



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)

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

**Введение.** Кремний – уникальный по своим физико-химическим свойствам элемент, практически повсеместно распространённый в источниках водоснабжения, однако не нормируемый в питьевой воде в мировой практике обеспечения безвредности водопользования населения. В нашей стране полувековая история разработки гигиенических нормативов кремния в воде началась с обоснования ПДК кремнийсодержащих реагентов, применяемых при водоподготовке. Однако с течением времени возникли сомнения в пригодности нормативов техногенного кремния для контроля природного кремния в питьевой воде. Сторонники безвредности природных растворимых форм кремния высказывались за ликвидацию нормативов кремния в воде, в то время как исследователи действия кремния в кремниевых биогеохимических провинциях постоянно выявляли его негативные эффекты в состоянии здоровья проживающего в этих регионах населения, подтверждая это экспериментами на животных.

**Методы поиска литературы** – по базам данных Scopus, CyberLeninka, PubMed выборочный, аналитико-синтетический, типологический.

**Основная часть.** В обзоре приводятся сведения о растворимых формах кремния, их стабильности и биодоступности, рассматриваются ретроспектива и текущее состояние гигиенического нормирования кремния в воде, обсуждаются недостатки действующих в настоящее время ПДК кремния, силикатов натрия и калия в питьевой воде. Дается подробный обзор исследований, проведённых в кремниевых биогеохимических провинциях Чувашской Республики, где у жителей зоны экологического бедствия, употреблявших питьевую воду с глубоким дисбалансом макро- и микроэлементов и повышенным, относительно зоны оптимума, содержанием кремния, наблюдали нарушения обмена (минерального, липидного, углеводного, перекисного), микробиоценоза толстого кишечника, иммунного статуса, повышение уровней заболеваемости взрослого населения хроническими неинфекционными болезнями в 2–3 раза против среднереспубликанских, наиболее высокие показатели заболеваемости детей всех возрастных групп.

**Заключение.** Обзор привлекает внимание к необходимости расширенных исследований действия на организм природного кремния питьевой воды с обычным балансом микроэлементов для решения вопросов о нормативах природного кремния на федеральном и региональном уровнях и об установлении дифференцированных нормативов кремнийсодержащих реагентов в питьевой воде.

**Ключевые слова:** природный кремний; питьевая вода; кремниевые биогеохимические провинции; гигиенические нормативы

**Для цитирования:** 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): 1077–1083. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083>

**Для корреспонденции:** Егорова Наталья Александровна, доктор мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены окружающей среды, НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды ФГБУ «ЦСП» ФМБА России. 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 28.07.2021 / Принята к печати 28.09.2021 / Опубликована 31.10.2021

Yurii A. Rakhmanin, Natalija A. Egorova, Rufina I. Mikhailova, Irina N. Ryzhova,  
Marina G. Kochetkova

## On the hygienic rating of silicon compounds in drinking water (literature review)

Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal Medical Biological Agency, Moscow,  
119121, Russian Federation

**Introduction.** Silicon is a unique element in its physicochemical properties, almost ubiquitous in water supply sources but is not normalized in drinking water in the world practice of ensuring the harmlessness of water use of the population. In our country, the half-century history of the development of hygienic silicon standards in the water began with the justification of the MPC of silicon-containing reagents used in water treatment. However, over time, doubts have arisen about the suitability of manufactured silicon standards for controlling natural silicon in drinking water. Proponents of the harmlessness of natural soluble forms of silicon advocated the elimination of silicon standards in water. In contrast, researchers of the action of silicon in silicon biogeochemical provinces have constantly revealed its adverse effects on the health of the population living in these regions, confirming this with animal experiments.

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

**The main part.** The review provides information on soluble forms of silicon, their stability and bioavailability, examines the retrospective and current state of hygienic rationing of silicon in water, discusses the shortcomings of the currently existing MPC of silicon, sodium and potassium silicates in drinking water. A detailed review of studies carried out in the silicon biogeochemical provinces of Chuvashia is given, where the inhabitants of the ecological disaster zone, who consumed drinking water with a profound imbalance of macro- and microelements and a high silicon content relative to the optimum area, observed various metabolic disorders (mineral, lipid, carbohydrate, peroxide), changes in microbiocenosis of the large intestine and immune status, an increase in the incidence rate of the adult population with chronic non-infectious diseases by 2–3 times against the national average, the highest incidence rates in children of all age groups.

**Conclusions.** The review draws attention to the need for expanded studies of the effect on the body of natural silicon in drinking water with the usual balance of trace elements to resolve issues about the standards for natural silicon at the federal and regional levels and to establish differentiated standards for silicon-containing reagents in drinking water.

**Keywords:** natural silicon; drinking water; silicon biogeochemical provinces; hygienic standards

**For citation:** Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Mikhailova R.I., Ryzhova I.N., Kochetkova M.G. On the hygienic rating of silicon compounds in drinking water (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(10): 1077-1083. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083> (In Russ.)

**For correspondence:** Nataliya A. Egorova, MD., PhD, DSci., leading researcher of the Environmental health department of the A.N.Sysin Research Institute of Human Ecology and Environmental Health of the Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks (Centre for Strategic Planning), Moscow, 119121, Russian Federation. E-mail: NEgorova@cspmpz.ru

**Information about the authors:**

Rakhmanin Yu.A., <https://orcid.org/0000-0003-2067-8014> Egorova N.A., <https://orcid.org/0000-0001-6751-6149> Mikhailova R.I., <https://orcid.org/0000-0001-7194-9131> Ryzhova I.N., <https://orcid.org/0000-0003-0696-5359> Kochetkova M.G., <https://orcid.org/0000-0001-9616-4517>

**Contribution:** Rakhmanin Yu.A., 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. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

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

**Acknowledgement.** The study had no sponsorship.

Received: July 28, 2021 / Accepted: September 28, 2021 / Published: October 31, 2021

## Введение

Кремний – второй после кислорода по распространённости элемент на Земле, на его долю приходится 27,2%, на долю кислорода – 45,5% массы твёрдой земной коры [1]. Кремний представляет собой четырёхвалентный металлоид, редко встречающийся в чистом виде как простое вещество из-за немедленного окисления при контакте с кислородом воздуха или водой [1, 2]. В природе кремний находится в степени окисления +4 и в форме диоксида кремния образует множество кислородных соединений – кремнезёмов, силикатов, алюмосиликатов, присутствуя почти во всех минералах Земли, горных породах, песках и глинах, граните, кварце, изумруде, полевоом шпате, серпентине, слюде, тальке, глине, асбесте, стекле [1–4]. Несмотря на малую растворимость, из-за повсеместного распространения и благодаря процессам естественного выветривания геологических формаций диоксид кремния поступает в природные воды, вследствие чего водоисточники и питьевая вода почти всегда в том или ином количестве содержат кремний [2, 5, 6].

Диоксид кремния SiO<sub>2</sub> наиболее изученное после воды химическое соединение и наиболее важное из кремнийсодержащих веществ [1, 7]. По мнению Р. Айлера, «насколько вода является уникальной жидкостью, настолько и аморфный кремнезём уникален как твёрдое вещество». Очевидно, благодаря этому неординарному и сложному процессу растворения кремнезёма (диоксида кремния) в воде [8].

Формально диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>) представляет собой кремниевый ангидрид, который при избытке воды подвергается гидролизу в химической реакции



с образованием мономерной ортокремниевой кислоты (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>), растворимой и стабильной в воде только при значительном разбавлении [7]. Как мономер она сохраняется в воде достаточно длительное время, пока её концентрация остаётся ниже 2 мМ [2, 8]. Растворимость ортокремниевой кислоты в воде зависит от pH, температуры и химического состава воды. По имеющимся данным, максимальная растворимость в воде недиссоциированной ортокремниевой кислоты при pH 7,0–8,0 и температуре 25 °C составляет 100–200 мг/л. При pH 9,0 кислота диссоциирует с образованием анионов (HO)<sub>3</sub>SiO<sup>-</sup>, а при более высоких pH – (OH)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub><sup>2-</sup> [8, 9]. Одновременно в водных растворах могут присутствовать и другие низкомолекулярные гидратированные формы ортокремниевой кислоты, в том числе метакремниевая кислота (H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), низкомолекулярные олигомеры – дикремниевая кислота (H<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) и трикремниевая кислота (H<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>7</sub>), а также их гидратированные формы – пентагидрокремниевая [H<sub>10</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>9</sub>] и пирокремниевая [H<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>] кислоты [1, 2, 7, 10]. Низкомолекулярные олиго-

мерные формы ортокремниевой кислоты нестабильны, с течением времени при увеличении концентрации кремния и снижении pH в зависимости от температуры и солевого состава раствора происходит их дальнейшая конденсация и сшивка с формированием цепочек поликремниевых кислот переменного состава и сложной структуры. В итоге полимеризации в воде образуются коллоиды и гели (коллоидная кремниевая кислота, силикагель, или аморфный диоксид кремния) [1, 2, 6, 7, 11].

Процесс превращения ортокремниевой кислоты в её полимерные формы не является однонаправленным и окончательным и протекает различно в зависимости от экологических условий водной среды. В кислых природных водах, содержащих избыток ионов тяжёлых металлов, и при низких температурах поликремниевые кислоты способны существовать как метастабильный промежуточный компонент в течение нескольких месяцев. Но большая часть речных и грунтовых вод имеют физико-химические свойства, благоприятствующие их быстрой деполимеризации. В средне-статистической речной воде 50% полимеров кремниевой кислоты распадаются до мономера в течение ~ 30 мин. В результате в большинстве природных вод присутствует главным образом мономерная форма кремниевой кислоты – ортокремниевая кислота [10, 12, 13]. Например, по данным исследований М.Г. Камбаиной и соавт., в природных водах 53–75% составляли монокремниевые и 25–47% – поликремниевые кислоты [6].

Ввиду того что сравнительная растворимость в воде, абсорбция в желудочно-кишечном тракте и биодоступность различных форм кремниевой кислоты остаются недостаточно изученными, наибольшее внимание в отношении влияния на здоровье сосредоточивается на ортокремниевой кислоте, поскольку, по имеющимся данным, именно эта форма преимущественно усваивается в организме. В исследовании небольшой группы добровольцев (3 мужчин и 2 женщины) мономерная форма кислоты легко абсорбировалась из питьевой воды в желудочно-кишечном тракте, и через 8 ч 53% её общей дозы выводилось из организма с мочой, в то время как олигомерная форма практически не усваивалась и с мочой не выводилась [14]. Помимо ортокремниевой кислоты биодоступные формы кремния представляют собой и водорастворимые силикаты (например, силикаты натрия и калия), из которых в разбавленных водных растворах при контакте с соляной кислотой желудка высвобождается ортокремниевая кислота. В исследовании с меченым силикатом аммония 36% кремния из выпитой воды абсорбировалось в желудочно-кишечном тракте испытуемых и полностью выводилось с мочой в течение 48 ч наблюдения [7, 15].

Становится понятным, что при оценке биологических эффектов кремния, содержащегося в питьевой воде, следует учитывать, в каких формах растворимой кремниевой кисло-

ты кремний поступает в организм — мономерной, олигомерной, полимерной, — биодоступность и, следовательно, вероятность благоприятного или негативного действия которых могут меняться от максимальных до практически нулевых значений.

## Нормирование содержания кремния в питьевой воде

Распространённость в природе, наличие растворимых и биодоступных химических форм кремния, легко и быстро поступающих через желудочно-кишечный тракт в кровь, не могли не привлечь внимания научного сообщества, хотя первоначально элемент в растворённом состоянии считали биологически инертным [16]. За рубежом изучение биологического действия кремния, поступающего с пищевыми продуктами, питьевой водой и пищевыми добавками, главным образом идёт в направлении положительных эффектов элемента и его возможной, но до конца не доказанной эссенциальности. Широко обсуждается в научной литературе, в том числе и русскоязычной, роль кремния в предупреждении остеопороза, болезни Альцгеймера, атеросклероза, рассеянного склероза, диабета, его влияние на остеогенез, состояние соединительной и костной тканей, здоровье кожи и волос, скорость заживления ран [2, 4, 7, 16–19]. При этом проблема регламентирования содержания кремния в питьевой воде за рубежом не существует вообще. Только в Руководстве по качеству питьевой воды Австралии есть норматив содержания двуокиси кремния в питьевой воде не более 80 мг/л чисто технологического назначения — для предотвращения осаждения двуокиси кремния на стеклянных и металлических поверхностях, отложения силикатов на поверхностях мембран с нарушением работы систем обратного осмоса и ион-обменных процессов при водоподготовке. Никаких рекомендаций по гигиеническому нормированию двуокиси кремния не приводится из-за отсутствия данных, связывающих его присутствие в питьевой воде с неблагоприятными последствиями для здоровья [20].

В нашей стране вопрос о гигиеническом нормировании в воде кремния возник более 50 лет назад в связи с введением в практику водоподготовки кремнийсодержащих реагентов — активированной кремниевой кислоты в целях повышения эффективности процессов флокуляции и силиката натрия для антикоррозионной обработки трубопроводов и ёмкостей в системах горячего водоснабжения. Эти реагенты взаимосвязаны по химическому составу, поскольку активированная (активная) кремниевая кислота (АК) представляет собой коллоидный водный раствор кремниевых кислот и их труднорастворимых солей, получаемых частичной или полной нейтрализацией щёлочности силиката натрия (жидкого стекла) при воздействии активатора (серная кислота, сульфат алюминия, хлор, гидрокарбонат или гидросульфат натрия).

В 1972 году С.А. Шиган и Б.Р. Витвицкая провели исследования для оценки токсичности активированной кремниевой кислоты и силиката натрия и обоснования их гигиенических нормативов в питьевой воде в хроническом 5-месячном опыте на двух видах животных (белых крысах и морских свинках) и определили максимальную недеятельную дозу реагентов на уровне 2 мг/кг по изменению активности альдолазы сыворотки крови крыс и нарушению процесса выведения радиоактивного фосфора у морских свинок (по материалам Научного отчёта кафедры коммунальной гигиены 1-го МОЛМИ им. И.М. Сеченова «Гигиеническое обоснование содержания остаточных количеств активированной кремниевой кислоты и силиката натрия в питьевой воде», арх. № 315, М., 1972). На основании результатов эксперимента авторы рекомендовали ПДК активированной кремниевой кислоты и силиката натрия по санитарно-токсикологическому показателю вредности на уровне 40 мг/л (по  $\text{SiO}_2$ ). В том же 1972 году в официальный перечень ПДК вредных веществ в воде водоёмов санитарно-бытового водополь-

зования был включён норматив силиката натрия 50 мг/л (по  $\text{SiO}_3^{2-}$ ) по санитарно-токсикологическому признаку вредности<sup>1</sup>.

В 1976 году был введён в действие норматив кремниевой кислоты активированной — 50 мг/л по санитарно-токсикологическому признаку вредности. Затем, с 1980 года и по настоящее время, в нормативных документах водно-санитарного законодательства приводилась ПДК кремния 10 мг/л (по Si), класс опасности 2, показатель вредности санитарно-токсикологический, без конкретных указаний, для контроля присутствия в воде какого именно кремния, используемого в составе реагентов или природного, предназначен этот норматив. Кроме того, продолжали действовать ПДК силикатов натрия и калия на уровне 30 мг/л (по  $\text{SiO}_3$ ), которые в пересчёте на кремний составляли 11 мг/л и почти совпадали с ПДК кремния по Si.

С 1 марта 2021 г. вступил в силу новый нормативный документ, в котором гигиенический норматив кремния в воде изменён ещё раз: кремний (Si, суммарно) при жёсткости воды до 2,5 мг-экв/л — 25 мг/л, при жёсткости воды более 2,5 мг-экв/л — 20 мг/л<sup>2</sup>. Что послужило основанием для повышения ПДК кремния в воде с 10 до 25 и 20 мг/л в зависимости от жёсткости воды, установить не представляется возможным. Предположительно ориентиром послужила работа Г.Н. Метельской и соавт., в которой авторы пришли к выводу о безвредности 12,5 мг/л кремния в воде с жёсткостью от 2,5 до 7 мг-экв/л и 25 мг/л кремния при жёсткости воды не более 2,5 мг-экв/л [21]. В новом документе сохранены без изменения ПДК силиката калия (по  $\text{SiO}_3$ ) — 30 мг/л и силиката натрия (по  $\text{SiO}_3$ ) — 30 мг/л, что соответствует 11 мг/л Si, ПДК активированной кремниевой кислоты в документе не включена вообще. Никаких указаний о порядке практического использования нормативов кремния, силикатов натрия и калия при контроле качества воды не дано, не конкретизируется, в какой степени упомянутые нормативные величины имеют отношение к природным соединениям кремния и к реагентам, используемым в водоснабжении, и какие аналитические методы рекомендуются для их контроля в воде. Если же не проводить раздельное определение природного кремния, силикатов натрия и калия, ПДК кремния (Si, суммарно) утрачивает смысл, поскольку необходимость соблюдения ПДК силикатов на уровне 11 мг/л в пересчёте на кремний делает норматив кремния 20–25 мг/л санитарным нарушением с превышением безвредного уровня в 1,8–2,3 раза для вещества 2-го класса опасности, что является недопустимым. Подобные нестыковки (неопределённости) в новом нормативном документе крайне затрудняют контроль безвредности для здоровья населения содержания кремния, силикатов натрия и калия и активированной кремниевой кислоты в питьевой воде.

## Разногласия в оценках опасности содержания кремния в питьевой воде

Два аспекта присутствия кремния в питьевой воде служат предметом многолетних разногласий.

1. Первый аспект касается сомнений в правомерности использования нормативов, установленных для кремния в составе реагентов, специально вносимых в воду при водоподготовке (неприродного кремния антропогенного или техногенного происхождения) для контроля природных

<sup>1</sup> Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоёмов санитарно-бытового водопользования и требования к составу и свойствам воды водоёмов у пунктов питьевого и культурно-бытового водопользования (утв. Минздравом СССР 28 декабря 1972 г. № 1003-72).

<sup>2</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

растворимых соединений кремния естественного происхождения, постоянно в тех или иных количествах присутствующих в воде водоисточников. На спорность таких действий справедливо указывали многие авторы (В.А. Алексеев и соавт., 2011; В.Т. Мазаев, Т.Г. Шлепнина, 2011; А.В. Тулакин и соавт., 2017; А.В. Мокиенко, 2020), подчёркивая отсутствие специальных исследований для обоснования гигиенического норматива природного кремния в питьевой воде и недостаточную обоснованность действовавших ПДК кремния, кремнекислот и силикатов как реагентов, высказывая мнение о целесообразности их аннулирования. Поскольку в мировой практике обеспечения благоприятных условий водопользования населения в современных нормативных базах ВОЗ, ЕС, Японии, Канады, США и других стран гигиенический норматив природного кремния в питьевой воде отсутствует и нет достоверных данных о токсичности его растворимых форм, то нет необходимости регламентирования его содержания в питьевой воде в РФ [22–27].

2. Второй аспект сосредоточивает внимание на неблагоприятном действии природного кремния уже в концентрациях, близких к 10 мг/л, и подчёркивает возможную сопряжённость присутствия кремния в питьевой воде на таком уровне с краевой (географическая) патологией у населения в кремниевых биогеохимических провинциях [28–31]. Исследованию неблагоприятных эффектов кремния в биогеохимических провинциях посвящено достаточное количество работ как с наблюдениями на людях, так и с экспериментами на животных.

## Результаты наблюдения за состоянием здоровья людей в регионах с повышенным содержанием кремния в питьевой воде

Большая часть исследований выполнена в рамках выявления причинно-следственных связей между уровнями содержания макро- и микроэлементов в питьевой воде и заболеваемостью населения эколого-биогеохимических зон Чувашской Республики с особым вниманием к зоне экологического бедствия (Присурский субрегион) с природным относительно высоким содержанием кремния в питьевой воде и выраженным дисбалансом макро- и микроэлементного состава водно-пищевой цепи. На присутствие в питьевой воде повышенных концентраций кремния в кремниевом субрегионе и связь их с нарушениями в минеральном, липидном, углеводном, перекисном обменах указывал С.П. Сапожников, отмечая при этом «наиболее высокий риск заболеваемости острым инфарктом миокарда, мочекаменной болезнью, трийодтирониновым токсикозом, инсулинозависимым диабетом и другими хроническими неинфекционными заболеваниями» [32]. В работах Н.В. Толмачевой показано, что в зоне экологического бедствия ( $14,5 \pm 0,37$  мг/л Si в питьевой воде) уровни заболеваемости взрослого населения хроническими неинфекционными болезнями в 2–3 раза выше среднереспубликанских. В этой зоне отмечалась наиболее высокая частота заболеваний сердечно-сосудистой системы (в том числе ишемической болезни сердца), смертность от инфаркта миокарда была более чем в 3 раза выше республиканской, а для полностью здоровых жителей были характерны нарушения липидного обмена, микробиоценоза толстого кишечника с дисбактериозом разной выраженности, иммунного статуса с проявлениями гиперадаптоза, углеводного обмена (по тесту толерантности к глюкозе и уровням иммунореактивного инсулина), сверхнизкая рождаемость, коэффициент смертности, превышающий средний по республике [33–39]. В зоне бедствия зафиксированы большая частота инсультов, артериальной гипертензии и сахарного диабета [40–42], большая распространённость изменений стенки аорты, указывающая на ускорение атеросклеротических процессов [43], заболеваемость язвенной болезнью желудка, в 2 раза превышающая среднереспубликанские значения [31], отмечались также высокая

смертность женщин от рака тела матки [44], высокие уровни частоты анемий у беременных женщин и у новорождённых детей [45], наиболее высокая распространённость рассеянного склероза [46].

Характерными для зоны бедствия оказались наиболее высокие показатели заболеваемости детей всех возрастных групп (особенно подростков) при сильной прямой корреляционной связи с содержанием кремния в питьевой воде,  $r = 0,89$  [47]. В Присурском субрегионе наблюдались особенности патологии почек у детей: пиелонефрит фиксировался в более раннем возрасте, сопровождался выраженным дизурическим синдромом, дисметаболическими сдвигами и быстрым снижением функции почек, прослеживалась тесная корреляция почечной недостаточности с повышенным содержанием в водно-пищевом рационе кремния  $r = 0,99$ ,  $p < 0,05$  [48]. В то же время у жителей зоны экологического бедствия были обнаружены и позитивные эффекты в заболеваемости: распространённость врождённых пороков развития почек у детей была наименьшей [49], в 1,8–2,7 раза реже встречался гипотиреоз у новорождённых детей [50], наблюдалась наиболее высокая иммунная реактивность и низкий уровень бронхолегочной патологии [51].

Изменения в состоянии здоровья населения в зоне экологического бедствия (Присурский субрегион) оценивали в сравнении с состоянием здоровья жителей зоны оптимума Чувашской Республики (Ибресинский, Вурнарский, Комсомольский, Батыревский районы). При этом все неблагоприятные эффекты связывали не только с повышенным содержанием в воде кремния, но и с «аномально-нерегулируемым содержанием и соотношением микроэлементов за счёт природного избытка Si, F, Ca» в водно-пищевом рационе [32, 34]. Сформировалась представление о развитии у жителей зоны бедствия хронического биогеохимического стресса, сопровождающегося геохимическим дисбиозом и представляющего собой один из триггеров, запускающих предпатологические и патологические изменения в организме, приводящие к выявленному повышению заболеваемости из-за нарушений клеточного и гуморального гомеостаза [31, 35, 39, 43]. Зону эколого-биогеохимического оптимума выделили по оптимальным, физиологическим содержаниям и соотношениям макро- и микроэлементов в водно-пищевых рационах жителей Чувашии. В этой зоне наблюдали самые низкие показатели общей заболеваемости, инвалидизации и смертности населения при наибольшем количестве долгожителей старше 90 лет [33–35, 52]. Средняя концентрация кремния в питьевой воде в зоне оптимума фиксировалась на уровне  $3,33 \pm 0,65$  мг/л. По мнению Н.В. Толмачевой, «фактические средние концентрации макро- и микроэлементов в пределах  $\pm 2\sigma$  в источниках питьевого водоснабжения», «полученные в зоне эколого-биогеохимического оптимума, можно рекомендовать к гигиеническому нормированию в качестве оптимальных концентраций с расчётом их оптимальных соотношений» [34].

В зарубежной научной литературе удалось найти лишь отдельные публикации о возможном неблагоприятном действии на человека кремния, присутствующего в питьевой воде. В исследованиях, проводившихся в районе Сапасона (Индия) с целью обнаружения причин хронических заболеваний почек невыясненной этиологии, у жителей, потреблявших питьевую воду с высоким содержанием кремния, выявлены повышенные уровни мочевины в сыворотке, креатинина и мочевой кислоты, которые рассматриваются как биомаркеры хронического тубуло-интерстициального нефрита, в связи с чем было высказано предположение о прямом нефротоксическом действии кремния. Однако помимо кремния (115,5 мг/л) в воде был обнаружен свинец (9,98 мкг/л), действительно обладающий нефротоксическим действием. Поэтому на вопрос о связи нарушений функций почек у жителей исследованного района Индии именно с присутствием кремния в питьевой воде однозначно ответить не удалось [53, 54].

## Изучение действия кремния, содержащегося в питьевой воде, в экспериментах на животных

Ряд экспериментальных исследований на животных выполнен для подтверждения данных, полученных в наблюдениях за состоянием здоровья людей, проживающих в кремниевых биогеохимических провинциях. С этой целью опытные группы белых крыс получали для питья природную воду из источников водоснабжения населённых пунктов зоны бедствия кремниевой биогеохимической провинции Чувашской Республики (концентрации кремния 11,6–16,5 мг/л), контрольные животные пили воду из населённых пунктов зоны оптимума (2,6–3,3 Si). Продолжительность экспериментов составляла 5–12 мес. В опытных группах у животных выявлены следующие изменения: нарушение репродуктивной функции – выраженное прогрессивное снижение рождаемости в IV, V и VI поколениях при слабой жизнеспособности потомства, с различиями рождаемости в группах контрольных и опытных животных до 2,5 раза [33]; нарушения микроэлементного гомеостаза в сочетании с ростом кровяного давления [33]; изменения в липидном обмене с увеличением уровней общего холестерина, липопротеидов низкой плотности, малонового диальдегида и индекса атерогенности [29, 33, 36]; глубокие негативные изменения микрофлоры толстого кишечника с отсутствием лактобактерий, снижением количества бифидобактерий и появлением патогенных микроорганизмов – гемолитических стафилококков в сочетании с нарушением микроэлементного гомеостаза у животных опытных групп [33, 35, 38, 39]; изменения структуры аорты [43]; активизация процессов свободнорадикального окисления, нарушения минерального обмена [32, 33]; предпатологические нарушения углеводного обмена [36].

Второе направление экспериментальных исследований связано с изучением действия на организм животных кремния, специально вносимого в питьевую воду в виде силиката натрия. Объектом моделирования действия кремния являлись белые беспородные крысы-самцы массой 150–200 г. Длительность опытов составляла 2–9 мес. Контрольные животные получали исходную питьевую воду, опытные животные – ту же воду с добавлением метасиликата натрия в концентрации 10 мг/л в расчёте на кремний. Дозы кремния по представленным данным составляли 0,4–0,6 мг/кг массы животных. В экспериментах выявлены структурно-функциональные изменения лимфоидных тканей тимуса, селезёнки и тонкого кишечника [55–57], а также изменения в тучных клетках тимуса [58, 59]. В опытах на белых мышах-самцах, получавших с питьевой водой метасиликат натрия в концентрации 10 мг/л (по кремнию), обнаружены морфологические изменения ткани почек с уменьшением размеров почечных клубочков без изменения размеров почечных телец [60].

В Турции в кратковременных 8-дневных опытах на крысах, получавших питьевую воду, содержащую 50 мг/л метасиликата натрия, изучали действие кремния на ха-

рактеристики эндотелиальной дилатации в срезах аорты и митохондриальные функции в клетках проксимальных канальцев в срезах коры почек и в изолированных митохондриях. Результаты показали, что кремний изменял характеристики эндотелиальных релаксантов и ослаблял реакцию гладкомышечных клеток аорты на окись азота (NO) [61]. В коре почек кремний увеличивал как внеклеточный, так и внутриклеточный аммонийгенез, повышая использование кислорода митохондриями [62].

## Заключение

Кремний – уникальный по своим физико-химическим свойствам элемент, практически повсеместно распространённый в источниках водоснабжения и тем не менее не нормируемый в питьевой воде в мировой практике обеспечения безвредности водопользования населения. В нашей стране полувековая история разработки гигиенических нормативов кремния в воде началась с обоснования ПДК кремнийсодержащих реагентов, применяемых при водоподготовке. Однако с течением времени возникли сомнения в пригодности нормативов техногенного кремния для контроля природных соединений элемента в питьевой воде.

Сторонники безвредности природных растворимых форм кремния, поступающих в организм с питьевой водой, высказывались за полную ликвидацию нормативов кремния в воде, в то время как исследователи действия кремния в сочетании с глубоким дисбалансом макро- и микроэлементов в питьевой воде в кремниевых биогеохимических провинциях постоянно выявляли его негативные эффекты как в состоянии здоровья проживающего в этих регионах населения, так и в экспериментах на животных. Проблема не завершена и в настоящее время из-за недостатка надёжных данных о растворимости, биодоступности, возможной токсичности разных форм кремния и их действительного присутствия в питьевой воде, используемой населением.

Нуждается в дополнительных расширенных исследованиях действие на организм человека природного кремния при его разных концентрациях в питьевой воде с обычным балансом микроэлементов.

Необходимы научные данные об идентичности или неоднозначности влияния природного кремния и реагентов – активированной кремниевой кислоты, силикатов натрия и калия – на качество питьевой воды.

В зависимости от результатов таких исследований может быть решён вопрос о дифференцированном нормировании природного и техногенного кремния или о полном отказе от нормирования природного кремния в питьевой воде.

Следует также рассмотреть возможность установления региональных нормативов кремния в отдельных районах кремниевой биогеохимической провинции Чувашской Республики с учётом особенностей микроэлементного состава источников водоснабжения и подтверждения их связи с нарушениями здоровья местного населения.

## Литература

(п.п. 2, 3, 7, 9, 12, 14–18, 20, 53, 54, 61, 62 см. References)

- Гринвуд Н., Эрншо А. *Химия элементов. Том 1*. Пер. с англ. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний; 2008.
- 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 Пензенского государственного университета*. 2017; (2): 95–102.
- Камбалина М.Г., Пикула Н.П. Атомно-абсорбционное определение содержания кремния в природных водах. *Известия Томского политехнического университета*. 2012; 320(3): 120–4.
- Камбалина М.Г., Скворцова Л.Н., Мазурова И.С., Гусева Н.В., Бакибаев А.А. Исследование форм нахождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ. *Известия Томского политехнического университета*. 2014; 325(3): 64–70.
- Айлер Р. *Химия кремнезёма. Растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия*. Пер. с английского. М.: Мир, 1982.
- 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 обескремнивания. *Известия Томского политехнического университета*. 2013; 323(3): 18–22.
- Бекбулатова И.А., Скворцова Л.Н., Щёголева И.С. Определение кремния в природных водах спектрофотометрическим методом с применением современных способов пробоподготовки. *Известия Томского политехнического университета*. 2017; 328(7): 32–9.
- Камбалина М.Г., Пикула Н.П., Гусева Н.В. Выбор метода определения концентрации кремния в природных водах разных типов. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2014; 57(11): 15–8.
- Мансурова Л.А., Федчишин О.В., Трофимов В.В., Зеленина Т.Г., Смолянюк Л.Е. Физиологическая роль кремния. *Сибирский медицинский журнал*. 2009; 90(7): 16–8.

21. Метельская Г.Н., Новиков Ю.В., Плитман С.И., Ласточкина К.О., Хвастунов Р.М., Зайцева Е.П. О нормировании кремния в питьевой воде. *Гигиена и санитария*. 1987; (8): 19–21.
22. Алексеев В.С., Болдырев К.А., Тесля В.Г. О необходимости пересмотра нормативного содержания кремния в питьевой воде. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2011; (5): 56–60.
23. Мазаев В.Т., Шлепнина Т.Г. Оценка степени санитарной опасности соединений кремния в природной и питьевой воде (в порядке обсуждения). *Водоснабжение и санитарная техника*. 2011; (7): 13–20.
24. Тулакин А.В., Плитман С.И., Амплеева Г.П., Пивнева О.С. К вопросу о гигиеническом нормировании кремния в питьевой воде. *Санитарный врач*. 2017; (12): 44–7.
25. Мокиенко А.В. Кремний в воде: от токсичности к эссенциальности. *Вісник морської медицини*. 2020; 4(89): 136–43.
26. 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>
27. Рахманин Ю.А., Красовский Г.Н., Егорова Н.А., Михайлова Р.И. 100 лет законодательного регулирования качества питьевой воды. Ретроспектива, современное состояние и перспективы. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(2): 5–18.
28. Сусликов В.П. Современные проблемы и перспективы медицинской микробиологии. *Микроэлементы в медицине*. 2000; 1(1): 9–15.
29. Сапожников С.П., Голенков А.В. Роль биогеохимических факторов в развитии краевой патологии. Краткое сообщение. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 70–2.
30. Сапожников С.П., Гордова В.С. Роль соединений кремния в развитии аутоиммунных процессов (обзор). *Микроэлементы в медицине*. 2013; 14(3): 3–13.
31. Леженина С.В. Эпидемиология язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки на территории Чувашской Республики. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 66–9.
32. Сапожников С.П. Влияние эколого-биогеохимических факторов среды обитания на функциональное состояние и здоровье населения Чувашии. Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. М.; 2001.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Степанов Р.В., Сусликов В.Л. К вопросу о влиянии биогеохимических факторов на липидный и углеводный обмены. *Здоровье и образование в XXI веке*. 2007; 9(3): 245–9.
37. Винокур Т.Ю., Сусликов В.Л. Сравнительная характеристика содержания микроэлементов в суточных рационах питания населения различных эколого-биогеохимических зон проживания в связи с риском ишемической болезни сердца. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2006; (12S): 55–8.
38. Сусликов В.Л., Толмачева Н.В., Ефейкина Н.Б. Особенности колонизационной резистентности микрофлоры кишечника в различных эколого-биогеохимических условиях постоянного проживания на территории Чувашской республики. *Медицинский альманах*. 2009; (2): 127–31.
39. Степанов Р.В., Карзакова Л.М., Кузюкинова Г.Э. Микроэкология как модулятор иммунной системы в процессах адаптации. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*. 2008; (8): 297–302.
40. Винокур Т.Ю., Петрова Д.Г., Сусликов В.Л. Особенности течения ишемической болезни сердца у больных, проживающих в различных эколого-биогеохимических зонах Чувашии. *Образовательный вестник «Сознание»*. 2007; 9(4): 151.
41. Винокур Т.Ю. К вопросу об особенностях течения ишемической болезни сердца в связи с эколого-биогеохимическим районированием Чувашии. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 10–4.
42. Маслова Ж.В. Эколого-биогеохимические закономерности распространения артериальной гипертензии на территории некоторых субрегионов Чувашии. *Образовательный вестник «Сознание»*. 2006; 8(10): 495–6.
43. Степанов Р.В., Кочаков В.Д., Юсов А.А. Морфологическая характеристика аорты погибших при автомобильной катастрофе жителей двух биогеохимических провинций Чувашской Республики, и элементно-морфологические особенности аорты животных в условиях экспериментального моделирования. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*. 2008; (8): 487–8.
44. Антипова М.В. К вопросу о влиянии эколого-биохимических факторов в развитии онкогинекологической патологии. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 60–2.
45. Демьянова В.Н., Сусликов В.Л., Мальцев С.В. Состояние здоровья новорожденных на различных эколого-биогеохимических территориях Чувашской Республики. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 20–3.
46. Шаров Д.А. Клинико-эпидемиологическая характеристика рассеянного склероза в Чувашской Республике. Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. М.; 2004.
47. Родионов В.А. Здоровье детского населения в различных эколого-биогеохимических зонах Чувашской Республики. Автореф. дисс. ... д-ра. мед. наук. Нижний Новгород; 2001.
48. Иванова И.Е. Комплексное клинико-организационное исследование патологии почек у детей на территории эколого-биогеохимического риска. Автореф. дисс. ... д-ра. мед. наук. Казань; 2011.
49. Трефилов А.А. Врожденные пороки и малые аномалии развития почек у детей различных биогеохимических регионов. Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. М.; 2007.
50. Демьянова В.Н. Неонатальный скрининг на врожденный гипотиреоз в различных эколого-биогеохимических зонах Чувашской Республики. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 63–5.
51. Воронова Г.В. Бронхолегочная патология на территории Чувашской Республики и ее связь с микроэлементами. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 15–9.
52. Сусликов В.Л., Толмачева Н.В., Родионов В.А., Демьянова В.Н. О критериях оценки обеспеченности организма человека атомовитами. *Микроэлементы в медицине*. 2001; 2(3): 2–9.
53. Дьячкова И.М., Сергеева В.Е., Сапожников С.П. Структурно-функциональное состояние тимуса лабораторных крыс, употребляющих питьевую воду с добавлением соединений кальция и кремния. *Здравоохранение Чувашии*. 2011; (3): 48–52.
54. Гордова В.С., Сергеева В.Е., Карышев П.Б. Гистаминсодержащие клетки пейеровых бляшек и прилежащих к ним ворсин кишечника лабораторных крыс в хронических экспериментах с поступлением солей кремния с питьевой водой. *Медицинская иммунология*. 2015; 17(5): 21.
55. Гордова В.С., Сергеева В.Е., Коршунова А.И., Григорьева Е.А., Голенкова В.А., Смирнова С.С. и соавт. Гистаминсодержащие клетки лимфоидных органов лабораторных грызунов в эксперименте. *Вестник новых медицинских технологий*. 2018; 25(3): 107–15. <https://doi.org/10.24411/1609-2163-2018-16120>
56. Дьячкова И.М., Сергеева В.Е., Сапожников С.П. Исследование популяции тучных клеток тимуса при длительном воздействии кремния и кальция. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева*. 2010; (4): 50–5.
57. Гордова В.С., Иванова Е.П., Сергеева В.Е. Тучные клетки при окраске толуидиновым синим в эксперименте. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2018; (2): 97–104.
58. Гордова В.С., Прохорова А.И., Сергеева В.Е. Морфологические особенности почечных телец лабораторных мышей в эксперименте с водорастворимым соединением кремния. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2017; (3): 50–7.

## References

1. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1997.
2. Martin K.R. Silicon: The Health Benefits of a Metalloid. Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases. *Met. Ions Life Sci*. 2013; 13: 451–73. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_14)
3. Martin K.R. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J. Nutr. Health Aging*. 2007; 11(2): 94–7.
4. 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)
5. Kambalina M.G., Pikula N.P. Atomic absorption determination of silicon content in natural waters. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012; 320(3): 120–4. (in Russian)
6. Kambalina M.G., Skvortsova L.N., Mazurova I.S., Guseva N.V., Bakibaev A.A. Research of the silicon aqueous forms in organic-rich natural water. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2014; 325(3): 64–70. (in Russian)
7. Jurkić L.M., Capanec 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. Review. *Nutr. Metab. (Lond.)* 2013; 10(1): 2. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-10-2>
8. Iler R.K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica*. New York: John Wiley & Sons; 1979.
9. Demadis K.D. To avoid silica-scale problems in cooling towers, plant personnel turn to unconventional method. In: *Water Treatment's Gordian Knot*. Available at: <https://www.chemistry.uoc.gr/demadis/pdfs/3-Gordian%20knot-Silica.pdf>
10. Kambalina 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)
11. Bekbulatova I.A., Skvortsova L.N., Shchegoleva I.S. Determination of silicon in natural waters by spectrophotometry using modern methods of sample

## Review article

- preparation. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2017; 328(7): 32–9. (in Russian)
12. Dietzel M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. *Geochem. Cosmochim. Acta*. 2000; 64(19): 3275–81.
  13. Kambalina 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 vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2014; 57(11): 15–8. (in Russian)
  14. Jugdaohsingh R., Reffitt D.M., Oldham C., Day J.P., Fifield L.K., Thompson R.P., et al. Oligomeric but not monomeric silica prevents aluminum absorption in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 2000; 71(4): 944–9. <https://doi.org/10.1093/ajcn/71.4.944>
  15. Popplewell J.F., King S.J., Day J.P., Ackrill P., Fifield L.K., Cresswell R.G., et al. Kinetics of uptake and elimination of silicic acid by a human subject: a novel application of <sup>32</sup>Si and accelerator mass spectrometry. *J. Inorg. Biochem.* 1998; 69(3): 177–80. [https://doi.org/10.1016/s0162-0134\(97\)10016-2](https://doi.org/10.1016/s0162-0134(97)10016-2)
  16. 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)
  17. Götz W., Tobiasch E., Witzleben S., Schulze M. Effects of silicon compounds on biomineralization, osteogenesis, and hard tissue formation. *Pharmaceutics*. 2019; 11(3): 117. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11030117>
  18. Zhou H., Jiao G., Dong M., Chi H., Wang H., Wu W., et al. Orthosilicic acid accelerates bone formation in human osteoblast-like cells through the PI3K-Akt-mTOR pathway. *Biol. Trace Elem. Res.* 2019; 190(2): 327–35. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1574-9>
  19. Mansurova L.A., Fedchishin O.V., Trofimov V.V., Zelenina T.G., Smolyanko L.E. Physiological role of silicon. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal*. 2009; 90(7): 16–8. (in Russian)
  20. National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council, Commonwealth of Australia, Canberra. Australian Drinking Water Guidelines. Paper 6: National Water Quality Management Strategy; 2011. Version 3.6.
  21. Metel'skaya G.N., Novikov Yu.V., Plitman S.I., Lastochkina K.O., Khvastunov R.M., Zaytseva E.P. About silicon standardization in drinking water. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 1987; 66(8): 19–21 (in Russian)
  22. Alekseev V.S., Boldyrev K.A., Teslya V.G. On the need to revise the standard silicon content in drinking water. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011; (5): 56–60. (in Russian)
  23. Mazzev V.T., Shlepnina T.G. Assessment of the sanitary hazard degree of silicon compounds in natural and potable water. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011; (7): 13–20. (in Russian)
  24. Tulakin A.V., Plitman S.I., Ampleeva G.P., Pivneva O.S. On the hygienic regulation of silicon in drinking water. *Sanitarnyy vrach*. 2017; (12): 44–7. (in Russian)
  25. Mokienco A.V. Silicon in water: from toxicity to essence. *Visnik mors'koi meditsini*. 2020; 4(89): 136–43. (in Russian)
  26. Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Krasovskiy G.N., Mikhaylova R.I., Alekseeva A.V. Silicon: its biological effects through dietary intake and hygienic standardization of its content in drinking water. A review. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(5): 492–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-492-498> (in Russian)
  27. Rakhmanin Yu.A., Krasovskiy G.N., Egorova N.A., Mikhaylova R.I. 100 years of drinking water regulation. Retrospective review, current situation and prospects. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2014; 93(2): 5–18. (in Russian)
  28. Suslikov V.P. Modern problems and prospects of medical microelementology. *Mikroelementy v meditsine*. 2000; 1(1): 9–15. (in Russian)
  29. 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)
  30. Sapozhnikov S.P., Gordova V.S. The role of silicon compounds in autoimmune processes development (A review). *Mikroelementy v meditsine*. 2013; 14(3): 3–13. (in Russian)
  31. Lezhenina S.V. Epidemiology of gastric and duodenal ulcers on the territory of Chuvashia. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 66–9. (in Russian)
  32. Sapozhnikov S.P. *The influence of ecological and biogeochemical factors of the environment on the functional state and health of the population of Chuvashia*: Diss. Moscow; 2001. (in Russian)
  33. Tolmacheva N.V. *Ecological and physiological substantiation of optimal levels of macro- and microelements in drinking water and food rations*: Diss. Moscow; 2011. (in Russian)
  34. 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)
  35. 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)
  36. Stepanov R.V., Suslikov V.L. On the question of the influence of biogeochemical factors on lipid and carbohydrate metabolism. *Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke*. 2007; 9(3): 245–9. (in Russian)
  37. Vinokur T.Yu., Suslikov V.L. Comparative characteristics of trace element content in the daily diets of the population of various ecological and biogeochemical residential zones in connection with the risk of coronary heart disease. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006; (12S): 55–8. (in Russian)
  38. Suslikov V.L., Tolmacheva N.V., Efeiykina N.B. Colonizational resistance's peculiarities of intestinal microflora in different ecologo-biogeochemical conditions of permanent residence on the territory of the Chuvash Republic. *Meditsinskiy al'manakh*. 2009; (2): 127–31. (in Russian)
  39. Stepanov R.V., Karzakova L.M., Kuyukinova G.E. Micro ecology as the modulator of the immunological system in adaptation processes. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Meditsina*. 2008; (8): 297–302. (in Russian)
  40. Vinokur T.Yu., Petrova D.G., Suslikov V.L. Features of coronary heart disease course in patients living in various ecological and biogeochemical zones of Chuvashia. *Obrazovatel'nyy vestnik «Soznanie»*. 2007; 9(4): 151. (in Russian)
  41. Vinokur T.Yu. To the peculiarities of the course of ischemia in connection with biogeochemical zoning of Chuvashia. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 10–4. (in Russian)
  42. Maslova Zh.V. Ecological and biogeochemical patterns of the spread of arterial hypertension on the territory of some subregions of Chuvashia. *Obrazovatel'nyy vestnik «Soznanie»*. 2006; 8(10): 495–6. (in Russian)
  43. Stepanov R.V., Kochakov V.D., Yusov A.A. Morphologic characteristics of aorta of two accident victims-residents of two biogeochemical regions of the Chuvash Republic, and element-morphological peculiarities of animals aorta in experimental modeling conditions. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Meditsina*. 2008; (8): 487–8. (in Russian)
  44. Antipova M.V. To the influence of ecological and biogeochemical factors on the development of oncogynaecological pathology. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 60–2. (in Russian)
  45. Demyanova V.N., Suslikov V.L., Mal'tsev S.V. Health condition of newborns in different ecologo-biogeochemical territories of Chuvashia. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 20–3. (in Russian)
  46. Sharov D.A. *Clinical and epidemiological characteristics of multiple sclerosis in the Chuvash Republic*: Diss. Moscow; 2004. (in Russian)
  47. Rodionov V.A. *The health of the children's population in various ecological and biogeochemical zones of the Chuvash Republic*: Diss. Nizhny Novgorod; 2001. 14 (in Russian)
  48. Ivanova I.E. *Comprehensive clinical and organizational study of kidney pathology in children in the territory of ecological and biogeochemical risk*: Diss. Kazan'; 2011. (in Russian)
  49. Trefilov A.A. *Congenital malformations and small anomalies of kidney development in children of various biogeochemical regions*: Diss. Moscow; 2007. (in Russian)
  50. Dem'yanova V.N. Neonatal screening on inborn hypothyreosis in different ecological and biogeochemical districts of Chuvashia. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 63–5. (in Russian)
  51. Voronova G.V. Bronchopneumonal pathology and its connection with the territory of Chuvashia. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 15–9. (in Russian)
  52. Suslikov V.L., Tolmacheva N.V., Rodionov V.A., Dem'yanova V.N. Estimation of providing the human organism with trace elements. *Mikroelementy v meditsine*. 2001; 2(3): 2–9. (in Russian)
  53. 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>
  54. Anupama Y.J., Sankarasubbaiyan S., Taduri G. Chronic kidney disease of unknown etiology: Case definition for India – a perspective. *Indian J. Nephrol.* 2020; 30(4): 236–40. [https://doi.org/10.4103/ijn.IJN\\_327\\_18](https://doi.org/10.4103/ijn.IJN_327_18)
  55. Dyachkova I.M., Sergeeva V.E., Sapozhnikov S.P. Structural and functional status of lab rats' thymus using water with calcium and silicon compounds. *Zdravookhranenie Chuvashii*. 2011; (3): 48–52. (in Russian)
  56. Gordova V.S., Sergeeva V.E., Karyshev P.B. Histamine-containing cells of Peyer's patches and adjacent intestinal villi of laboratory rats in chronic experiments with the intake of silicon salts with drinking water. *Meditsinskaya Immunologiya*. 2015; 17 (Special issue): 21. (in Russian)
  57. Gordova V.S., Sergeeva V.E., Korshunova A.I., Grigor'eva E.A., Golenkova V.A., Smirnova S.S., et al. Histamine containing cells of lymphoid organs of laboratory rodents in experiment. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. 2018; 25(3): 107–15. <https://doi.org/10.24411/1609-2163-2018-16120> (in Russian)
  58. Dyachkova I.M., Sergeeva V.E., Sapozhnikov S.P. The investigation of population of mast cells thymus under long influence of silicon and calcium. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva*. 2010; (4): 50–5. (in Russian)
  59. Gordova V.S., Ivanova E.P., Sergeeva V.E. Mast cells stained with toluidine blue in the experiment. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki*. 2018; (2): 97–104. (in Russian)
  60. Gordova V.S., Prokhorova A.I., Sergeeva V.E. The morphological features of the renal corpuscles in laboratory mice during a soluble silicon compound experiment. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki*. 2017; (3): 50–7. (in Russian)
  61. Oner G., Cirrik S., Bulbul M., Yuksel S. Dietary silica modifies the characteristics of endothelial dilation in rat aorta. *Endothelium*. 2006; 13(1): 17–23. <https://doi.org/10.1080/10623320600660045>
  62. Oner G., Cirrik S., Bakan O. Effects of silica on mitochondrial functions of the proximal tubule cells in rats. *Kidney Blood Press. Res.* 2005; 28(4): 203–10. <https://doi.org/10.1159/000086006>