

Внимание специалистов привлекает антагонизм Si и Al с уменьшением абсорбции алюминия в желудочно-кишечном тракте, увеличением его экскреции почками и предотвращением реабсорбции, что, возможно, связано с образованием нерастворимых гидроксидосиликатов.

В итоге биодоступность алюминия понижается, его накопление в тканях головного мозга с прогрессирующим деменции и болезни Альцгеймера замедляется [1, 6, 20–23]. Н. Jacqmin-Gadda и соавт. (1996) наблюдали за 3777 жителями юго-западной Франции в возрасте 65 лет и старше с целью выяснить, действительно ли содержащийся в питьевой воде кремний способен снизить у пожилых людей риск нарушений когнитивных функций, связанный с воздействием присутствующего в питьевой воде алюминия. Авторы пришли к заключению, что при низком содержании Si в воде Al проявляет негативное действие на когнитивные функции, в то время как с увеличением концентрации кремния в воде риск когнитивных нарушений снижается. Пороговые уровни этих эффектов оказались невысокими и составили 3,5 мкг/л для алюминия и 10,4 мг/л для кремния при pH 7,35 [24]. В эпидемиологических исследованиях продолжительностью от 3 до 7 лет наблюдали за состоянием 7598 женщин старше 75 лет, жительниц пяти городов Франции, пивших воду, содержащую разные количества алюминия и кремния. Концентрации алюминия находились в пределах 0,01–0,063 мг/л, концентрации кремния – 4,0–11,2 мг/л. Установлено, что чем меньше кремния поступало в организм с питьевой водой, тем в большей степени выраженными были проявления болезни Альцгеймера. По мнению авторов, полученные результаты свидетельствуют о том, что кремний в высоких концентрациях в питьевой воде может служить защитой от нарушений когнитивных функций [17]. В Южной Франции в течение 15 лет наблюдали за состоянием когнитивных функций у 1925 пожилых людей 65 лет и старше, употреблявших водопроводную питьевую воду с концентрациями алюминия 0,001–0,514 мг/л и кремния 4,2–22,4 мг/л. У испытуемых, пивших воду с концентрациями кремния 11,25 мг/л и выше, риск развития деменции и болезни Альцгеймера оказался заметно ниже, чем в случаях употребления воды с более низким содержанием кремния [22, 25]. Согласно результатам этих работ, пороговая концентрация кремния в питьевой воде, с которой начинается его превентивное влияние в отношении токсического действия алюминия на головной мозг, находится, вероятно, на уровне около 10–11 мг/л. Более того, по данным G.A. Taylor (1995), пороговая концентрация защитного действия растворимого кремния с ослаблением абсорбции и ограничением биодоступности алюминия может оказаться ещё ниже – на уровне 3 мг/л [26]. Есть мнение, что кремний, содержащийся в питьевой воде, служит естественным антидотом алюминия и снижает риск развития болезни Альцгеймера [17, 18, 20].

Что касается идентификации этиологической роли кремния в развитии ХБП, то работ, действительно отражающих связь присутствия кремния в питьевой воде и частоту заболеваний ХБП, не так уж много. В частности, в двух деревнях Индии (Nellore district, Andhra Pradesh) сравнивали качество колодезной питьевой воды и сопоставляли уровни заболеваемости ХБП. В деревне А (Ucharally) концентрации кремния в питьевой воде в 4–6 раз превышали уровни кремния в воде деревни Б (Pedarajupalem), при этом большая часть из 52 обследованных жителей деревни А имели симптомы ХБП разной степени тяжести, в то время как все 50 обследованных жителей деревни Б не страдали ХБП. Наряду с кремнием питьевая вода и в той, и в другой деревне содержала стронций. Авторы приходят к выводу, что высокий уровень заболеваемости ХБП в деревне А может быть связан с синергизмом действия повышенных концентраций кремния со стронцием при поступлении микроэлементов в организм с питьевой водой [27].

На возможную роль кремния в развитии ХБП указывают Mascarenhas S. и соавт. (2017), в исследованиях которых, выполненных в регионе Сапасапа южного Гоа (Индия), подчёркивается причинно-следственная связь нефротоксического потенциала природного кремния подземных вод, используемых населением для питьевых целей, и проявления ХБП.

Однако однозначно оценить результаты работы сложно, поскольку в подземных водах наряду с кремнием (115,5 мг/л SiO₂) содержится ещё и свинец (9,98 мкг/л) [28]. Исследовали возможную связь ХБП с концентрациями кремния в питьевой воде и в областях Uddanam (Srikakulam District) и Chimakurthy (Ongole District) в штате Andhra Pradesh, однако подтверждения такой связи выявить не удалось [29].

Возможный риск присутствия диоксида кремния в колодезной воде, используемой в домашнем хозяйстве и для питья, изучали на примере округа Maros (Индонезия). Расчёты коэффициента опасности HQ проводили для 14 проб воды, содержащей диоксид кремния SiO₂. По результатам хронических опытов на крысах (продолжительность 52 нед, NOAEL 2,03 мг/кг/день диоксида кремния при пероральном поступлении) [30] и при содержании SiO₂ в пробах питьевой воды в пределах 7,4394–20,9002 мг/л авторы рассчитали HQ. Его значение оказалось более единицы (в пределах 2–10) в воде всех 14 колодцев, уровень риска употребления такой воды оценили как средний. Этот показатель значительно превышал риск присутствия в воде хрома (CrVI), для которого HQ был выше единицы только в воде трёх колодцев, составляя 1,1–3,04. В итоге авторы сочли воду всех 14 обследованных колодцев неприемлемой для питья [31]. Хотя такие работы представляют несомненный интерес, пока они не рассматриваются как достаточные для доказательства связи между кремнием питьевой воды и ХБП. Для обоснования этиологической роли Si питьевой воды в развитии ХБП необходимы дальнейшие исследования [14, 32].

Изучение уровней содержания кремния в питьевой воде как одной из возможных причин ХБП в определённой степени созвучно оценкам значения Si в питьевой воде кремниевой биогеохимической провинции Чувашской Республики с относительно высоким (14,5 ± 0,37 мг/л) содержанием кремния и выраженным дисбалансом соотношений кремния и микроэлементов – магния, хрома, никеля, марганца, фтора, стронция, железа, йода. В то время как СанПиН 2.1.3685–21¹ позиционирует уровни кремния в воде 20–25 мг/л как безвредные, но не ссылается при этом на какие-либо доказательные материалы, опубликованы данные отечественных исследователей, полученные как в длительных эпидемиологических исследованиях с наблюдениями за состоянием здоровья людей, так и в экспериментах на лабораторных животных. Эти результаты указывают на возможность неблагоприятного действия на организм человека природного кремния в питьевой воде при концентрациях 10 мг/л и выше. Безвредность же предполагается только при значениях показателя ниже 3 мг/л. Авторами были представлены фактические материалы, подтверждающие их мнение о том, что в зоне риска и эколого-биогеохимического бедствия (терминология авторов) кремниевой провинции показатели заболеваемости взрослого населения по всем хроническим неинфекционным болезням, включая ишемическую болезнь сердца, инфаркт миокарда, сахарный диабет второго типа, желчнокаменную болезнь, уролитиаз, злокачественные новообразования, в 2–3 раза превышают среднереспубликанские, причём на долю кремния (при его аномальных соотношениях с цинком, медью, магнием, фтором и йодом в воде централизованных и децентрализованных источников водоснабжения) приходится 55,27% краевой патологии [3, 4, 9–12]. По мнению Н.В. Толмачевой, оптимальной для гигиенического нормирования концентрацией кремния в питьевой воде можно считать 3,33 ± 0,65 мг/л при условии оптимального соотношения содержания в воде Si и других микроэлементов, поскольку именно при таких уровнях концентраций элемента наблюдались наиболее благоприятные показатели состояния здоровья населения [10].

¹ Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

О контроле содержания кремния в воде водоисточников и питьевой воде в Российской Федерации

В нашей стране систематический контроль содержания кремния в воде не проводится, поскольку этот элемент не входит в число химических показателей, приоритетных при мониторинге безвредности водопотребления для населения. Тем не менее из ряда научных публикаций можно получить представление о том, в какой степени значима проблема присутствия кремния в воде, а также о наблюдениях за влиянием кремния питьевой воды на здоровье населения в отдельных регионах страны. Остановимся кратко на выводах авторов этих публикаций.

На территории Приамурья часто встречаются артезианские воды с повышенным содержанием кремния. В Хабаровском районе в 2005–2008 гг. концентрации Si в пробах воды из резервных скважин питьевого водоснабжения семи населённых пунктов составляли 8,9–45,2 мг/л [33]. Значительно содержание Si и в родниковых водах Ульяновской области, используемых населением в качестве питьевых. Исследования показали, что во многих районах области концентрации кремния в родниковой воде превышают 10 мг/л. В Карсунском районе вода 14 из 16 родников содержала 10,1–16,1 мг/л кремния; в Барышевском районе в 8 из 12 родников кремний обнаруживался в концентрациях 11,9–19,2 мг/л; в Сурском районе из 12 родников 10 имели концентрации кремния на уровне 11,3–18,0 мг/л; в Новоспасском районе в четырёх родниках обнаружены концентрации Si в пределах 12,5–18,2 мг/л; в Кузоватовском в 22 родниках – 11,5–16,5 мг/л кремния [34, 35].

В Хорольском районе Приморского края в 43,7% проб питьевой воды (59 из 135) обнаружено присутствие кремния в концентрациях, превышавших 10 мг/л [36].

Подземные воды Западной Сибири, подаваемые в системы централизованного питьевого водоснабжения, также содержат кремний. По данным Shiyan L.N. и соавт. (2014), в Северо-Западной Сибири (Белоярская область, Каргасокский район, г. Стрежевой, а также южная часть Томского региона) концентрации кремния в подземных водах были в пределах 10–28 мг/л, а в Юго-Западной Сибири – 4,5–16,0 мг/л [37]. Авторами [38] при исследовании подземных вод Западной Сибири в пробах, отобранных в 18 населённых пунктах Томской области, найдено от 10,7 до 19,7 мг/л кремния. Повышенные концентрации кремния характерны для подземных источников питьевого назначения в г. Кирове. В 8 из 26 исследованных в 1997–2013 гг. проб подземных вод содержание кремния достигало 11,2–13,7 мг/л, а в 18 составляло 2,9–9,9 мг/л [39]. Вода 120 трубчатых колодцев частных домов и коттеджей 60-километровой зоны, прилегающей к г. Екатеринбург, по наблюдениям 2005–2014 гг. содержала 8,3–18,5 мг/л кремния [40].

Особое внимание в течение многих лет исследователи обращали на присутствие Si в питьевой воде кремниевой биогеохимической провинции Чувашии. По опубликованным данным, в Присурском субрегионе питьевые воды 150 обследованных шахтных колодцев содержали $11,6 \pm 0,36$ мг/л кремния (до 16,5 мг/л). В воде р. Суры, используемой для водоснабжения приблизительно 85% жителей городов Алатыря и Шумерли, концентрации кремния составляли 15,0–21,6 мг/л [41]. В с. Кудеихе Поречского района питьевая вода содержала $14,5 \pm 0,37$ мг/л Si [11].

Согласно приведённой выше информации, в большинстве случаев концентрации кремния в питьевой воде населённых пунктов Российской Федерации находились на уровне 10–20 мг/л и не превышали 45,2 мг/л. Практически нет данных, свидетельствующих о каких-либо отрицательных последствиях использования такой воды в питьевых целях. Исключения составляют лишь материалы выполненных в отдельных зонах кремниевой биогеохимической провинции Чувашии многолетних исследований. Только в них

фиксировалось неблагоприятное действие кремния питьевой воды на состояние здоровья постоянно проживающего населения, на основании чего и формировалось мнение о неблагоприятном действии кремния уже в концентрациях, соответствующих ранее действовавшей в России ПДК – 10 мг/л по Si [11, 42]. Для сравнения: содержание кремния в водопроводной питьевой воде определялось на уровнях $\leq 2,5$ мг/л в Западной Британии, ≤ 14 мг/л – в Восточной Британии, 0–12 мг/л – в Северной Британии. В крупных городах США этот показатель составлял 18–20 мг/л, во Франции – 4,2–22,4 мг/л (Юго-Западная Франция), в Париже, Булони, Тулузе, Монпелье, Амьене, Лионе – 4,0–11,2 мг/л [6, 17, 24, 26]. В Индии в питьевых целях может использоваться вода с заметно большим содержанием кремния (SiO_2) – до 45 и даже 115 мг/л [15, 27–29].

Методы контроля кремния в питьевой воде и воде водоисточников, используемые в России и за рубежом

И в России, и за рубежом методы количественного контроля Si в питьевой воде и воде водоисточников разработаны достаточно хорошо, официально утверждены и рекомендованы для практического применения при оценке условий водопользования населения.

В нашей стране действуют четыре методических документа, устанавливающих порядок контроля содержания кремния в питьевой воде и воде водоисточников:

- РД 52.24.433–2018², где приводится методика измерений массовой концентрации соединений кремния (и всех форм кремниевых кислот) в пробах природных и очищенных сточных вод в концентрациях 0,5–15,0 мг/л в пересчёте на кремний фотометрическим методом в виде жёлтой формы молибдокремниевой кислоты;
- РД 52.24.432–2018³ с методикой фотометрического определения концентраций соединений кремния (и всех форм кремниевых кислот) в пробах природных и очищенных сточных вод на уровнях 0,1–2,0 мг/л в пересчёте на кремний в виде синей (восстановленной) формы молибдокремниевой кислоты;
- ПНД Ф 14.1:2.4.215–06⁴, содержащая методику измерений кремниевой кислоты в пересчёте на кремний в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде жёлтой кремнемолибденовой гетерополиоксидной формы молибдокремниевой кислоты;
- ГОСТ 31870–2012⁵, устанавливающий порядок использования метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой для определения кремния в питьевых природных поверхностных и подземных водах, в том числе источниках водоснабжения, в концентрациях 0,05–5,0 мг/л.

В приведённых в предыдущем разделе статьи публикациях отечественными авторами для контроля содержания

² РД 52.24.433–2018 Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде жёлтой формы молибдокремниевой кислоты (с Поправкой № 1). Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Росгидромет. Ростов-на-Дону: Росгидромет; ФБГУ «ГХИ», 2018. 23 с.

³ РД 52.24.432–2018 Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде синей (восстановленной) формы молибдокремниевой (с Поправкой № 1). Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Росгидромет. Ростов-на-Дону: Росгидромет; ФБГУ «ГХИ», 2018. 22 с.

⁴ ПНД Ф 14.1:2.4.215–06 (Издание 2011 г.). Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремниевой кислоты (в пересчёте на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде жёлтой кремнемолибденовой гетерополиоксидной формы молибдокремниевой кислоты. М.: Федеральное бюджетное учреждение «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия», 2011. 22 с.

⁵ ГОСТ 31870–2012 Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

кремния в воде использовались как фотометрические методы [33, 38, 40], так и метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой [34, 35, 37].

За рубежом содержание кремния в воде исследуют методами атомно-абсорбционной спектроскопии, оптико-эмиссионной спектроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и колориметрическими методами. Подробное описание методов исследования воды на содержание кремния можно найти в 23-м издании объёмного руководства Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [43].

Результаты определения концентраций кремния в природных водах могут отличаться в зависимости от того, какой метод (фотометрический или спектроскопический) для этого использовался. По данным М.Г. Камбалиной и соавт. (2014), концентрации кремния в подземных водах Кемеровской области, определённые спектрофотометрическим методом с образованием жёлтой формы молибдокремниевой кислоты, оказались на 30–40% ниже, чем определённые методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Такие значительные расхождения могут быть обусловлены присутствием в воде разных соединений кремния. Если мономерно-димерные формы хорошо идентифицируются фотометрическим методом, то для определения общей концентрации кремния, включая высокополимеризованные, коллоидные и взвешенные формы, предпочтительно использование метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС), поскольку при фотометрии для полного определения кремния в воде необходима сложная пробоподготовка (РД 52.24.433–2018). Метод ААС является экспрессным и может использоваться для контроля всех форм кремниевой кислоты без предварительной пробоподготовки [44, 45]. Эти нюансы практического применения разных методов исследования содержания кремния имеют большое значение, поскольку раздельный и суммарный контроль соединений кремниевой кислоты в воде важны при изучении биодоступности и сравнительных биологических эффектов разных форм Si для человека, а также при обосновании и контроле безвредных уровней этого элемента в питьевой воде [3, 4]. Специфику каждого из методов необходимо учитывать и при поиске новых малоизученных сторон действия на здоровье населения отдельных форм кремния в воде. Например, в Финляндии было высказано предположение, что нанокolloидный аморфный диоксид кремния может участвовать как триггер в развитии аутоиммунного гипотиреоза и диабета I типа у населения,

употребляющего питьевую воду с содержанием Si в этой форме [46, 47]. К сожалению, в СанПиН 1.2.3685–21 не приведено никаких указаний относительно приоритетности тех или иных аналитических методов при контроле присутствия кремния в воде.

Заключение

Несмотря на все проведённые к настоящему времени исследования, наука ещё далека от формирования единого мнения о пользе или вреде кремния, поступающего в организм с питьевой водой. Сторонники гипотезы о безусловном положительном влиянии кремния на организм человека, как и сторонники гипотезы о существовании у населения болезней, обусловленных длительным употреблением для питья кремнийсодержащей воды, пока не могут найти исчерпывающих доводов в подтверждение своих суждений. Тема по-прежнему остаётся открытой из-за дефицита доказательных данных о биологическом действии содержащегося в питьевой воде Si и вклада его различных форм во влияние на здоровье человека. В связи с этим по-прежнему нет и обоснованное подтверждение величины, необходимости и целесообразности установления и контроля гигиенического норматива Si в питьевой воде, основных предметов обсуждения, дискутируемых в Российской Федерации и поднимаемых в отдельных публикациях зарубежных авторов. В нашей стране и за рубежом действуют официальные системы современных методов определения всех форм кремниевой кислоты в воде, однако отечественная система не в полной мере используется для решения актуальных вопросов контроля. В частности, недостаточно сведений о пределах и формах содержания кремния в воде водоисточников и питьевой воде, а также о связях концентраций Si с заболеваемостью населения, установленных в эпидемиологических исследованиях. Исключением составляют данные для Чувашской Республики. Следует отметить, что в СанПиН 1.2.3685–21 не указывается, какой аналитический метод должен использоваться для контроля ПДК, хотя применение разных методик или их модификаций может отразиться на итоговой оценке уровня и безвредности присутствия соединений кремния в воде. Таким образом, анализ содержания и контроль кремния в питьевой воде и воде водоисточников ставят перед исследователями многие вопросы, для ответа на которые потребуются синтез мнений токсикологов, эпидемиологов, химиков, специалистов по гигиене и санитарной охране водоёмов.

Литература

(п.п. 5, 6, 8, 13–32, 37, 43, 46, 47 см. References)

- Вапиров В.В., Феоктистов В.М., Венскович А.А., Вапирова Н.В. К вопросу о поведении кремния в природе и его биологической роли. *Учёные записки Петрозаводского государственного университета*. 2017; (2): 95–102.
- Мокиенко А.В. Кремний в воде: от токсичности к эссенциальности. *Вісник морської медицини*. 2020; (4): 136–43. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4430795>
- Рахманин Ю.А., Егорова Н.А., Красовский Г.Н., Михайлова Р.И., Алексеева А.В. Кремний, его биологическое действие при энтеральном поступлении в организм и гигиеническое нормирование в питьевой воде. Обзор литературы. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(5): 492–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-492-498>
- Рахманин Ю.А., Егорова Н.А., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н., Кочеткова М.Г. О гигиеническом нормировании соединений кремния в питьевой воде (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(10): 1077–83. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083>
- Бельмер С.В., Гасилина Т.В. Микроэлементы и микроэлементозы и их значение в детском возрасте. *Вопросы современной педиатрии*. 2008; 7(6): 91–6.
- Сусликов В.Л., Толмачева Н.В. Эколого-биогеохимическое зонирование территорий – необходимый этап изучения причинно-следственных связей атеросклероза и его последствий. *Фундаментальные исследования*. 2007; (12–1): 127–30.
- Толмачева Н.В. Методология и принципы гигиенического нормирования оптимальных концентраций и соотношений макро- и микроэлементов в питьевой воде и пищевом рационе. *Вестник Чувашского университета*. 2010; (3): 154–61.
- Толмачева Н.В. *Эколого-физиологическое обоснование оптимальных уровней макро- и микроэлементов в питьевой воде и пищевых рационах*: Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. М.; 2011.
- Сапожников С.П., Голенков А.В. Роль биогеохимических факторов в развитии краевой патологии. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 70–2.
- Титова А.Г. Исследование подземных вод Хабаровского района и оценка возможности их использования в питьевых целях. *Учёные заметки Тихоокеанского государственного университета*. 2013; 4(3): 9–21.
- Нефедьева Т.А., Благовещенская Н.В. Качество родниковой воды Ульяновской области. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2018; (4): 143–55. <https://doi.org/10.23648/UMVJ.2018.32.22704>
- Нефедьева Т.А., Благовещенская Н.В. Оценка качества родниковых вод Ульяновской области. *Проблемы региональной экологии*. 2020; (6): 5–9. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-6-5-9>
- Кыку 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>
- Костикова Л.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И., Егоров Н.Б. Образование кремнийорганических соединений в процессах очистки воды. *Известия Томского политехнического университета*. 2016; 327(1): 60–7.
- Гимранов Ф.М., Беляев А.Н., Флегентов И.В., Вахрушева О.М., Лысов Д.С. Актуализация вопроса обескремнивания подземных водоисточников для г. Кирова и перспективные направления его решения. *Вестник Казанского технологического университета*. 2016; 19(6): 141–4.

40. Конышина Л.Г. Оценка качества воды источников нецентрализованного водоснабжения Екатеринбурга и его окрестностей. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(5): 413–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-5-413-416>
41. Леженина С.В. *Гигиеническая оценка причинно-следственных связей язвенной болезни с биогеохимическими факторами*. Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Казань; 2000.
42. Сапожников С.П. *Влияние эколого-биогеохимических факторов среды обитания на функциональное состояние и здоровье населения Чувашии*: Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. М.; 2001.
44. Камбалина М.Г., Пикула Н.П., Гусева Н.В. Выбор метода определения концентрации кремния в природных водах разных типов. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2014; 57(11): 15–8.
45. Камбалина М.Г., Скворцова Л.Н., Мазурова И.С., Гусева Н.В. К вопросу о методах определения растворимых соединений кремния в воде и способах ее обескременивания. *Известия Томского политехнического университета*. 2013; 323(3): 18–22.

References

1. Vapirov V.V., Feoktistov V.M., Venskovich A.A., Vapirova N.V. On silicon's behavior and its biological role in nature. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017; (2): 95–102. (in Russian)
2. Mokienko A.V. Silicon in water: from toxicity to essence. *Visnik mors'koï meditsini*. 2020; (4): 136–43. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4430795> (in Russian)
3. Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Krasovskiy G.N., Mikhaylova R.I., Alekseeva A.V. Silicon: its biological impact under dietary intake and hygienic standardization of its content in drinking water. A review. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(5): 492–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-492-498> (in Russian)
4. Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Mikhaylova R.I., Ryzhova I.N., Kochetkova M.G. On the hygienic rating of silicon compounds in drinking water (literature review). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(10): 1077–83. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083> (in Russian)
5. Shu W.Q., Luo J.H., Zhang J.J. The relationship between soluble silicate acid in drinking water and food and human health. *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi*. 2020; 54(6): 702–7. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112150-20200318-00378> (in Chinese)
6. Martin K.R. Silicon: the health benefits of a metalloid. *Met. Ions. Life Sci*. 2013; 13: 451–73. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_14
7. Bel'mer S.V., Gasilina T.V. Microelements and microelementosis and their significance in childhood. *Voprosy sovremennoy pediatrii*. 2008; 7(6): 91–6. (in Russian)
8. Mehri A. Trace elements in human nutrition (II) – an update. *Int. J. Prev. Med*. 2020; 11: 2. https://doi.org/10.4103/ijpvm.ijpvm.48_19
9. Suslikov V.L., Tolmacheva N.V. Ecological and biogeochemical zoning of territories is a necessary stage in the study of the cause-and-effect relationships of atherosclerosis and its consequences. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2007; (12–1): 127–30. (in Russian)
10. Tolmacheva N.V. Methodology and principles of hygienic norming of optimal concentration and correlations of macro- and trace elements in drinking water and food diet. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2010; (3): 154–61. (in Russian)
11. Tolmacheva N.V. *Ecological and physiological substantiation of optimal levels of macro- and microelements in drinking water and food rations: Autoabstract of Diss. Moscow; 2011*. (in Russian)
12. Sapozhnikov S.P., Golenkov A.V. The role of biogeochemical factors in local pathology formation. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 70–2. (in Russian)
13. Gifford F.J., Gifford R.M., Eddleston M., Dhaun N. Endemic Nephropathy Around the World. *Kidney Int. Rep*. 2017; 2(2): 282–92. <https://doi.org/10.1016/j.ekir.2016.11.003>
14. Jolly A.M., Thomas J. Chronic kidney disease of unknown etiology in India: a comparative study with Mesoamerican and Sri Lankan nephropathy. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2022; 29(11): 15303–17. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16548-w>
15. Khan M.M.A., Umar R. Significance of silica analysis in groundwater in parts of Central Ganga Plain, Uttar Pradesh, India. *Curr. Sci*. 2010; 98(9): 1237–40.
16. Gupta V.B., Anitha S., Hegde M.L., Zecca L., Garruto R.M., Ravid R., et al. Aluminium in Alzheimer's disease: are we still at a crossroad? *Cell Mol. Life Sci*. 2005; 62(2): 143–58. <https://doi.org/10.1007/s00018-004-4317-3>
17. Gillette-Guyonnet S., Andrieu S., Nourhashemi F., de La Guéronnière V., Grandjean H., Vellas B. Cognitive impairment and composition of drinking water in women: findings of the EPIDOS Study. *Am. J. Clin. Nutr*. 2005; 81(4): 897–902. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.4.897>
18. Gillette Guyonnet S., Andrieu S., Vellas B. The potential influence of silica present in drinking water on Alzheimer's disease and associated disorders. *J. Nutr. Health Aging*. 2007; 11(2): 119–24.
19. Gonzalez-Muñoz M.J., Meseguer I., Sanchez-Reus M.L., Schultz A., Olivero R., Benedí J., et al. Beer consumption reduces cerebral oxidation caused by aluminum toxicity by normalizing gene expression of tumor necrotic factor alpha and several antioxidant enzymes. *Food Chem. Toxicol*. 2008; 46(3): 1111–8. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.11.006>
20. Sánchez-Muniz F.J., Macho-González A., Garcimartín A., Santos-López J.A., Benedí J., Bastida S., et al. The nutritional components of beer and its relationship with neurodegeneration and Alzheimer's disease. *Nutrients*. 2019; 11(7): 1558. <https://doi.org/10.3390/nu11071558>
21. Jurkić L.M., Čepanec I., Pavelić S.K., Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr. Metab. (Lond)*. 2013; 10(1): 2. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-10-2>
22. Noremberg S., Bohrer D., Schetinger M.R., Bairos A.V., Gutierrez J., Gonçalves J.F., et al. Silicon reverses lipid peroxidation but not acetylcholinesterase activity induced by long-term exposure to low aluminum levels in rat brain regions. *Biol. Trace Elem. Res*. 2016; 169(1): 77–85. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0392-6>
23. Beardmore J., Lopez X., Mujika J.I., Exley C. What is the mechanism of formation of hydroxylaluminosilicates? *Sci. Rep*. 2016; 6: 30913. <https://doi.org/10.1038/srep30913>
24. Jacqmin-Gadda H., Commenges D., Letenneur L., Dartigues J.F. Silica and aluminum in drinking water and cognitive impairment in the elderly. *Epidemiology*. 1996; 7(3): 281–5. <https://doi.org/10.1097/0001648-199605000-00011>
25. Rondeau V., Jacqmin-Gadda H., Commenges D., Helmer C., Dartigues J.F. Aluminum and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. *Am. J. Epidemiol*. 2009; 169(4): 489–96. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn348>
26. Taylor G.A., Newens A.J., Edwardson J.A., Kay D.W., Forster D.P. Alzheimer's disease and the relationship between silicon and aluminum in water supplies in northern England. *J. Epidemiol. Community Health*. 1995; 49(3): 323–4. <https://doi.org/10.1136/jech.49.3.323>
27. Khandare A.L., Reddy Y.S., Balakrishna N., Rao G.S., Gangadhar T., Arlappa N. Role of drinking water with high silica and strontium in chronic kidney disease: an exploratory community-based study in an Indian village. *Indian J. Comm. Health*. 2015; 27(1): 95–102.
28. Mascarenhas S., Mutnuri S., Ganguly A. Deleterious role of trace elements – silica and lead in the development of chronic kidney disease. *Chemosphere*. 2017; 177: 239–49. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.155>
29. Reddy D.V., Gunasekar A. Chronic kidney disease in two coastal districts of Andhra Pradesh, India: role of drinking water. *Environ. Geochem. Health*. 2013; 35(4): 439–54. <https://doi.org/10.1007/s10653-012-9506-7>
30. ATSDR. Toxicological Profile for Silica; 2019.
31. Rauf A.U., Mallongi A., Daud A., Hatta M., Astuti R.D.P. Ecological risk assessment of hexavalent chromium and silicon dioxide in well water in Maros Regency, Indonesia. *Gac. Sanit*. 2021; 35(S1): 54–8. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.002>
32. John O., Gummudi B., Jha A., Gopalakrishnan N., Kalra O.P., Kaur P., et al. Chronic kidney disease of unknown etiology in India: What do we know and where we need to go. *Kidney Int. Rep*. 2021; 6(11): 2743–51. <https://doi.org/10.1016/j.ekir.2021.07.031>
33. Titova A.G. Groundwater investigation Khabarovsk district and evaluation possibility of using it for drinking. *Uchenye zametki Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013; 4(3): 9–21. (in Russian)
34. Nefed'eva T.A., Blagoveshchenskaya N.V. Quality of spring water in Ulyanovsk region. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2018; (4): 143–55. <https://doi.org/10.23648/UMBJ.2018.32.22704> (in Russian)
35. Nefed'eva T.A., Blagoveshchenskaya N.V. Assessment of spring water quality in the Ulyanovsk region. *Problemy regional'noy ekologii*. 2020; (6): 5–9. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-6-5-9> (in Russian)
36. Kiku P.F., Kislitsyna L.V., Bogdanova V.D., Sabirova K.M. Hygienic evaluation of the quality of drinking water and risks for the health of the population of the Primorye territory. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(1): 94–101. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-94-101> (in Russian)
37. Shiyán L.N., Tropina E.A., Machehkina K.I., Gryaznova E.N., An V.V. Colloid stability of iron compounds in groundwater of Western Siberia. *Springerplus*. 2014; (3): 260. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-260>
38. Kostikova L.A., Shiyán L.N., Machehkina K.I., Egorov N.B. Formation of organosilicon compounds in water purification processes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2016; 327(1): 60–7. (in Russian)
39. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Vakhrusheva O.M., Lysov D.S. Actualization of the issue of underground water sources desilicization for the city of Kirov and promising directions for its solution. *Vestnik Kazanskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016; 19(6): 141–4. (in Russian)
40. Kon'shina L.G. The assessment of the quality of water from sources of decentralized water supply of Ekaterinburg and surrounding areas. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2016; (5): 413–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-5-413-416> (in Russian)
41. Lezhenina S.V. *Hygienic assessment of causal relationships of peptic ulcer with biogeochemical factors*: Diss. Kazan'; 2000. (in Russian)
42. Sapozhnikov S.P. *The influence of ecological and biogeochemical factors of the environment on the functional state and health of the population of Chuvashia*. Autoabstract of Diss. Moscow; 2001. (in Russian)
43. American Public Health Association. Standard methods for examination of water and wastewater. Washington; 2017.
44. Kamalina M.G., Pikula N.P., Guseva N.V. Selection of a method for determining the concentration of silicon in natural waters of different types. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2014; 57(11): 15–8. (in Russian)
45. Kamalina M.G., Skvortsova L.N., Mazurova I.S., Guseva N.V. On the issue of methods for determining silicon soluble compounds in water and the techniques of its desilicization. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013; 323(3): 18–22. (in Russian)
46. Junnila S.K. Nanocolloidal amorphous silica in drinking water as an autoimmunity trigger in Finland. *Med. Hypotheses*. 2011; 77(5): 815–7. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2011.07.044>
47. Junnila S.K. Type 1 diabetes epidemic in Finland is triggered by zinc-containing amorphous silica nanoparticles. *Med. Hypotheses*. 2015; 84(4): 336–40. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2015.01.021>