



Кашуба Н.А.

Особенности транскутанного проникновения свинца в организм человека

ГВУЗ «Тернопольский государственный медицинский университет имени И.Я. Горбачевского МЗ Украины», 46001, Тернополь, Украина

Введение. Особенностью свинца является высокая способность к процессу дезинтеграции и значительной контаминации окружающей среды. При контаминации рук и тела в целом свинцом существует высокая вероятность проникновения микро- и наночастиц через кожу в организм. Этот процесс на сегодня недостаточно изучен. Есть сведения, что неорганические соединения свинца и металлические частицы свинца способны проникать через кожу в организм человека.

Материал и методы. Материалы: центрифуга 10 000 об./мин, лазерный излучатель (длина волны 625–740 нм), оптический микроскоп, анализатор вольтамперметрический АВА-2, Analysette 12 Dyna Sizer, магнитная мешалка, дистиллятор, раствор Na₂S. Исследования проведены в 2017–2018 гг. среди рабочих аккумуляторных участков станций технического обслуживания г. Тернополь — 17 человек. Результаты исследований обработаны с использованием статистического пакета SPSS 19.

Результаты. Установлено, что в процессе контаминации механическим путём кожи свинцом происходит отторжение с поверхности свинца микро-частиц и в меньшей мере ультрадисперсных наночастиц, которые способны проникать в потовые железы. Как показали исследования, в смывах с кожи ладоней обнаруживаются частицы преимущественно размером 1 мкм — 100 нм. В процессе нахождения частиц свинца в потовых железах происходит уменьшение их размера до наноразмеров, позволяющих им беспрепятственно проникать в организм. Уменьшение размера частиц в потовых железах происходит в результате образования растворимых соединений свинца. Предположительно основным химическим веществом, способствующим этому процессу, является молочная кислота. С увеличением экспозиции размеры частиц свинца, находящихся в потовых железах, уменьшаются. Интенсивная очистка поверхности кожи механическими способами, а также моющими средствами с последующей её контаминацией свинцом способствует проникновению частиц свинца в потовые железы и дальнейшему его распространению в организме. Также установлено, что интенсивная физическая нагрузка способствует уменьшению размера частиц, что позволяет предположить химическое взаимодействие свинца с молочной кислотой и образование растворимого лактата свинца. Предположение подтверждается исследованиями состава пота, в котором обнаруживается лактат свинца.

Заключение. Доказана способность свинца проникать в организм человека транскутанно в виде наночастиц и растворимых соединений. Интенсивные физические нагрузки способствуют проникновению свинца в организм.

Ключевые слова: наночастицы; микрочастицы; свинец; контаминация; транскутанное проникновение; лактат свинца; пот

Для цитирования: Кашуба Н.А. Особенности транскутанного проникновения свинца в организм человека. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (1): 55–59. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-55-59>

Для корреспонденции: Кашуба Николай Алексеевич, проф., зав. каф. отделения общей гигиены и экологии ГВУЗ «Тернопольский государственный медицинский университет имени И.Я. Горбачевского МЗ Украины», 46001, Тернополь, Украина. E-mail: kashuba@tdmu.edu.ua

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Благодарность. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила 16.08.2019 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликована 12.02.2021

Nikolay A. Kashuba

Features of transcutaneous penetration of lead into the human body

Ivan Horbachevsky Ternopil State Medical University, Ternopil, 46001, Ukraine

Introduction. One of the features of lead is its high ability to disintegrate and significantly contaminate the environment. The contamination of hands or the whole body with lead creates a high probability of penetrating micro- and nanoparticles through the skin into the body. Nowadays, this process is not sufficiently studied. There is evidence that inorganic compounds or metallic particles of lead can penetrate through the skin into a human body.

Material and methods. centrifuge 10000 rpm, laser emitter (wavelength 625–740 nm), optical microscope, voltampermetric analyzer АВА-2, Analysette 12 Dyna Sizer, magnetic stirrer, distiller, Na₂S solution. The studies were conducted in 2017–2018 among the workers of battery sections of technical service stations in Ternopol – 17 people. The research results were processed by the statistical package SPSS 19.

Results. The process of mechanical contamination by the skin with lead, rejection of micro particles from the surface of lead, and, to a lesser extent, ultrafine nanoparticles, which can penetrate the sweat glands, was established to occur. The studies have shown in the washings from the palms particles' skin are detected mainly in the size of 1 μm - 100 nm. In the process of finding the particles of lead in the sweat glands, their length decreases to Nanoscale, allowing them freely entering the body. The decrease in particle size in the sweat glands occurs due to the formation of soluble lead compounds. Presumably, the main chemical contributing to this process is lactic acid. With increasing exposure, the size of lead particles in the sweat glands decreases. Intensive cleaning of the skin surface by mechanical methods, and detergents, followed by contamination with lead, promotes the penetration of lead particles into the sweat glands and its further spread in the body. The intense physical activity was established to contribute to a decrease in particle size, which suggests chemical interaction of lead with lactic acid and the formation of soluble lead lactate. The assumption is confirmed by studies of the composition of sweat, which is detected lead lactate.

Conclusion. The lead ability to penetrating a human body transcutaneously in the form of nanoparticles and soluble compounds has been proven. Intense physical activity facilitates the penetration of lead into the body.

Keywords: nanoparticles; microparticles; lead; contamination; transcutaneous penetration; lead lactate; sweat

For citation: Kashuba N.A. Features of transcutaneous penetration of lead into the human body. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 100 (1): 55–59. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-100-1-55-59> (In Russ.)

For correspondence: Nikolay A. Kashuba, MD, Ph.D., DSci, Prof. Head of the Department of general hygiene and ecology Ivan Horbachevsky Ternopil State Medical University, Ternopil, 46001, Ukraine. E-mail: kashuba@tdmu.edu.ua

Information about the authors: Kashuba N.A., <https://orcid.org/0000-0002-3370-2805>

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

Acknowledgements. The study had no sponsorship.

Received: August 08, 2020 / Accepted: September 18, 2020 / Published: February 12, 2021

Введение

В настоящее время влияние наночастиц на здоровье человека оценивается различными специалистами очень неоднозначно — от полного отрицания опасности наночастиц для живых организмов до неоправданных фобий различной степени. Столь разноречивый подход прежде всего объясняется недостаточной информацией об особенностях ответа живых систем на изменение физических свойств частиц вещества размером меньше 100 нм. Во многом это вызвано тем, что «нанонаука» — не традиционная дисциплина, а скорее, комбинация из физики, химии, биологии, математики, инженерии и технологий, требующая соответствующих знаний у исследователей и проведения исследований на стыке этих наук [1–5].

Очевидно, что интенсивность и характер влияния наночастиц на биологические системы зависят от свойств вещества, из которого они состоят, размера частиц, свойств биологической системы, условий, при которых происходит воздействие наночастиц на биологическую систему. Из этого следует, что оценивать возможность влияния наночастиц на живые организмы в каждом конкретном случае имеет смысл лишь с учётом указанных обстоятельств.

С гигиенической и токсикологической точки зрения значительный интерес представляют наночастицы, состоящие из токсичных малорастворимых материалов. Их воздействие на организм может быть результатом сочетания токсического и квантового эффектов. Одним из таких веществ является свинец. Он относится к группе наиболее токсичных металлов и включён рядом международных организаций, в том числе и ВОЗ, в список приоритетных загрязнителей.

Важными обстоятельствами, влияющими на характер и интенсивность влияния свинца на организм человека, являются пути и механизмы его проникновения в организм. Это в свою очередь обусловлено как физико-химическими свойствами свинца, так и свойствами органов, которые подвергаются его воздействию.

Одной из физических особенностей свинца как металла является его высокая способность к процессу дезинтеграции даже при незначительных механических нагрузках на его поверхность, а следовательно, к значительной контаминации окружающей среды. Учитывая высокую токсичность свинца при всё ещё частом применении этого металла как в промышленности, так и в быту существует достаточно большая угроза попадания свинца в организм человека. Если также принять во внимание довольно частое пренебрежение населением средствами индивидуальной защиты или их некорректное применение на производстве и тем более в быту, то существует высокая угроза нанесения вреда здоровью лиц, которые с ним контактируют, а также их окружению.

Кроме того, если учесть, что при контакте свинца с кожей человека могут образовываться частицы не только микро-, но и наноразмеров, существует высокая вероятность проникновения последних через кожу в организм человека. Однако, поскольку этот процесс довольно сложный, на сегодня он ещё недостаточно изучен. Существует мнение, что транскутанно свинец может попадать в организм в обычных условиях лишь в незначительном количестве. При этом поглощённый свинец появляется в поте и слюне и в значительно меньшей мере в крови или моче [6]. Однако причины, приводящие к такому распределению, не указываются. Вместе с тем есть сведения, что неорганические соединения свинца, что очень важно, металлургические частицы свинца способны проникать через кожу в организм человека [7–10].

Известно, что уменьшение размера частиц твёрдых тел приводит к существенному изменению их физико-химических свойств [11]. Наночастицы металлов, в частности свинца, размером менее 10 нм являются системами, обладающими избыточной энергией и высокой химической активностью [12, 13]. Несколько иные процессы происходят с наночастицами размером около 1 нм. Они практически не имеют высокой энергии активации [8] и поэтому в первую

очередь либо вступают при больших концентрациях в процессы агрегации, приводящие к образованию микрочастиц металлов, и в таком виде реагируют с другими химическими соединениями, либо, при малых концентрациях, обладают подобно растворам большой способностью к проникновению в организм и его органы, поражая в первую очередь органы-мишени, которые порой малодоступны для микрочастиц. Таким образом, размеры частиц существенно влияют на характер их взаимодействия с поверхностями биологических систем, с которыми они контактируют [14].

Цель исследования — выявить возможность поступления свинца в организм человека через кожу, а также установить, при каких обстоятельствах этот механизм действия может быть наиболее эффективным.

Материал и методы

Материалы: центрифуга 10 000 об./мин, набор лабораторной посуды, реактивы, лазерный излучатель (длина волны 625–740 нм), оптический микроскоп, анализатор вольтамперометрический АВА-2, прибор для исследования частиц микро- и наноразмеров Analysette 12 Dyna Sizer, магнитная мешалка, дистиллятор, раствор Na_2S . Исследования проведены в 2017–2018 гг. среди рабочих аккумуляторных участков станций технического обслуживания г. Тернополь — 17 человек. Результаты исследований обработаны с использованием статистического пакета SPSS 19.

Образование мелкодисперсных частиц свинца проводилось следующим образом. Свинцовые шарики размером до 2 мм помещали в контейнеры с поваренной солью с высокой степенью дисперсности. При этом величина размеров частиц диспергированной соли не превышала 100 мкм. Средний размер составлял: $M = 12,7 \pm 2,43$ мкм. После длительного перемешивания этих смесей в магнитной мешалке до изменения окраски соли к ним добавляли дистиллированную воду. Перемешивание проводили до полного растворения соли.

Суспензию подвергали центрифугированию на высокооборотной центрифуге с частотой вращения вала 10 000 об./мин.

Качественную реакцию на наличие свинца проводили путём добавления к суспензии раствора Na_2S . Тёмный осадок, который образовывался в результате химической реакции, свидетельствовал о наличии в ней свинца. Дополнительные количественные исследования проведены на анализаторе вольтамперометрическом АВА-2.

Результаты

Проведены исследования возможности создания частиц различных размеров, в том числе и наночастиц, при слабом механическом взаимодействии поверхностей свинцовых тел с поверхностями других материалов (с кристаллами NaCl), обладающих абразивными свойствами. Оптической микроскопией установлено, что в полученных суспензиях наблюдаются частицы различных размеров, однако их максимальные размеры не превышают 70–90 мкм.

Согласно расчётам, проведённым по формуле $ds = \sqrt{18 \cdot 107 \text{ nH} / (\text{Pm} - \text{Pg}) \cdot \text{gt}}$, в растворе соли с удельным весом 1400 кг/м^3 в сосуде на высоте 50 мм от поверхности коллоидного раствора при его центрифугировании в течение 60 мин с центробежной силой 6,7 g должны находиться частицы свинца размером не более 0,6 мкм. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили предварительные расчёты. В отобранных при указанных условиях пробах методами оптической микроскопии при увеличении в 1200 раз отсутствовали частицы свинца, которые можно было бы визуализировать (та есть более 0,5 мкм). Вместе с тем при прохождении через эту фракцию суспензии монохромного лазерного луча с длиной волны 625–740 нм зарегистрировано образование конуса Тиндаля, что характерно для коллоидных растворов, у которых дисперсность частиц соответствует наноразмерному диапазону. Диаметр основа-

Original article

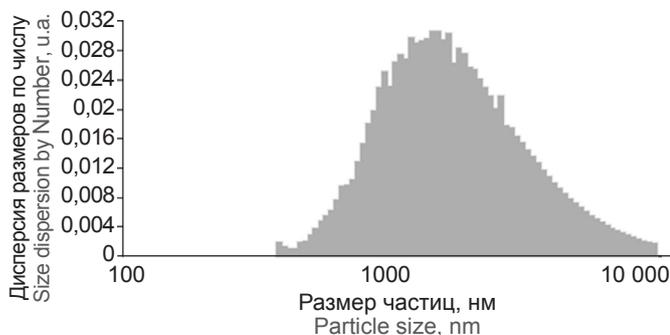


Рис. 1. Дисперсный состав частиц свинца в суспензии, которая образовалась после механического воздействия на него кристаллов мелкозернистой поваренной соли с последующим её растворением в воде.

Fig. 1. Dispersed composition of lead particles in suspension, which was formed after mechanical action of fine-grained sodium chloride crystals on it, followed by its dissolution in water.

ния конуса Тиндала на экране при прохождении через раствор лазерного луча оказался в 1,7 раза больше, чем при его прохождении через контрольный раствор. Это позволило предположить, что в растворе могут присутствовать частицы наноразмеров.

С целью установления природы этих частиц эту фракцию исследовали по известным методикам [15] на предмет наличия в ней свинца. Исследованиями установлено наличие свинца в растворе в концентрации $0,120 \pm 0,021$ мг/л.

Таким образом, установлено, что суспензия содержит частицы свинца размером менее 0,6 мкм, а образование конуса Тиндала позволило с высокой вероятностью утверждать о наличии и наночастиц свинца. Однако окончательный ответ на поставленный вопрос мог быть получен только после проведения прямых исследований относительно наличия в суспензии наночастиц.

Исследования суспензии, проведённые на Analysette 12 Dyna Sizer, подтвердили наличие в ней частиц размером менее 1 мкм (рис. 1). Но несмотря на то что частицы имели размеры менее 1 мкм, на этом основании их нельзя отнести к частицам, обладающим наноразмерными эффектами, которые обнаруживаются у частиц размером менее 100 нм.

Дальнейшие исследования основывались на следующих соображениях. Обнаруженная возможность образования наночастиц свинца путём их отделения от поверхности свинцового тела при трении его о материалы с низкой адгезивной способностью позволяет предположить возможность образования более мелких наночастиц. В связи с этим возникла необходимость установить размеры частиц, которые образуются при механическом взаимодействии свинца на кожу ладоней рук человека.

Вместе с тем возникло предположение, что в механизме токсического действия свинца на организм человека большая роль также принадлежит лактату свинца, который образуется в организме, и прежде всего в мышцах, при взаимодействии свинца с молочной кислотой.

Известно, что молочная кислота присутствует в мышечных тканях, в крови и поте человека. Её содержание колеблется в зависимости от различных функциональных состояний организма, но больше всего её содержание зависит от интенсивности выполняемой мышцами работы в анаэробных условиях. Это давало повод предположить возможность образования лактата свинца в поте.

Для исследования возможности и механизмов проникновения микро- и наночастиц свинца в организм через кожу проведён ряд экспериментов, связанных с исследованием способности частиц свинца проникать в организм через поверхность кожи ладоней рук. При этом принято во внима-

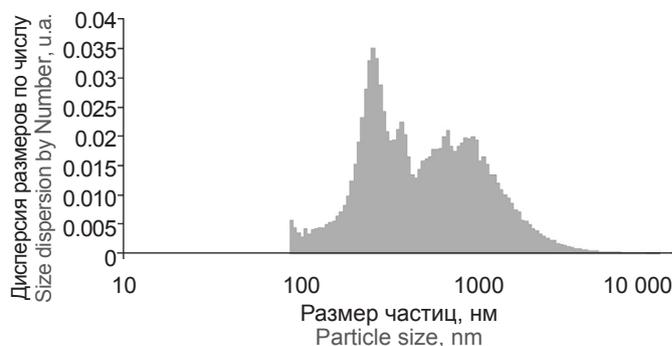


Рис. 2. Дисперсный состав частиц, содержащихся в смывах с ладоней, загрязнённых свинцом (после 10 мин контакта со свинцом и последующей 20-минутной экспозиции).

Fig. 2. Dispersed composition of particles contained in washes from palms contaminated with lead. (After 10 minutes of contact with lead and the next 20 minutes of exposure).

ние, что ороговевший слой эпителия играет важную роль в защите кожи от загрязнения её более глубоких слоёв вредными веществами и микроорганизмами.

Если учесть, что межклеточные промежутки эпидермиса у здорового человека колеблются в пределах 15–20 нм, предполагалось, что наночастицы размером менее 20 нм, возможно, могут проникать в организм человека и представлять опасность для его здоровья. Поэтому представлялось важным установить возможность образования наночастиц размером менее 20 нм. Вместе с тем считалось, что более важным обстоятельством является возможность проникновения микрочастиц свинца в потовые железы, диаметр которых достигает 30–35 мкм.

Для проверки предположений проводили предварительную очистку поверхности кожи рук испытуемого от бытовых загрязнителей. После этого в течение 10 мин осуществляли контаминацию ладоней свинцом с последующей 20-минутной экспозицией. При помощи оптической микроскопии в смывах с поверхностей ладоней обнаружены частицы размером от 5 до 10 мкм.

Одновременные аналогичные исследования дисперсного состава частиц (рис. 2), проведённые на приборе Analysette 12 Dyna Sizer, который предназначен для определения в ней дисперсного состава микро- и наночастиц, показали, что в суспензии присутствовали частицы наноразмеров (около 100 нм), а также микрочастицы размером до 10 мкм). Таким образом, возникло предположение, что существует вероятность проникновения наночастиц свинца в организм через потовые железы кожи. Вместе с тем установлено, что частицы свинца таких размеров не могут проникать в организм человека через межклеточные промежутки эпидермального эпителия.

Также проведены исследования способности частиц свинца различной дисперсности проникать при более длительном загрязнении кожи человека в её более глубокие участки. Установлено, что дисперсный состав частиц свинца в смывах с кожи рук после 6-часовой экспозиции с момента загрязнения существенно отличается от дисперсного состава смывов после 20-минутной экспозиции (рис. 3). Установлено, что после 6-часовой экспозиции в смывах с поверхности кожи ладоней содержится значительно меньше частиц размером менее 5 мкм, чем в смывах после 20-минутной экспозиции. Это даёт основания предположить, что более мелкие частицы на протяжении 6 ч смогли проникнуть в более глубокие слои эпидермиса. Учитывая, что размер выводных протоков потовых желёз, как уже отмечалось, достигает 30–35 мкм, можно предположить, что большинство микро-частиц свинца накапливается именно в них, а не в межкле-



Рис. 3. Дисперсный состав частиц свинца в смывах с ладоней после 10-минутной их контаминации свинцом и последующей 6-часовой экспозиции.

Fig. 3. The dispersion of lead particles in the washes from the palms after 10 minutes of their contamination with lead and the subsequent 6-hour exposure.

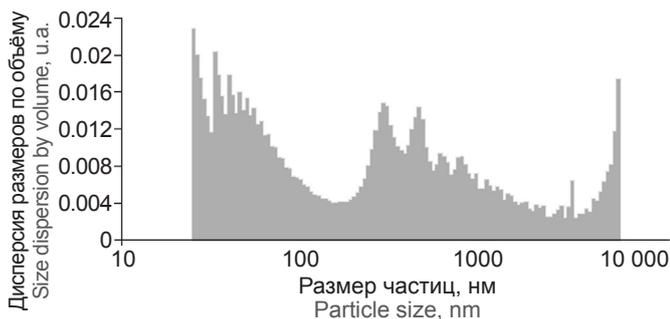


Рис. 4. Дисперсный состав частиц, выделившихся с потом из потовых желёз ладоней рук, одетых в медицинские перчатки, после 30-минутной экспозиции их в воде с температурой 50 °С.

Fig. 4. Dispersed composition of particles released with sweat from the sweat glands of the palms of their hands, wearing medical gloves, after a 30-minute exposure to them in water with a temperature of 50 °C.

точных промежутках эпидермиса, размеры которых меньше размеров указанных частиц.

Как уже отмечалось, в состав человеческого пота входит молочная кислота, причём её содержание в поте зависит от её концентрации в мышцах и соответственно в крови. В свою очередь количество молочной кислоты в мышцах в значительной степени зависит от величины и характера физической нагрузки. Больше всего её образуется в мышцах при выполнении физической нагрузки большой интенсивности в анаэробных условиях. Всё это даёт основания предположить, что при увеличении физических нагрузок свинец может проникать в организм во всё больших количествах через потовые железы в виде лактата свинца.

Известно, что процесс взаимодействия частиц свинца с молочной кислотой в потовых железах происходит медленно (особенно при низких концентрациях молочной кислоты). Таким образом, в железах одновременно с образованием лактата свинца происходит процесс постепенного уменьшения размера микрочастиц. В конечном итоге это должно привести к образованию частиц наноразмерного диапазона. Следовательно, можно предположить, что микрочастицы в потовых железах являются потенциально опасными источниками наночастиц.

Для подтверждения этого предположения провели следующий эксперимент. Руки, которые были загрязнены свинцом, подвергали последующей экспозиции в течение 6 ч.

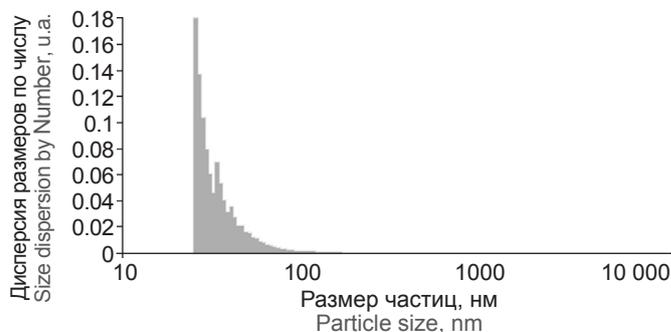


Рис. 5. Дисперсный состав частиц, выделившихся с потом из потовых желёз ладоней рук после бега на месте со средней интенсивностью и последующей 30-минутной экспозиции рук, одетых в медицинские перчатки, в воде с температурой 50 °С.

Fig. 5. Dispersed composition of particles released with sweat from the sweat glands of the palms of hands after running in place with medium intensity and the subsequent 30-minute exposure of hands dressed in medical gloves in water with a temperature of 50 °C.

Вслед за этим они были тщательно вымыты. Качество очистки ладоней рук от свинца подтверждено лабораторными исследованиями. После этого руки в стерильных медицинских перчатках находились в воде с температурой 45–55 °С в течение времени, необходимого для образования в перчатках капель пота в количестве, достаточном для проведения исследований.

Дисперсный анализ этих частиц показал, что в основном они представлены размерами в диапазоне 45–800 нм (рис. 4).

Способность микрочастиц свинца уменьшаться в процессе химических реакций в потовых железах до наночастиц ещё меньших размеров после интенсивной физической нагрузки определяли вышеописанным способом с той лишь разницей, что испытуемый перед погружением ладоней в резиновых перчатках в тёплую воду выполнял беговые упражнения средней интенсивности в условиях образования кислородного долга, что способствовало накоплению в мышцах, крови и поте молочной кислоты. Беговые упражнения проводили 2 раза по 3 мин с интервалом 10 мин. На рис. 5 видно, что в поте находятся лишь частицы размером менее 100 нм.

Обсуждение

Таким образом, установлено, что при контаминации кожи свинцом возможно проникновение его микрочастиц в потовые железы. Под действием пота, и прежде всего находящейся в его составе молочной кислоты, микрочастицы свинца образуют растворимый лактат свинца. Одновременно, уменьшаясь в размерах, они превращаются в наночастицы, которые в дальнейшем могут проникать в организм различными способами. Интенсивность этих процессов зависит от количества молочной кислоты в поте, из чего следует, что интенсивные физические нагрузки способствуют проникновению свинца в организм человека.

Учитывая, что на предприятиях, где производится плавка свинца, в воздух рабочей зоны попадают его микро- и наночастицы, существует возможность проникновения свинца в организм через всю поверхность кожи тела. И хотя это происходит в значительно меньшей мере, чем при дыхании, тем не менее это также следует принимать во внимание.

Заключение

Существуют транскутанные механизмы проникновения свинца в организм человека.

Транскутано свинец попадает в организм в виде наночастиц и растворимых соединений.

Интенсивные физические нагрузки способствуют проникновению свинца в организм.

Литература

(п.п. 2–6, 8–11 см. References)

1. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2009.
7. Набережнов А.А., Совестнов А.Е., Фокин А.В. Особенности кристаллической структуры индия и свинца в условиях ограниченной геометрии. *Журнал технической физики*. 2011; 81(5): 49–54.
12. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение, свойства. Available at: <https://magneticliquid.narod.ru/authority/437.htm>
13. Александрова А.В. Размеры наночастиц и их фармакологическая активность. *Успехи современного естествознания*. 2014; (6): 97–8.
14. Сарапульцев А.П., Ремпель С.В., Кузнецова Ю.В., Сарапульцев Г.П. Взаимодействие наночастиц с биологическими объектами. *Вестник Уральской медицинской академической науки*. 2016; (3): 97–111. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2016-15-3-97-111>
15. МВВ 081-12/05-98. Методика выполнения измерений содержания Cd, Pb, Cu в водных растворах инверсионными электрохимическими методами. СПб.; 1995.

References

1. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies [Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii]*. Moscow: Fizmatlit; 2007. (in Russian)
2. Gusev A.I., Rempel A.A. *Nanocrystalline Materials*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing; 2004.
3. Didenko Yu.T., Suslick K.S. Chemical aerosol flow synthesis of semiconductor nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* 2005; 127(35): 12196–7. <https://doi.org/10.1021/ja054124t>
4. Magnusson M.H., Deppert K., Malm J.O., Bovin J.O., Samuelson L. Gold nanoparticles: production, reshaping, and thermal charging. *J. Nanopart. Res.* 1999; 1(2): 243–51. <https://doi.org/10.1023/A:1010012802415>
5. Mortensen L.J., Oberdörster G., Pentland A.P., Delouise L.A. *In vivo* skin penetration of quantum dot nanoparticles in the murine model: the effect of UVR. *Nano Lett.* 2008; 8(9): 2779–87. <https://doi.org/10.1021/nl801323y>
6. Lilley S.G., Florence T.M., Stauber J.L. The use of sweat to monitor lead absorption through the skin. *Sci. Total. Environ.* 1988; 76(2–3): 267–78. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(88\)90112-x](https://doi.org/10.1016/0048-9697(88)90112-x)
7. Naberezhnov A.A., Sovestnov A.E., Fokin A.V. Crystal structure of indium and lead under confined geometry conditions. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2011; 56(5): 637–41.
8. Laug E.P., Kunze F.M. The Penetration of Lead through the Skin. *J. Ind. Hyg. Toxicol.* 1948; 30(4): 256–9.
9. Filon F.L., Boeniger M., Maina G., Adami G., Spinelli P., Damian A. Skin absorption of inorganic lead (PbO) and the effect of skin cleansers. *J. Occup. Environ. Med.* 2006; 48(7): 692–9. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000214474.61563.1c>
10. Florence T.M., Lilley S.G., Stauber J.L. Skin absorption of lead. *Lancet*. 1988; 2(8603): 157–8. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(88\)90702-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(88)90702-7)
11. Sun C.C., Wong T.T., Hwang Y.H., Chao K.Y., Jee S.H., Wang J.D. Percutaneous absorption of inorganic lead compounds. *AIHA J. (Fairfax, Va)*. 2002; 63(5): 641–6. <https://doi.org/10.1080/15428110208984751>
12. Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B., Yurkov G.Yu. Magnetic nanoparticles: preparation methods, structure, properties. Available at: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/437.htm> (in Russian)
13. Александрова А.В. The size of the nanoparticles and their pharmacological activity. *Uspеkhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014; (6): 97–8. (in Russian)
14. Sarapul'tsev A.P., Rempel' S.V., Kuznetsova Yu.V., Sarapul'tsev G.P. Nanoparticle's interactions with biological objects (the review). *Vestnik Ural'skoy meditsinskoy akademicheskoy nauki*. 2016; (3): 97–111. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2016-15-3-97-111> (in Russian)
15. МВВ 081-12/05-98. Method of measuring the content of Cd, Pb, Cu in aqueous solutions by inversion electrochemical methods. St. Petersburg; 1995. (in Russian)