

**ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ВАПИРОВ**

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии Института биологии, экологии и агротехнологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*vapirov@petsu.ru*

**ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ ФЕОКТИСТОВ**

кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института биологии, экологии и агротехнологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*feoktistov@petsu.ru*

**АНИ АРЦУНОВНА ВЕНСКОВИЧ**

инженер по охране окружающей среды сектора охраны природы северного направления Центра охраны окружающей среды, Октябрьская железная дорога (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ajdanna@yandex.ru*

**НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА ВАПИРОВА**

старший преподаватель кафедры общей химии Института биологии, экологии и агротехнологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*nadin@petsu.ru*

**К ВОПРОСУ О ПОВЕДЕНИИ КРЕМНИЯ В ПРИРОДЕ И ЕГО БИОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ**

Приведены данные по содержанию кремния в природных объектах и формам кремния в водных растворах. Проанализированы основные источники поступления кремния в организм человека и показано, что основной биодоступной формой этого элемента является ортокремниевая кислота, а различия в суточном поступлении кремния в организме определяются рационом питания. Обобщены последние данные по содержанию кремния в организме человека и его биологической роли. Кремний связан с минерализацией костей и остеопорозом, синтезом коллагена и старением кожи, состоянием волос и ногтей, а также атеросклерозом. Показан антагонизм кремния к некоторым элементам и высказано мнение о возможной роли кремния в выведении алюминия из организма. Показана необходимость уточнения санитарно-гигиенических нормативов кремния в питьевой воде.

Ключевые слова: кремний, содержание кремния в организме человека, биологическая роль кремния

Кремний по праву называют королем «неорганического» мира. По содержанию в земной коре этот элемент уступает первенство только кислороду. Содержание кремния в литосфере составляет около 30 %, а это означает, что каждый шестой атом земной оболочки толщиной в 16 километров является кремнием. В элементном состоянии кремний в природе не встречается. Наибольшее содержание в земной коре кислорода и кремния, а также большое сходство этих элементов друг к другу определяют тот факт, что соединения кремния с кислородом является основной структурной единицей кристаллического вещества земной коры.

В верхних слоях литосферы кремний накапливался в процессе выплавления. В природных соединениях кремний присутствует в степени окисления +4 и входит в состав катионной и анионной частей соединений, образуя кристаллические и аморфные разновидности кремний-кислородных соединений – кремнеземов, силикатов и алюмосиликатов в сочетании с другими

химическими соединениями. Поэтому кремний является основой множества минералов, начиная от гранитов и заканчивая горным хрусталем и другими драгоценными и полудрагоценными камнями.

В мантии концентрация кремния составляет около 19 %, базальтах – 24 %, гранитах – 32 %, а в осадочных породах – 44,03 % [5].

Содержание кремния в гидросфере в среднем составляет 5 мг/л [4]. Установлено, что в водном растворе присутствуют кремниевые кислоты ( $\text{SiO}_2 \cdot (0,5-2,0)\text{H}_2\text{O}$ ), среди которых только одна находится в мономерной форме – это ортокремниевая кислота ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). Ортокремниевая кислота относится к очень слабым кислотам:  $K_{a(1)} = 10^{-10}$ ,  $K_{a(2)} = K_{a(3)} = 10^{-12}$ . В свободном состоянии эта кислота не выделяется, так как подвергается поликонденсации. Соединяясь между собой, молекулы ортокремниевой кислоты в растворе образуют димеры, тримеры и олигомеры. В течение длительного времени хранения, а также при увеличении концентрации кремниевые

кислоты неустойчивы и легко конденсируются с образованием поликремниевых кислот. Конечный продукт представляет собой желеобразный осадок, а именно гидратированный кремнезем, который часто называют коллоидной кремниевой кислотой или гидратированным силикагелем. В результате обезвоживания гидратированного силикагеля образуется аморфный диоксид кремния [31].

Предел растворимости ортокремниевой кислоты составляет менее 2 ммоль/л. Основная часть кремния в гидросфере приходится на ортокремниевую кислоту; в небольшом количестве, особенно в морской воде, присутствуют также водорастворимые силикаты. Основным источником кремниевых кислот в природных водных растворах является природный аморфный кремнезем, растворимость которого более чем на порядок выше растворимости кварца [4], [10].

Кремний и углерод являются групповыми, типовыми и полными электронными аналогами. Эти два элемента IV группы периодической системы Д. И. Менделеева стали первоосновой двух противоположных субстанций: кремний – неживой, а углерод – живой природы. Первооснова кремния в неживой природе так доминировала в научных взглядах, что его биологическая роль длительное время не только не рассматривалась, но и отрицалась вообще. Это подкреплялось еще и тем, что среди органических производных кремния долгое время не было установлено соединений, которые бы обладали физиологической активностью. В настоящее время достоверно установлено, что кремний играет важную роль в физиологических процессах живых организмов.

Инвариантность положения кремния в периодической системе химических элементов определяет ряд его особенностей, а также отличительные характеристики этого элемента от предшественника по группе – углерода. Увеличение атомного радиуса от углерода к кремнию приводит к ослаблению у последнего  $p_{\pi}-p_{\pi}$  – перекрывания орбиталей, вследствие чего энергия связи Si-Si и длина цепей  $Si_n$  уменьшается. Вместе с этим уменьшается устойчивость кратных связей  $Si=Si$ ,  $Si\equiv Si$  и в целом способность к образованию кратных связей с другими элементами. К тому же наличие вакантных d-орбиталей кремния определяет возможность расширения его валентности и координационного числа, а также делает возможным образование химических связей по донорно-акцепторному механизму. Все эти особенности должны сказаться на физиологических функциях кремния как биогенного элемента.

#### ИСТОЧНИКИ КРЕМНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗМА

Ежедневная рекомендованная доза кремния для организма человека не определена, вместе с тем принято считать, что она должна быть на уровне 20–30 мг, что соответствует 0,28–0,43 мг

на  $kg^{-1}$  массой тела человека в 70 кг. Методическими рекомендациями МР 2.3.1.2432-08 «Рациональное питание. Нормы потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» впервые установлен рекомендованный уровень потребления кремния, который для взрослых составляет 30 мг в сутки. Что же касается верхнего предела потребления кремния, то в этом документе он отсутствует.

Источниками кремния для организма человека являются вода, продукты питания, воздух, биологические добавки и лекарственные препараты.

Концентрация кремния в питьевых источниках может очень сильно отличаться и определяется особенностями водоносного горизонта [6], [35]. Источником кремния в природных водах являются подвергающиеся выветриванию горные породы и минералы почвы. В [3] приводятся данные, что среднее содержание кремния в речных водах составляет 13,1 мг/л, в речной воде, соприкасающейся с вулканическими туфами, концентрация  $SiO_2$  достигает 50 мг/л. Очень сильно концентрация кремния варьирует в озерной воде и в большинстве случаев содержание  $SiO_2$  укладывается в пределах 1–15 мг/л, однако в озерах центральной Америки эта величина достигает 50 мг/л.

Содержание кремния в питьевой воде в Российской Федерации регламентировано и составляет 10 мг/л. В 80 % водоемов Республики Карелия содержание растворенного в воде кремния изменяется от  $< 0,1$  до 2,2 мг/л. Минимальная концентрация кремния присутствует в озерах с преобладанием атмосферного питания [11]. На территории Чувашской Республики выявлены «кремниевые» провинции с содержанием кремния в природных водах более 20 мг/л [12]. Некоторые минеральные воды содержат достаточно много кремния. Так, в минеральной воде «Боржом» его содержание составляет 46 мг/л, а в минеральных водах Абхазии и Южной Осетии – 58 мг/л и 66 мг/л соответственно [3]. Неравномерное распределение кремния в питьевой воде наблюдается в Англии, где южные провинции характеризуются высоким, а северные низким содержанием этого элемента [26]. Минеральные воды кремниевых источников острова Фиджи содержат 86 мг/л кремния [30], высоким содержанием кремния отличается и минеральная вода «Джермук» (Армения), концентрация кремния в которой доходит до 112 мг/л. В природных терминальных источниках содержание кремния достигает 200 мг/л [6].

Вино и пиво также богаты кремнием, который находится в них в биодоступной форме в составе ортокремниевой кислоты.

Приведенные данные указывают не только на различные концентрации кремния в воде, но, учитывая, что в водных растворах устанавлива-

ется динамическое равновесие между мономерными, олигомерными и полимерными формами кремниевых кислот, могут свидетельствовать о различных вкладах этих форм в разных водах.

С водой в организм человека ежедневно поступает 20–30 % суточного потребления кремния, а его биодоступность из воды составляет 50–80 %. Это определяется тем, что в воде кремний находится в разных формах. Наиболее легко диффундирует через мембраны и проникает в кровеносную систему ортокремниевая кислота. Что же касается поликислот, то их малая подвижность и большие размеры ограничивают их всасывание [26], [27]. В исследованиях на крысах не было обнаружено отличий в концентрациях кремния в костях при добавлении и без добавления кремния в питьевую воду [25].

С питьевой водой в организм могут поступать и диатомовые водоросли, эти факты описаны в монографии [1] у некоторых жителей Казахстана. Большое количество указанных организмов, оседающих в складках слизистой оболочки ЖКТ, могут вызывать микротравмы эпителия с последующим развитием воспалительных процессов. Помимо этого, вредное влияние диатомей может быть обусловлено и избыточным влиянием на организм кремнезема.

Среди продуктов питания наиболее существенными источниками кремния являются продукты растительного происхождения: пшеница, овес, ячмень, рис, кукуруза. Высокое содержание кремния в зеленых бобах, стручковой фасоли, шпинате, кориандре и др. [13], [21].

Особенностями рациона питания определяют различия в суточном поступлении кремния в организм. Эти показатели могут существенно отличаться не только у жителей разных регионов одной страны, но и различаться между жителями разных государств и континентов. Так, например, ежесуточное поступление кремния в организм человека жителей Китая и Индии, основным продуктом рациона которых является рис, в разы отличается от этого показателя у жителей европейских государств (таблица).

Ежесуточное поступление кремния в организм

Страна	Si (мг)	Источник
Финляндия	29	Jurkic [28]
Великобритания	20–50	Jurkic [28]
Европейские страны	16–62	Jugdaohsingh [26]
США	30–33(м) 24–25(ж)	Jurkic [28]
Китай	139	Jugdaohsingh [26]
Индия	143–204	Jugdaohsingh [26]

Следует отметить, что в литературе отсутствуют данные о содержании кремния в продуктах питания жителей различных регионов Рос-

сийской Федерации, а также расчетные данные поступления кремния в организм.

Соединения кремния из пищевых продуктов, наиболее вероятно, под действием соляной кислоты в желудке превращаются в доступную для организма ортокремниевую кислоту, которая легко диффундирует через мембраны [17]. Несмотря на то, что растительная пища имеет высокое содержание кремния, его биодоступность очень ограничена из-за плохой растворимости присутствующих в ней форм кремния [31]. В целом наиболее биодоступная форма кремния в виде ортокремниевой кислоты содержится в продуктах, богатых клетчаткой, цельных злаках, фруктах и питьевой воде [17].

### СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В ОРГАНИЗМЕ, ВСАСЫВАНИЕ И ВЫВЕДЕНИЕ

Кремний содержится во всех тканях и органах растений, животных и человека [4], [8], [21]. Общее содержание кремния у человека массой 70 кг составляет от 140 до 700 мг, поэтому этот элемент занимает третье место среди наиболее распространенных микроэлементов после цинка и железа. Наиболее богатыми кремнием являются соединительные ткани аорты, трахеи, сухожилия, кость, кожа и эпидермальные образования. Содержание кремния в коже человека составляет 49,5 мкг/г, в волосах – 42 мкг/г, а ногтях – 26,12 мкг/г. Высокое содержание кремния зафиксировано в зубной эмали человека (242 мг/кг сухой массы) и в эпифизе бедренной кости обезьян (453,6 мг/кг сухой массы).

В крови кремний присутствует в виде свободной ортокремниевой кислоты, которая не связана с белками. Концентрация этой кислоты может достигать от 50 до 200 мкг/л и зависит от содержания кремния в рационе питания [17]. По данным [19], [22], содержание кремния в сыворотке крови составляет 500–600 мкг/л, а в [16] его максимальный уровень, зафиксированный методом абсорбционной спектрометрии, оказался равным 310 мкг/л.

Интересно, что с возрастом содержание кремния в соединительной ткани уменьшается. В [1] приводятся данные, что в аорте и коже кроликов с возрастом происходит снижение концентрации кремния примерно в 5 раз, а в коже свиней до 10 раз. Такая динамика кремния может иметь определенное отношение к атеросклерозу. У человека происходит снижение концентрации кремния в аорте не только с возрастом, но и по мере развития атеросклероза [1]. Уменьшение концентрации кремния с возрастом особенно наблюдается у женщин [16]. Интересно, что уровень кремния в плазме беременных женщин снижается и составляет 33–43 мкг/л, в то время как у младенца этот показатель находится на уровне 340–690 мкг/л. Подобный факт снижения концентрации эссенциального элемента селена наблюдался

в крови у беременных женщин. Эти данные говорят о том, что плод активно потребляет все необходимые ему элементы из организма матери, а в период беременности, возможно, необходима усиленная терапия, направленная на восполнение конкретных эссенциальных элементов.

Установлено, что ортокремниевая кислота является основным легкодоступным источником кремния для организма человека, в то время как всасываемость полимерных форм растворенного кремния незначительна. В экспериментах на добровольцах показано, что 53 % поглощенной ортокремниевой кислоты выводится с мочой, в то время как при приеме внутрь полимерной кремниевой кислоты наблюдается лишь незначительное увеличение кремния в моче.

Точное место, где кремниевая кислота всасывается из желудочно-кишечного тракта, не установлено. Ортокремниевая кислота из крови распределяется по разным органам и тканям.

Основным путем экскреции кремния является путь через почки, при этом уровень кремния в сыворотке крови коррелирует с его уровнем в моче [15]. J. F. Popplewell с соавторами [33] провели эксперимент с радиоактивными изотопами по изучению всасывания и выведения кремния с мочой. Установлено, что та часть кремния, которая удерживается во внеклеточной жидкости, выводится быстро. Процесс поглощения этого элемента клеткой и выведения внутриклеточно кремния с мочой является медленным. Около 70–80 % кремния из плазмы крови выводится почками в течение 3–8 часов [33].

#### **ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В ОРГАНИЗМЕ**

Известно, что степень всасывания микроэлементов определяется минеральными компонентами рациона питания. В случае кремния следует в первую очередь учесть наличие в рационе соединений тех элементов, которые способны снизить растворимость соединений кремния. Так, кремниевая кислота способна к образованию нерастворимых силикатов железа, кальция, магния, алюминия, а также с рядом других тяжелых металлов. Все эти факторы определяют и биодоступность кремния из питьевой воды. В [9] проведен эксперимент, в котором экспериментальные животные получали одинаковое количество кремния с питьевой водой разной жесткости (от 0,463 до 7,28 мг-экв/л). При этом содержание кремния в сыворотке крови оказалось выше у животных, которые получали мягкую воду, по сравнению с животными, получавшими жесткую. Этот эксперимент может свидетельствовать о том, что в мягкой воде кремний присутствует в доступной форме по сравнению с жесткой.

Физиологический антагонизм установлен между кремнием и молибденом. При включении

в рацион крыс молибдена наблюдается снижение концентрации кремния в плазме крови, органах и тканях. Важно отметить, что включение в рацион кремния, в свою очередь, приводит к существенному снижению в крови молибдена [1].

Особенно хотелось бы обратить внимание на антагонизм между кремнием и алюминием. В настоящее время установлено, что алюминий оказывает токсическое действие на организмы растений, животных и человека. В растениях токсичность алюминия проявляется в недоразвитии корневой системы. В организме человека алюминий вызывает нарушение нервной деятельности (старческая деменция по типу Альцгеймера, амиотрофический латеральный синдром по типу болезни Паркинсона) [23]. Анализ токсического действия алюминия и вероятные причины связывания алюминия кремнием приведены в обзоре [17]. Острая токсичность алюминия наиболее вероятно определяется способностью катионов этого металла связывать такие важные биологические лиганды, как фосфаты в мембранах, ДНК и АТФ. Что же касается кремния, то его антагонизм по отношению к алюминию можно объяснить как снижением абсорбции алюминия в желудочно-кишечном тракте, так и способностью увеличивать экскрецию этого элемента почками. Интересно, что ортофосфорная кислота, содержащаяся в пиве, способствует выведению алюминия из организма. Мы разделяем точку зрения авторов [14], что этот процесс может быть связан с образованием в почечных канальцах гидроксид-алюмосиликатов, что предотвращает повторную абсорбцию алюминия. Возможность образования алюмосиликатов определяется почти одинаковыми размерами атомов алюминия и кремния.

#### **О БИОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ КРЕМНИЯ**

Исчерпывающий обзор литературы по биохимии и токсикологии соединений кремния на период до 1978 года дан в монографии М. Г. Воронкова с соавторами «Кремний и жизнь» [3]. Подвергнутый анализу в этой монографии объем литературных источников поражает. К первой части монографии, в которой проанализирован кремний, начиная с низших организмов и заканчивая животными и человеком, приведено 4599 ссылок. Во второй части, посвященной биологическому действию соединений кремния, проанализировано 4628 литературных источников.

Считается, что природные соединения кремния сыграли важную роль в процессе зарождения жизни на Земле. Для образования сложных органических молекул в водном растворе необходима определенная концентрация веществ, которая была очень низкой в морской воде. Одной из версий создания необходимой концентрации является процесс адсорбции на поверхности силикатов и кремнезема органических веществ. Не исключено, что указанные адсорбенты одновре-

менно и катализировали процессы дальнейших превращений органических соединений. К тому же на глине, которая очень распространена в природе, могли протекать самопроизвольные процессы хроматографического разделения веществ, из которых формировалась жизнь [3].

Имеются данные, что силикагель, который образован в присутствии органического вещества, обладает «памятью». Память заключается в том, что после удаления органического вещества силикагель сохраняет повышенную избирательную способность по отношению к удаленному веществу. Весьма интересны и свойства силикагеля, сформированного в присутствии микроорганизмов и ферментов. Так, если формирование силикагеля происходило в присутствии *Bacillus mycoides*, то он ускоряет рост этих микроорганизмов, как и левый кварц. Если же силикагель образован в присутствии ферментов, то он проясняет свойства биокатализатора [3].

Вместе с научно обоснованными фактами необычных свойств соединений кремния в научной литературе можно встретить и данные, которые вообще не подкреплены даже научной гипотезой. Это относится к способности водных растворов, содержащих кремний, «перерабатывать (?) энергию света», «в десятки раз ускорять окислительно-восстановительные реакции в организме» и др. Истину очень осторожного использования сведений из Интернета следует распространять и на биологическую роль кремния в том числе.

К настоящему времени биологическая роль кремния до конца не изучена, однако имеющиеся по данному вопросу литературные данные указывают на то, что кремний связан с минерализацией костей и остеопорозом, синтезом коллагена и старением кожи, состоянием волос и ногтей, а также атеросклерозом [24].

Есть доказательства того, что кремний способен снижать общий уровень холестерина VLDL и холестерина LDL, а также существенно ингибировать процесс атеросклероза, вызванный высоким содержанием в пище холестерина [32], [36]. Противосклеротическое действие кремния проявляется в основном путем повышения проницаемости мембраны и основного вещества артерий.

В эксперименте на животных показано, что кремний увеличивает скорость минерализации и кальцификации костей подобно витамину D [18], [20]. Известно, что витамин D ускоряет минерализацию и формирование костной ткани, а его дефицит приводит к задержке развития костей. Однако в условиях дефицита кремния наблюдается низкий уровень кальцификации и образования коллагена независимо от уровня витамина D.

Очень интересные данные получены в [25]. Добавление кремния в питьевую воду существенно не отражалось на концентрации кремния в костях крыс. Авторы делают предположение, что для максимального усвоения кремния костной

тканью необходим витамин К. Витамин К играет важную роль в минерализации костной ткани вследствие карбоксилирования остеокальцина. Именно его дефицит, по-видимому, и может повлиять на невключение кремния в костную ткань.

В последних исследованиях [34] обнаружено, что кремний в форме ортокремниевой кислоты стимулирует синтез коллагена первого типа, остеобластов и фибробластов кожи, а также повышает уровень костной дифференцировки клеток MG-63 в пробирке. Роль ортокремниевой кислоты заключается в модулировании активности фермента пролилгидроксилазы, который участвует в выработке коллагена [29].

В литературе накоплен достаточный материал о патологических процессах, связанных с избыточным поступлением кремния в организм, однако такой анализ должен стать темой отдельного обзора.

#### **К ВОПРОСУ О САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ НОРМАТИВАХ КРЕМНИЯ В ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ**

Предельно допустимая концентрация (ПДК) кремния в воде определена СанПиН 1.2.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества» и составляет 10 мг/л. При этом обращает на себя внимание, что в третьем разделе указанного СанПиН, в табл. 2, в которой приводятся содержания вредных химических веществ, наиболее часто встречающихся в природных водах на территории РФ, а также веществ антропогенного происхождения, получивших глобальное распространение, содержание кремния не регламентировано. ПДК по кремнию 10 мг/л приведена в указанном документе в табл. 3 и в приложении 2. В табл. 3 регламентировано содержание вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки в системе водоснабжения, и относится к активированной кремниевой кислоте. Необходимость разработки ПДК активированной кремниевой кислоты в воде возникла еще в СССР в 1960-х годах. Тогда в практику подготовки питьевой воды было внедрено использование активированной кремнекислоты в качестве флокулянта, которую получают обработкой силиката натрия серной кислотой. В приложении 2 приведены ПДК вредных химических веществ, поступающих в источники водоснабжения в результате хозяйственной деятельности человека, для кремния величина этого норматива установлена также 10 мг/л. Таким образом, из анализа СанПиН 1.2.4.1074-01 следует, что в нем отсутствуют какие-либо указания, разъяснения и нормы в отношении кремния природного происхождения.

Анализируя современную нормативную базу, В. Т. Мазаев и Т. Г. Шлепнина [7] отмечают, что в «Руководстве по контролю качества питьевой воды» (ВОЗ, Женева, 1987, 1994, 2004), а также

в «Директиве Совета ЕС относительно качества воды, предназначенной для потребления человеком», которая принята во всех странах ЕС, нет гигиенических нормативов по кремнию. Содержание кремния не находит отражения и в нормативных документах, регламентирующих химический состав питьевой воды Франции, Германии, Японии США. Воспроизводя расчеты класса опасности кремния в воде, авторы [7] приходят к выводу, что второй класс «высокоопасные вещества» в ГН 2.1.5.1315-03 установлен для кремния по формальным признакам и противоречит действительным фактам. В связи с этим авторы предлагают аннулировать в ГН позиции, связанные с нормативами по кремнию и его классом опасности. Авторы [2] также считают целесообразным привести нормативы РФ

по содержанию кремния в питьевой воде в соответствии с Руководством ВОЗ, директивами ЕС и другими документами. В письме Министерства здравоохранения РФ от 16 апреля 2013 года № 24-5-2041554 отмечается, что одна из причин того, что в мировой практике регулирования качества питьевой воды кремний не рассматривается как элемент, приоритетный для контроля в питьевой воде, может быть связана и с незначительным уровнем его содержания в водах. По данной теме в отношении РФ в настоящее время нельзя с уверенностью ответить на вопрос о целесообразности аннулирования ПДК кремния, скорее, речь может идти о коррекции норматива с учетом как особенностей действия кремния на организм человека, так и вклада его различных форм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А. и др. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Алексеев В. С., Болдырев К. А., Тесля В. Г. О необходимости пересмотра нормативного содержания кремния в питьевой воде // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 5. С. 56–60.
3. Воронков М. Г., Зелчан Г. И., Лукевич Э. Я. Кремний и жизнь. Биохимия, фармакология и токсикология соединений кремния. Рига: ЗИНАТНЕ, 1978. 587 с.
4. Воронков М. Г., Кузнецов И. Г. Удивительный элемент жизни. Иркутск: Вост.-сиб. кн. изд-во, 1983. 105 с.
5. Еремченко О. З. Учение о биосфере. Организованность биосферы и биогеохимические циклы. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2010. 104 с.
6. Камбалина М. Г. Атомно-абсорбционное определение содержания кремния в природных водах // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 3. С. 120–124.
7. Мазеев В. Т. Оценка степени санитарной опасности соединений кремния в природной и питьевой воде // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 7. С. 13–20.
8. Матыченко В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва-растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пущино, 2008. 34 с.
9. Метельская Т. Н., Новиков Ю. В., Плитман С. И. и др. О нормировании кремния в питьевой воде // Гигиена и санитария. 1987. № 8. С. 19–21.
10. Неорганическая химия / Под ред. Ю. Д. Терентьева. М.: АКАДЕМИА, 2004. Т. 2. 366 с.
11. Озера Карелии: Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 494 с.
12. Сапожников С. П. Влияние эколого-биохимических факторов среды обитания на функциональное состояние и здоровье населения Чувашии: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2001. 32 с.
13. Шазао А. А. Разработка технологии получения и изучение потребительских свойств БАД функционального назначения на основе красноклерного риса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2010. 26 с.
14. Bellia J. P., Birchall J. P., Roberts N. B. The role of silicic acid in the renal excretion of aluminium // Ann. Clin. Lab. Sci. 1996. Vol. 26. P. 227–233.
15. Berlyne G. M. et al. Silicon metabolism. I. Some aspects of renal silicon handling in normal man // Nephron. 1986. Vol. 43. P. 5–9.
16. Bissé E. et al. Reference values for serum silicon in adults // Anal Biochem. 2005. Vol. 337. P. 130–135.
17. Boguszewska-Czubara Anna, Kazimierz Pasternak. Silicon in medicine and therapy // J. Elem. 2011. P. 489–497.
18. Carlisle E. M. A relationship between silicon and calcium in bone formation // Fed Proc. 1970. Vol. 29. P. 565.
19. Carlisle E. M. // Biochemistry of the essential ultratrace elements / E. Frieden, ed. New York: Plenum Press, 1984. P. 257–291.
20. Carlisle E. M. Silicon: an essential element for the chick // Science. 1972. Vol. 78. P. 619–621.
21. Currie H. A., Perry C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies // Ann Bot. 2007. Vol. 100. P. 1383–1389.
22. Dobbie J. W., Smith M. J. B. The silicon content of body fluids // Scott Med. J. 1982. Vol. 27. P. 17–19.
23. Domingo J. L. Aluminium and other metals in Alzheimer's disease: a review of potential therapy with chelating agents // J. Alzheimers. Dis. 2006. Vol. 10. P. 331–341.
24. European Food Safety Authority. Opinion of the scientific panel on dietetic products, nutrition and allergies on a request from the commission related to the tolerable upper intake level of silicon // The EFSA Journal. 2004. Vol. 60. P. 1–11.
25. Jugdaohsingh R. et al. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet // Bone. 2008. Vol. 43. P. 596–606.
26. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health // J. Nutr. Health Aging. 2007. Vol. 11. № 2. P. 99–110.
27. Jugdaohsingh R. et al. Oligomeric but not monomeric silica prevents aluminium absorption in humans // Am. J. Clin. Nutr. 2000. Vol. 71. № 4. P. 944–949.
28. Jurkic L. M., Capanec I., Pavelic S. K., Pavelic K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid – releasing compounds: New perspectives for therapy // Nutrition & Metabolism. 2013. Vol. 10. № 2.
29. Keeting P. E. et al. Zeolite A increases proliferation, differentiation, and transforming growth factor production in normal adult human osteoblast like cells in vitro // J. Bone Miner. Res. 1992. Vol. 7. № 11. P. 1281–1289.

30. Li Zh and al. Absorption of silicon from artesian aquifer water and its impact on bonehealth in postmenopausal women: a 12 week pilot study // Nutrition Journal. 2010. Vol. 9. P. 44.
31. Munjas Lela, Jurkić Ivica Сепанец, Sandra Kraljević Pavelić, Krešimir Pavelić. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy // Nutr. Metab. (Lond.). 2013. Vol. 10. № 2.
32. Peluso M. R., Schneeman B. O. A food-grade silicon dioxide is hypocholesterolemic in the diet of cholesterol-fed rats // J. Nutr. 1994. Vol. 124. № 6. P. 853–860.
33. Popplewell J. F. 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. Vol. 69. № 3. P. 177–180.
34. Reffitt D. M. et al. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro // Bone. 2003. Vol. 32. № 2. P. 127–135.
35. Sivasankaran M. A. Nutrient concentration in groundwater of Pondicherry region // J. Environ Sci. Eng. 2004. Vol. 46. № 3. P. 210–216.
36. Wachter H. and al. Diatomaceous earth lowers blood cholesterol concentrations // Eur. J. Med. Res. 1998. Vol. 3. № 4. P. 211–215.

**Vapirova V. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Feoktistov V. M.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Venskovich A. A.**, Russian Railways (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Vapirova N. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### ON SILICON'S BEHAVIOR AND ITS BIOLOGICAL ROLE IN NATURE

The research data on the content of silicon in natural objects and its forms in water solutions are provided. The main sources providing the human body with silicon are analyzed. Orthosilicon acid is the main bioavailable form of this element. Volumes of the daily intake of silicon by the organism are conditioned by the food ration. The latest data on the content of silicon in a human body and its biological role are generalized. Silicon is connected with the bones' mineralization process and osteoporosis, synthesis of collagen and skin aging, a state of hair and nails, and atherosclerosis. Antagonism of silicon to some elements is shown and the opinion on the possible role of silicon in the removal of aluminum from the human body is provided. The need to define sanitary and hygienic standards for the level of silicon in drinking water is proven.

Key words: silicon, content of silicon in a human body, biological role of silicon

#### REFERENCES

1. Avtsyn A. P., Zhavoronkov A. A. i dr. *Mikroelementozy cheloveka: etiologiya, klassifikatsiya, organopatologiya* [Mikroelementoz of the person: etiology, classification, organopatologiya]. Moscow, Meditsina Publ., 1991. 496 p.
2. Alekseev V. S., Boldyrev K. A., Teslya V. G. On the need to review the normative content of silicon for drinking water [O neobkhodimosti peresmotra normativnogo soderzhaniya kremniya v pit'evoy vode]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011. № 5. P. 56–60.
3. Voronkov M. G., Zelchan G. I., Lukevits E. Ya. *Kremniy i zhizn'. Biokhimiya, farmakologiya i toksikologiya soedineniy kremniya* [Silicon and life. Biochemistry, pharmacology and toxicology of compounds of silicon]. Riga, ЗИНАТНЕ Publ., 1978. 587 p.
4. Voronkov M. G., Kuznetsov I. G. *Udivitel'nyy element zhizni* [A surprising element of life]. Irkutsk, Vost.-sib. kn. izd-vo, 1983. 105 p.
5. Eremchenko O. Z. *Uchenie o biosfere. Organizovannost' biosfery i biogeokhimicheskie tsikly* [The theory of biosphere. The biosphere's organization and its biogeochemical cycles]. Perm, Permskiy gos. universitet Publ., 2010. 104 p.
6. Kamalina M. G. Atomic and absorbing determination of the content of silicon in natural waters [Atomno-absorbtsionnoe opredelenie soderzhaniya kremniya v prirodnykh vodakh]. *Izvetiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk polytechnical university]. 2012. Vol. 320. № 3. P. 120–124.
7. Mazaev V. T. Assessment of the degree of sanitary danger of compounds of silicon in natural and drinking water [Otsenka stepeni sanitarnoy opasnosti soedineniy kremniya v prirodnoy i pit'evoy vode]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011. № 7. P. 13–20.
8. Matychenkov V. V. *Rol' podvizhnykh soedineniy kremniya v rasteniyakh i sisteme pochva – rastenie: Dis. ... d-ra biol. nauk* [The role of mobile silicon compounds in plants and the system the soil plant: abstract of the thesis of the Dr. Sci. Biol.]. Pushchino, 2008. 34 p.
9. Metel'skaya T. N., Novikov Yu. V., Plitman S. I. i dr. About regulation of silicon in drinking water [O normirovanii kremniya v pit'evoy vode]. *Gigiena i sanitariya*. 1987. № 8. P. 19–21.
10. *Neorganicheskaya khimiya* [Inorganic chemistry] / Under edition Yu. D. Terenteva. Moscow, AKADEMIA Publ., 2004. Vol. 2. 366 p.
11. *Ozera Karelii: Spravochnik* [Lakes of Karelia. Reference book] / Under edition N. N. Filatova, V. I. Kuhareva. Petrozavodsk, 2013. 494 p.
12. Sapozhnikov S. P. *Vliyanie ekologo-biokhimicheskikh faktorov sredy obitaniya na funktsional'noe sostoyanie i zdorov'e naseleniya Chuvashii: Avtoref. dis. ... d-ra med. nauk* [The influence of eco-biochemical factors on the habitat, function and health of Chuvash population: abstract of the thesis of the doctor of medical sciences]. Moscow, 2001. 32 p.
13. Shazzo A. A. *Razrabotka tekhnologii polucheniya i izuchenie potrebitel'skikh svoystv BAD funktsional'nogo naznacheniya na osnove krasnozernogo risa: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technology of receiving and studying consumer properties of dietary supplements and their functional purpose on the basis of Krasnozerny rice: abstract of the thesis of Candidate of Technical Sciences]. Krasnodar, 2010. 26 p.
14. Bellia J. P., Birchall J. P., Roberts N. B. The role of silicic acid in the renal excretion of aluminum // *Ann. Clin. Lab. Sci.* 1996. Vol. 26. P. 227–233.

15. Berlyne G. M. et al. Silicon metabolism. I. Some aspects of renal silicon handling in normal man // *Nephron*. 1986. Vol. 43. P. 5–9.
16. Bissé E. et al. Reference values for serum silicon in adults // *Anal Biochem*. 2005. Vol. 337. P. 130–135.
17. Boguszevska-Czubara Anna, Kazimierz Pasternak. Silicon in medicine and therapy // *J. Elem.* 2011. P. 489–497.
18. Carlisle E. M. A relationship between silicon and calcium in bone formation // *Fed Proc*. 1970. Vol. 29. P. 565.
19. Carlisle E. M. // *Biochemistry of essential elements* / E. Frieden, ed. New York: Plenum Press, 1984. P. 257–291.
20. Carlisle E. M. Silicon: an essential element for the chick // *Science*. 1972. Vol. 78. P. 619–621.
21. Currie H. A., Perry C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies // *Ann Bot*. 2007. Vol. 100. P. 1383–1389.
22. Dobbie J. W., Smith M. J. B. The silicon content of body fluids // *Scott Med. J*. 1982. Vol. 27. P. 17–19.
23. Domingo J. L. Aluminum and other metals in Alzheimer's disease: a review of potential therapy with chelating agents // *J. Alzheimers. Dis*. 2006. Vol. 10. P. 331–341.
24. European Food Safety Authority. Opinion of the scientific panel on dietetic products, nutrition and allergies on a request from the commission related to the tolerable upper intake level of silicon // *The EFSA Journal*. 2004. Vol. 60. P. 1–11.
25. Jugdaohsingh R. et al. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet // *Bone*. 2008. Vol. 43. P. 596–606.
26. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health // *J. Nutr. Health Aging*. 2007. Vol. 11. № 2. P. 99–110.
27. Jugdaohsingh R. et al. Oligomeric but not monomeric silica prevents aluminium absorption in humans // *Am. J. Clin. Nutr.* 2000. Vol. 71. № 4. P. 944–949.
28. Jurkic L. M., Cepanec I., Pavelic S. K., Pavelic K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid – releasing compounds: New perspectives for therapy // *Nutrition & Metabolism*. 2013. Vol. 10. № 2.
29. Keeting P. E. et al. Zeolite A increases proliferation, differentiation, and transforming growth factor production in normal adult human osteoblast like cells in vitro // *J. Bone Miner. Res*. 1992. Vol. 7. № 11. P. 1281–1289.
30. Li Zh and al. Absorption of silicon from artesian aquifer water and its impact on bonehealth in postmenopausal women: a 12 week pilot study // *Nutrition Journal*. 2010. Vol. 9. P. 44.
31. Munjas Lela, Jurkić Ivica Cepanec, Sandra Kraljević Pavelić, Krešimir Pavelić. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy // *Nutr. Metab. (Lond.)*. 2013. Vol. 10. № 2.
32. Peluso M. R., Schneeman B. O. A food-grade silicon dioxide is hypocholesterolemic in the diet of cholesterol-fed rats // *J. Nutr.* 1994. Vol. 124. № 6. P. 853–860.
33. Poppewell J. F. et al. Kinetics of uptake and elimination of silicic acid by a human subject: a novel application of  $^{32}\text{Si}$  and accelerator mass spectrometry // *J. Inorg. Biochem*. 1998. Vol. 69. № 3. P. 177–180.
34. Reffitt D. M. et al. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro // *Bone*. 2003. Vol. 32. № 2. P. 127–135.
35. Sivasankaran M. A. Nutrient concentration in groundwater of Pondicherry region // *J. Environ Sci. Eng*. 2004. Vol. 46. № 3. P. 210–216.
36. Wachter H. and al. Diatomaceous earth lowers blood cholesterol concentrations // *Eur. J. Med. Res*. 1998. Vol. 3. № 4. P. 211–215.

*Поступила в редакцию 10.02.2017*