

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СУБСТРАТАХ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Н.А. Егорова¹, Р.И. Михайлова¹, И.Н. Рыжова¹, Г.Д. Морозова², М.Г. Кочеткова¹

¹ ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
ФМБА России, ул. Погодинская д. 10с1, 119121, Москва, Россия

² ФГБУ «Научно-клинический центр токсикологии им. С.Н. Голикова» ФМБА России,
ул. Бехтерева, д. 1, 192019, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ. Представлен один из аспектов проблемы биологической роли кремния – его содержание в организме человека и животных. До 1970-х гг. кремний рассматривали как инертный универсальный транзитный загрязнитель без каких-либо определенных биологических свойств, «случайное напоминание о нашем геохимическом происхождении или показатель воздействия на окружающую среду». Позднее стали обращать внимание на тот факт, что кремний – третий (после физиологически значимых железа и цинка) по распространенности в организме человека микроэлемент, что способствовало проведению дальнейших исследований его содержания в отдельных органах и тканях. В обзоре собраны данные об общем количестве кремния в организме человека и животных, сведения о его процентном содержании в некоторых внутренних органах человека, концентрациях в коже, ногтях, волосах, зубной эмали, межпозвоночных дисках, тканях молочных желез, в сыворотке, плазме и цельной крови, образцах желчи, панкреатического сока, спинномозговой, плевральной, перитонеальной, синовиальной и амниотической жидкостей и в моче. Представлены результаты изучения наличия кремния в таких биологических субстратах животных, как сыворотка крови, ткани разных отделов толстого кишечника, мышечные ткани, кости, кожа, внутренние органы – печень, почки, сердце, легкие, трахея, пищевод, мозг, субклеточные фракции печени, включая ядра, митохондрии и микросомы. Обращено внимание на возможность влияния возраста и пола на уровни кремния в органах и биологических жидкостях человека и животных. Отмечено, что в большинстве исследований содержания кремния в биологических субстратах использованы атомно-абсорбционные и атомно-эмиссионные методы анализа. Данные о присутствии кремния в разных частях организма человека не всегда полностью совпадают и не всегда непосредственно сопоставимы, однако хорошо иллюстрируют динамику взаимодействия кремния с биологическими субстратами, способствуя ответу на вопрос – является ли кремний микроэлементом и истинно эссенциальным элементом для человека.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кремний, микроэлементы, биологические субстраты, атомно-абсорбционные и атомно-эмиссионные методы анализа.

ВВЕДЕНИЕ

До 1970-х гг. кремний (Si) не рассматривали как биологически значимый элемент. Долгое время считалось, что кремний – инертный универсальный транзитный загрязнитель без каких-либо определенных биологических свойств, «случайное напоминание о нашем геохимическом происхождении или показатель воздействия на окружающую среду» (Nielsen, 1991; Jugdaohsingh, 2007). Позднее стали обращать внимание на тот факт, что кремний – третий (после физиологически значимых железа и цинка) по

распространенности в организме человека микроэлемент (Jugdaohsingh, 2007; Ziola-Frankowska et al., 2017; Мокиенко, 2020), хотя оценки среднего содержания кремния в организме человека у разных авторов несколько различались: 1–2 г (Jugdaohsingh, 2007), $n \cdot 10^{-3}\%$ (Колесников, 2001; Мокиенко, 2020), 140–700 мг у человека массой 70 кг (Вапиров и др., 2017), 1–10 мг/кг (Ziola-Frankowska et al., 2017). Кремний продолжает вызывать не снижающийся интерес ученых в связи с остающимся открытым вопросом о его эссенциальности и биологической роли в живых

* Адрес для переписки:

Егорова Наталия Александровна
E-mail: NEgorova@cspmpz.ru

системах. Накапливаются сведения о присутствии кремния практически во всех органах, тканях и биологических жидкостях человека и животных, подкрепляющие мнение о том, что содержащийся во всех организменных системах элемент не может не играть одну из важных ролей в обеспечении оптимального функционирования всех систем организма в целом (Jugdaohsingh, 2007; Мокиенко, 2020).

СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В ОРГАНАХ, ТКАНЯХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ ЧЕЛОВЕКА

По данным, приведенным М.П. Колесниковым в 2001 г., «кремний содержится в гипофизе ($3,8 \cdot 10^{-2}\%$), в твердой мозговой оболочке и в белом веществе головного мозга ($5,3 \cdot 10^{-5}\%$), в спинномозговой жидкости, в хрусталике глаза и щитовидной железе ($1,9 \cdot 10^{-2}\%$), а также в тканях почек, сердца и других органов. В стенках артерий у новорожденных обнаружено $7,3 \cdot 10^{-3}\%$ кремния» (Колесников, 2001).

В более поздних публикациях подчеркивается, что кремний входит в состав коллагена, основного белка соединительной ткани живых организмов, включая человека. Наибольшим содержанием кремния отличаются соединительные ткани трахеи, аорты, лимфатические узлы, железы, легкие, сухожилия, гладкие мышцы желудочно-кишечного тракта, кожа человека (49,5 мкг/г), хрусталик глаза, кости, ногти (26,12 мкг/г), волосы (42 мкг/г), зубная эмаль (242 мг/кг сухой массы) (Вапиров и др., 2017; Мокиенко, 2020; Ron-danelli et al., 2021; Churadze et al., 2021).

В 30 образцах межпозвоночных дисков, удаленных у 22 пациентов, оперированных по поводу дегенеративных заболеваний позвоночника, концентрации кремния были на уровне 5,37–12,8 мкг/г ($7,82 \pm 1,76$ мкг/г). У женщин минимальная концентрация кремния в ткани диска составила 5,37 мкг/г (пациентка 42 лет), максимальная – 10,7 мкг/г (пациентка 28 лет), у мужчин минимальное количество этого элемента в диске было 5,72 мкг/г (пациент 38 лет), максимальное – 12,8 мкг/г (пациент 61 года). Определение содержания кремния проводили на атомно-эмиссионном спектрометре параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой (Zioła-Frankowska et al., 2017).

Средние уровни кремния в 16 образцах ткани молочной железы, взятых от 8 пациенток, перенесших операцию по уменьшению груди, составляли от 0,046 до 0,742 мкг/г сухой массы,

при среднем значении 0,0927 мкг/г (Peters et al., 1996). В последующих исследованиях было показано, что уровень кремния в плазме крови женщин составляет 140 ± 10 нг/мл, среднее содержание кремния в сыворотке крови определили на уровне 130 ± 70 и 170 ± 100 нг/мл; соответствующие медианы 100 нг/мл (диапазон 30–209 нг/мл); и от 10 до 250 нг/мл (Peters et al., 1999). Авторы применяли следующие методы количественного определения кремния в биосредах: электротермическую атомно-абсорбционную спектрометрию, эмиссионную спектрометрию с плазмой постоянного тока и эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой.

В работе S.J. Lugowski et al. (2000) приведены результаты измерений концентраций кремния в цельной крови женщин. В первом исследовании уровень кремния в крови составлял $24,2 \pm 26,7$ мкг/кг, а в повторном – кремний был идентифицирован в крови на значительно более высоком уровне – $74,3 \pm 86,5$ мкг/кг. По данным этих же авторов в грудном молоке уровни концентраций кремния составляли $51,1 \pm 31,0$ мкг/кг (Lugowski et al., 2000).

В крови практически здоровых жителей Чувашской Республики содержалось $0,895 \pm 0,091$ мг/л кремния ($n=10$) при концентрации кремния в питьевой воде $14,5 \pm 0,37$ мг/л и только $0,45 \pm 0,120$ мг/л ($n=10$), если для питьевых целей использовалась вода с концентрациями элемента $3,33 \pm 0,65$ мг/л. Различия были статистически достоверными, $p < 0,01$ (Толмачева, 2011).

Jugdaohsingh et al. (2002) при изучении абсорбции кремния из желудочно-кишечного тракта у 8 здоровых участников Фрамингемского когортного исследования с помощью метода оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой установили, что сыворотка крови 4 мужчин и 4 женщин (в возрасте $29,5 \pm 7,4$ лет) содержала в среднем $7,5 \pm 3,1$ мкмоль/л (с пределами 2,5–12,2 мкмоль/л) кремния (Jugdaohsingh et al., 2002). Средняя концентрация кремния в сыворотке здоровых волонтеров 19–40 лет (16 мужчин и 16 женщин) из Королевского колледжа Лондона была на уровне 113,9 мкг/л ($38,5$ – $326,7$ мкг/л) (Sripanyakorn et al., 2009).

Методом атомно-абсорбционной спектрометрии оценивали содержание кремния в сыворотке 1325 здоровых людей в возрасте 19–91 лет. Медианы концентраций кремния в сыворотке крови статистически значимо зависели от возраста и пола обследованных. У мужчин 18–59 лет

медиана составляла 9,5 мкмоль/л и снижалась до 8,5 мкмоль/л в возрастной категории 60–74 лет. У женщин с 18–29 лет до 30–44 лет наблюдалось увеличение медианы с 10,00 мкмоль/л до 11,10 мкмоль/л с последующим снижением в возрастной группе 45–59 лет до 9,23 мкмоль/л. У лиц старше 74 лет медиана значений кремния в сыворотке крови составила 7,70 мкмоль/л для мужчин и 8,00 мкмоль/л для женщин. В целом медианные значения концентраций кремния в сыворотке были в пределах 215,6–280 мкг/л (Bissé et al., 2005).

В исследованиях, проведенных в Польше, определяли концентрации кремния в плазме 126 здоровых взрослых жителей Вроцлава 20–70 лет с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии в графитовой печи. Среднее содержание элемента в плазме испытуемых составило 152,3 (116,3–195,6) мкг/л, в том числе у мужчин ($n=64$) – 168,3 (121,2–208,2) мкг/л, у женщин ($n=63$) – 144,8 (114,7–175,0) мкг/л. Концентрации кремния в плазме не имели гендерных различий, но отличались в возрастных группах и отрицательно коррелировали с возрастом испытуемых ($r = -0,40$, $p < 0,001$) (Prescha et al., 2019) (таблица). Последнее согласуется с данными Д. Оберлис и др. (2008), согласно которым с возрастом в некоторых тканях содержание кремния уменьшается (Оберлис и др., 2008).

В пользу этого утверждения свидетельствует исследование, в ходе которого с помощью электротермического атомно-абсорбционного спектрометрического метода изучали содержание кремния в сыворотке жителей Бельгии разного возраста. Наиболее высокой медиана концентраций кремния оказалась в сыворотке детей до одного года жизни – 491 мкг/л, с возрастом концентрация кремния в сыворотке значительно снижалась и составляла в возрастной группе 19–39 лет 115 мкг/л. Наименьшим содержанием кремния характеризовалась сыворотка крови беременных женщин – медиана 39,2

мкг/л. У мужчин 40–60 лет медианное значение концентраций кремния в сыворотке крови отмечалось на уровне 122 мкг/л, у женщин 40–60 лет – 146 мкг/л (Van Dyck et al., 2000). В этой же работе авторы приводят сравнительные литературные данные определения концентраций кремния в сыворотке крови жителей разных стран.

На примере США можно отметить известную зависимость результатов определения концентраций кремния в сыворотке от примененной аналитической техники: ET-AAS – электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии; ICP-AES – атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой; DCP-AES – атомно-эмиссионной спектроскопии с плазмой постоянного тока.

Образцы желчи, панкреатического сока, спинномозговой, плевральной, перитонеальной, синовиальной и амниотической жидкостей, полученные от пациентов во время обычных клинических процедур, анализировали на содержание в них кремния с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии. Во всех исследованных жидкостях были обнаружены сходные концентрации этого элемента, которые, в свою очередь, оказались аналогичными концентрациям кремния в сыворотке 50 здоровых людей – $21,5 \pm 4,5$ мкмоль/л. Определяли также концентрацию кремния в 24-часовых порциях мочи 50 здоровых людей, среднее значение составило 194 ± 94 мкмоль/л (Dobbie, Smith, 1982).

У 23 здоровых взрослых с использованием методов электротермической атомной абсорбции были изучены показатели, характеризующие процессы выделения кремния через почки. Средняя экскреция кремния с мочой составила $33,1 \pm 3,85$ мг/день; средний почечный клиренс – $88,6 \pm 7,94$ мл/мин; средняя фракционная экскреция – $86,35 \pm 8,1\%$, средняя концентрация кремния в моче – 0,265 мкг/мл (Berlyne et al., 1986).

Таблица. Среднее содержание кремния в плазме крови в зависимости от возраста (Prescha et al., 2019)

Возраст, лет	N, человек	Среднее содержание кремния, мкг/л
≤ 30	32	197,8 (140,5–224,1)
31-50	46	147,9 (120,8–171,6)
≥ 51	48	123,6 (94,2–180,1)

Таким образом, к настоящему времени накоплен достаточный массив информации о

присутствии кремния в разных составных частях организма человека. Эти данные не всегда пол-

ностью совпадают и не всегда непосредственно сопоставимы, но тем не менее хорошо иллюстрируют динамизм взаимодействия кремния с биосредами человеческого тела, приближая момент ответа на краеугольный вопрос – является ли кремний микроэлементом и истинно эссенциальным элементом для человека.

СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В ОРГАНАХ, ТКАНЯХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ ЖИВОТНЫХ

Интересные данные приводятся в литературе о присутствии кремния в органах и тканях животных. Исследовались сыворотка крови, кишечный тракт, мышечные ткани, кости, внутренние органы, субклеточные фракции печени, применялись различные модификации физико-химических методов определения кремния в биологических субстратах.

Считается, что общее содержание кремния в организме животных составляет около 0,001% (Шишков, 2005).

В сыворотке крови лабораторных крыс среднее содержание кремния при концентрациях кремния в питьевой воде $3,33 \pm 0,65$ и $14,5 \pm 0,37$ мг/л было близким и статистически не различалось: соответственно $0,89 \pm 0,79$ и $0,99 \pm 0,34$ мг/л. В то же время, как отмечалось выше, у людей в аналогичных условиях водопотребления обнаружено статистически значимое меньшее содержание кремния в сыворотке при концентрации элемента в воде $3,33 \pm 0,65$ мг/л (Толмачева, 2011). При определении содержания кремния в разных отделах толстого кишечника лабораторных крыс, получавших для питья воду с концентрациями кремния $3,33 \pm 0,65$ и $14,5 \pm 0,37$ мг/л, выявлены заметные различия уровней кремния в слепой, поперечной ободочной, сигмовидной и прямой кишке крыс, зависящие от концентраций элемента в питьевой воде, причем в трех отделах кишечника прослеживалась обратная зависимость – большее содержание кремния в питьевой воде сопровождалось снижением концентрации кремния в поперечной ободочной кишке в 1,7 раза ($p < 0,05$), в сигмовидной кишке в 2,6 раза ($p < 0,01$), в прямой кишке в 3,7 раза ($p < 0,01$) (Сусликов, Толмачева, 2009, табл. 3). Подобные результаты могут быть свидетельством известной разнонаправленности процессов гомеостаза кремния в отдельных частях живых организмов.

Мышечные ткани беременных самок крыс содержали 55 мг/кг кремния (51–59 мг/кг, 25–75

перцентили). Образцы мышечных тканей животных анализировали с использованием методов атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой (Борисюк, Кван, 2015).

Распределение кремния в тканях крыс и макак-резус изучали с помощью колориметрического метода, специально разработанного для анализа биологических материалов. Уровни кремния в мягких тканях обоих видов варьировались от 1 до 33 мкг/г сухой массы, исключение – легкие и лимфатические узлы приматов, в которых найдено в среднем 942 и 101 мкг/г кремния. Содержание кремния в целой бедренной кости крысы составляло 38 мкг/г (использовали метод эмиссионной спектроскопии), тогда как в диафизе бедренной кости обезьяны – 43 мкг/г, а в головке бедренной кости с эпифизом – 456 мкг/г. Кроме того, определяли концентрации кремния в субклеточных фракциях печени крыс: супернатант, ядра и митохондриальная часть содержали кремний в количестве 0,6–1,0 мкг/г эквивалентов печени, тогда как микросомальная фракция содержала только 0,2 мкг кремния/г эквивалентов печени (LeVier, 1975).

По данным В.В. Вапирова в эпифизе бедренной кости обезьян кремний присутствовал в количестве 453,6 мг/кг сухой массы (Вапиров, 2017).

Интересные сведения о динамике распределения кремния во внутренних органах самок белых крыс в зависимости от возраста приведены в работе R. Jugdaohsingh et al. (2015). При достаточном количестве экспериментальных данных хорошо заметно относительно большее содержание кремния в аорте, пищеводе, грудине, трахее и мышцах по сравнению, например, с кожей, хотя она считается, одной из наиболее богатых кремнием тканей. По мере увеличения возраста животных до 43 недель в ряде тканей происходило снижение концентраций кремния, особенно отчетливое в тканях аорты, пищевода, сердца и в сыворотке крови; в то же время в печени содержание кремния в течение всего периода эксперимента возрастало. Это еще одно свидетельство разнонаправленности процессов гомеостаза кремния в организме, уже отмеченное ранее (Сусликов, Толмачева, 2009).

В печени свиней было обнаружено $32,0 \pm 0,6$ мг/кг, в печени быков – $3,9 \pm 0,3$ мг/кг, в мышцах быков – 503 ± 34 мг/кг кремния ($n=6$). Измерение концентраций кремния в образцах тканей свиней

и быков проводили с использованием оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой. (Hauptkorn et al., 2001).

В супернатантах гомогенатов тканей двухмесячных крыс-самцов Вистар (180–220 г) найдены следующие концентрации кремния: в печени – $2,2 \pm 0,5$, почках – $3,5 \pm 0,3$, мозге – $1,6 \pm 0,4$, бедренной мышце – $1,5 \pm 0,7$ мкмоль/г свежей ткани. Концентрацию кремния измеряли спектрофотометрическим методом (Kiełczykowska et al., 2008).

Исследования, выполненные на лабораторных животных, дополняют результаты изучения содержания кремния в органах, тканях и биологических жидкостях тела человека и позволяют увидеть подобие в распределении кремния в живых организмах, на котором и основано экспериментальное моделирование картины гомеостаза кремния у человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированные данные научной литературы свидетельствуют о практически ubicвитарной распространенности кремния в биологических субстратах организма человека и животных. Обращает на себя внимание выявление значительных вариаций его содержания в отдельных органах, тканях и жидких средах. Представляет интерес накопление сведений о факторах, влияющих на количественные характеристики кремния в организме: например, указание на за-

висимость содержания кремния в тканях от возраста человека, в частности, снижение концентраций кремния в плазме и сыворотке крови в старших возрастных группах; выявление прямой связи между концентрацией кремния в питьевой воде и содержанием кремния в сыворотке крови людей и обратной связи между концентрацией кремния в питьевой воде и количеством кремния в тканях разных отделов толстого кишечника лабораторных крыс.

В перспективе подобные исследования целесообразно дополнять углубленным изучением процессов усвоения, распределения и накопления кремния в организме и факторов на них влияющих, форм и точек приложения отдельных видов биологического действия кремния.

Заслуживают внимания и методы измерения содержания кремния в биологических субстратах. В настоящее время в этих целях применяются главным образом атомно-абсорбционные и атомно-эмиссионные методы. Целесообразно сопоставление результатов, полученных разными модификациями этих методов, для минимизации возможных неточностей в сравнительных оценках содержания кремния в биологических субстратах человека и животных при доказательстве его предполагаемой эссенциальной роли в обеспечении оптимального протекания физиологических процессов в организме.

ЛИТЕРАТУРА

- Борисюк С.В., Кван О.В. Элементный состав мышечной ткани беременных самок крыс на фоне различного уровня потребления пищевых волокон. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (5): 61–65.
- Вапиров В.В., Феоктистов В.М., Венскович А.А., Вапирова Н.В. К вопросу о поведении кремния и его биологической роли. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2017; 2(163): 95–102.
- Колесников М.П. Формы кремния в растениях. *Успехи биологической химии*. 2001; 41: 301–332.
- Мокиенко А.В. Кремний в воде: от токсичности к эссенциальности // *Вісник морської медицини*. 2020; 4(89): 136–142. DOI <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.4430795>.
- Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных. СПб.: Наука, 2008; 544.
- 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): 127–131.
- 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; 35.
- Шишков Ю.И. Биотрансформируемые соединения кремния. Пиво и напитки. 2005; (5): 50–52.
- Berlyne G.M., Adler A.J., Ferran N., Bennett S., Holt J. Silicon metabolism. I. Some aspects of renal silicon handling in normal man. *Nephron*. 1986; 43(1): 5–9. DOI: 10.1159/000183709.
- Bissé E., Epting T., Beil A., Lindinger G., Lang H., Wieland H. Reference values for serum silicon in adults. *Anal Biochem*. 2005; 337(1): 130–135. DOI: 10.1016/j.ab.2004.10.034.
- Churadze L., Chagelishvili V., Kakhetelidze M., Iavich P., Mskhiladze L. Study of the possibility of using silicon dioxide, obtained from metal manganese production waste, in the production of cosmetic creams and ointments. *Georgian Med News*. 2021; (314): 166–171.
- Dobbie J.W., Smith M.J.B. The Silicon Content of Body Fluids. *Scottish Medical Journal*. 1982; 27(1): 17–19. DOI: 10.1177/003693308202700105.

- Hauptkorn S., Pavel J., Seltner H. Determination of silicon in biological samples by ICP-OES after non-oxidative decomposition under alkaline conditions. *Fresenius J. Anal Chem.* 2001; 370(2-3): 246–250. DOI: 10.1007/s002160100759.
- Jugdaohsingh R., Watson A.I., Pedro L.D., Powell J.J. The decrease in silicon concentration of the connective tissues with age in rats is a marker of connective tissue turnover. *Bone.* 2015; 75: 40–48. DOI: 10.1016/j.bone.2015.02.004.
- Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J. Nutr Health Aging.* 2007; 11(2): 99–110.
- Jugdaohsingh R., Anderson S. H.C., Tucker K. L., Elliott H., Kiel D. P., Thompson R. P.H., Powell J. J. Dietary silicon intake and absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition.* 2002; 75: 887–893. <https://doi.org/10.1093/ajcn/75.5.887>.
- Kiełczykowska M., Musik I., Pasternak K. Relationships between silicon content and glutathione peroxidase activity in tissues of rats receiving lithium in drinking water. *Biometals.* 2008 Feb; 21(1): 53–59. DOI: 10.1007/s10534-007-9092-9.
- LeVier R.R. Distribution of silicon in the adult rat and rhesus monkey. *Bioinorg Chem.* 1975 Jan; 4(2): 109–115. DOI: 10.1016/s0006-3061(00)81019-4.
- Lugowski S.J., Smith D.C., Bonek H., Lugowski J., Peters W., Semple J. Analysis of silicon in human tissues with special reference to silicone breast implants. *J. Trace Elem Med Biol.* 2000 Apr; 14(1): 31–42. DOI: 10.1016/S0946-672X(00)80021-8.
- Nielsen F.H. Nutritional requirements for boron, silicon, vanadium, nickel, and arsenic: current knowledge and speculation. *The FASEB Journal.* 1991; 5:2661–2667. DOI: 10.1096/fasebj.5.12.1916090.
- Peters W., Smith D., Lugowski S., McHugh A., MacDonald P., Baines C. Silicon and silicone levels in patients with silicone implants. *Curr Top Microbiol Immunol.* 1996; 210: 39–48. DOI: 10.1007/978-3-642-85226-8_4.
- Peters W., Smith D., Lugowski S. Silicon assays in women with and without silicone gel breast implants—a review. *Ann Plast Surg.* 1999; 43(3): 324–30. DOI: 10.1097/0000637-199909000-00020.
- Prescha A., Zabłocka-Słowińska K., Grajeta H. Dietary Silicon and Its Impact on Plasma Silicon Levels in the Polish Population. *Nutrients.* 2019; 11(5): 980. DOI: 10.3390/nu11050980.
- Rondanelli M., Faliva M.A., Peroni G., Gasparri C., Perna S., Riva A., Petrangolini G., Tartara A. Silicon: A neglected micronutrient essential for bone health. *Exp Biol Med (Maywood).* 2021 Jul; 246(13):1500–1511. DOI: 10.1177/1535370221997072.
- Sripanyakorn S., Jugdaohsingh R., Dissayabutr W., Anderson S.H., Thompson R.P., Powell J.J. The comparative absorption of silicon from different foods and food supplements. *Br J Nutr.* 2009; 102(6): 825–834. DOI:10.1017/S0007114509311757
- Van Dyck, K., Robberecht, H., Van Cauwenbergh, R. Vlaslaer V.V., Deelstra H. Indication of silicon essentiality in humans. *Biol Trace Elem Res.* 2000; 77: 25–32. <https://doi.org/10.1385/BTER:77:1:25>.
- Zioła-Frankowska A., Kubaszewski Ł., Dąbrowski M., Frankowski M. Interrelationship between silicon, aluminum, and elements associated with tissue metabolism and degenerative processes in degenerated human intervertebral disc tissue. *Environ Sci Pollut Res. Int.* 2017; 24(24): 19777–19784. DOI: 10.1007/s11356-017-9588-y.

SILICON CONTENT IN BIOLOGICAL SUBSTRATES ON ANIMALS (LITERATURE REVIEW)

N.A. Egorova¹, R.I. Mihajlova¹, I.N. Ryzhova¹, G.D. Morozova², M.G. Kochetkova¹

¹ FSBI "Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks FMBA of Russia",
10/1, Pogodinskaya str., 119121, Moscow, Russian Federation

² FSBI "Scientific and Clinical Center of Toxicology named after S.N. Golikov FMBA of Russia"
1, Bekhtereva str., 192019, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT. The review is devoted to one of the aspects of the problem of the biological role of silicon – its content in the human and animal organisms. Until the 1970s, silicon was considered as an inert universal transit pollutant with no specific biological properties, "an accidental reminder of our geochemical origins or an indicator of environmental impact." Later, attention began to be paid to the fact that silicon is the third (after physiologically significant iron and zinc) trace element in the human body in terms of prevalence, which contributed to further studies of its content in individual organs and tissues. The review contains data on the total amount of silicon in the human and animal body, information on its percentage in some internal human organs, concentrations in the skin, nails, hair, tooth enamel, intervertebral discs, mammary gland tissues, in serum, plasma and whole blood, samples of bile, pancreatic juice, cerebrospinal, pleural, peritoneal, synovial and amniotic fluids and in urine. The results of studying the presence of silicon in such biological substrates of animals as blood serum, tissues of different parts of the large intestine, muscle tissue, bones, skin, internal organs – liver, kidneys, heart, lungs, trachea, esophagus, brain, subcellular fractions of the liver, including nuclei, mitochondria and microsomes are presented. Attention is drawn to the possibility of the influence of age and gender on the levels of silicon in organs and biological fluids of humans and animals. It is noted that in most studies of the silicon content in biological substrates, atomic absorption and atomic emission methods of analysis are used. The data on the presence of silicon in different parts of the human body do not always completely coincide and are not always directly comparable, however, they well illustrate the dynamism of the interaction of silicon with biological substrates, contributing to the answer to the question whether silicon is a trace element and a truly essential element for humans.

KEYWORDS: silicon, trace elements, biological substrates, atomic absorption and atomic emission methods of analysis.

REFERENCES

- Borisyuk S.V., Kvan O.V. The elemental composition of muscle tissue of pregnant female rats on the background of different levels of consumption of dietary fiber. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; (5): 61–65 [in Russ.].
- Vapirov V.V., Feoktistov V.M., Venskovich A.A., Vapirova N.V. On the behavior of silicon and its biological role. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017; 2(163): 95–102 [in Russ.].
- Kolesnikov M.P. Forms of silicon in plants]. *Uspеhi biologicheskoy himii*. 2001; 41: 301–332 [in Russ.].
- Mokienko A.V. Silicon in water: from toxicity to essentiality. *Visnik mors'koї medicine*. 2020; 4(89): 136–142 [in Russ.].
- Oberleas D., Harland B., Skalny A. Biological role of macro- and trace elements in humans and animals. Saint Petersburg: Nauka, 2008; 544 [in Russ.].
- Suslikov V.L., Tolmacheva N.V., Efeykina N.B. Colonizational resistance's peculiarities of intestinal microflora in different ecologo-biogeochemical conditions of permanent residence on the territory of the Chuvash Republic. *Meditinskiy al'manakh*. 2009; 2: 127–131 [in Russ.].
- Tolmacheva N.V. Ecological and physiological substantiation of optimal levels of macro- and microelements in drinking water and food rations. Diss. Moscow. 2011; 35 [in Russ.].
- Shishkov Ju.I. Biotransformable silicon compounds. *Pivo i napitki*. 2005; 5: 50–52 [in Russ.].
- Berlyne G.M., Adler A.J., Ferran N., Bennett S., Holt J. Silicon metabolism. I. Some aspects of renal silicon handling in normal man. *Nephron*. 1986; 43(1): 5–9. DOI: 10.1159/000183709.
- Bissé E., Epting T., Beil A., Lindinger G., Lang H., Wieland H. Reference values for serum silicon in adults. *Anal Biochem*. 2005; 337(1): 130–135. DOI: 10.1016/j.ab.2004.10.034.
- Churadze L., Chagelishvili V., Kakhetelidze M., Iavich P., Mskhiladze L. Study of the possibility of using silicon dioxide, obtained from metal manganese production waste, in the production of cosmetic creams and ointments. *Georgian Med News*. 2021; (314): 166–171.
- Dobbie J.W., Smith M.J.B. The Silicon Content of Body Fluids. *Scottish Medical Journal*. 1982; 27(1): 17–19. DOI: 10.1177/003693308202700105.
- Hauptkorn S., Pavel J., Seltner H. Determination of silicon in biological samples by ICP-OES after non-oxidative decomposition under alkaline conditions. *Fresenius J. Anal Chem*. 2001; 370(2-3): 246–250. DOI: 10.1007/s002160100759.
- Jugdaohsingh R., Watson A.I., Pedro L.D., Powell J.J. The decrease in silicon concentration of the connective tissues with age in rats is a marker of connective tissue turnover. *Bone*. 2015; 75: 40–48. DOI: 10.1016/j.bone.2015.02.004.
- Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J. Nutr Health Aging*. 2007; 11(2): 99–110.
- Jugdaohsingh R., Anderson S. H.C., Tucker K. L., Elliott H., Kiel D. P., Thompson R. P.H., Powell J. J. Dietary silicon intake and absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2002; 75: 887–893. <https://doi.org/10.1093/ajcn/75.5.887>.
- Kiełczykowska M., Musik I., Pasternak K. Relationships between silicon content and glutathione peroxidase activity in tissues of rats receiving lithium in drinking water. *Biomaterials*. 2008 Feb; 21(1): 53–59. DOI: 10.1007/s10534-007-9092-9.
- LeVier R.R. Distribution of silicon in the adult rat and rhesus monkey. *Bioinorg Chem*. 1975 Jan; 4(2): 109–115. DOI: 10.1016/s0006-3061(00)81019-4.
- Lugowski S.J., Smith D.C., Bonek H., Lugowski J., Peters W., Semple J. Analysis of silicon in human tissues with special reference to silicone breast implants. *J. Trace Elem Med Biol*. 2000 Apr; 14(1): 31–42. DOI: 10.1016/S0946-672X(00)80021-8.
- Nielsen F.H. Nutritional requirements for boron, silicon, vanadium, nickel, and arsenic: current knowledge and speculation. *The FASEB Journal*. 1991; 5:2661–2667. DOI: 10.1096/fasebj.5.12.1916090.
- Peters W., Smith D., Lugowski S., McHugh A., MacDonald P., Baines C. Silicon and silicone levels in patients with silicone implants. *Curr Top Microbiol Immunol*. 1996; 210: 39–48. DOI: 10.1007/978-3-642-85226-8_4.
- Peters W., Smith D., Lugowski S. Silicon assays in women with and without silicone gel breast implants—a review. *Ann Plast Surg*. 1999; 43(3): 324–30. DOI: 10.1097/0000637-199909000-00020.
- Prescha A., Zabłocka-Słowińska K., Grajeta H. Dietary Silicon and Its Impact on Plasma Silicon Levels in the Polish Population. *Nutrients*. 2019; 11(5): 980. DOI: 10.3390/nu11050980.
- Rondanelli M., Faliva M.A., Peroni G., Gasparri C., Perna S., Riva A., Petrangolini G., Tartara A. Silicon: A neglected micro-nutrient essential for bone health. *Exp Biol Med (Maywood)*. 2021 Jul; 246(13):1500–1511. DOI: 10.1177/1535370221997072.
- Sripanyakorn S., Jugdaohsingh R., Dissayabutr W., Anderson S.H., Thompson R.P., Powell J.J. The comparative absorption of silicon from different foods and food supplements. *Br J Nutr*. 2009; 102(6): 825–834. DOI:10.1017/S0007114509311757
- Van Dyck, K., Robberecht, H., Van Cauwenbergh, R. Vlaslaer V.V., Deelstra H. Indication of silicon essentiality in humans. *Biol Trace Elem Res*. 2000; 77: 25–32. <https://doi.org/10.1385/BTER:77:1:25>.
- Zioła-Frankowska A., Kubaszewski Ł., Dąbrowski M., Frankowski M. Interrelationship between silicon, aluminum, and elements associated with tissue metabolism and degenerative processes in degenerated human intervertebral disc tissue. *Environ Sci Pollut Res. Int*. 2017; 24(24): 19777–19784. DOI: 10.1007/s11356-017-9588-y.