



Лисецкая Л.Г.

Уровни экспозиции алюминием у работников электролитического производства

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Установлено, что профессиональное воздействие алюминия ведёт к накоплению металла в тканях и создаёт риск функционального нарушения центральной нервной системы.

Цель работы — оценка внешней и внутренней экспозиции работников в условиях современного электролитического производства алюминия.

Материалы и методы. Проанализировано 250 измерений фотометрическим методом среднесменной концентрации оксида алюминия на различных стадиях технологического процесса. Концентрацию алюминия в моче работников определяли атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией.

Результаты. Концентрация оксида алюминия в корпусах с технологией необожжённых анодов составляла от 0,59 до 17,95 мг/м³. Превышение ПДК наблюдалось на рабочем месте электролизника (10% проведённых измерений), анодчика (40%), крановщика (50%). В корпусах, где применялась современная технология с предварительно обожжёнными анодами (ТОА), концентрация оксида алюминия во всех измерениях не превышала ПДК. Наиболее высокая экскреция алюминия наблюдалась у рабочих, использовавших традиционную технологию самообжигающихся анодов Содерберга (ТСА). Концентрация алюминия в моче электролизников составляла $279,43 \pm 26,50$ мкг/дм³, анодчиков — $1331,16 \pm 99,54$ мкг/дм³, машинистов штырьвого крана — $24,64 \pm 3,18$ мкг/дм³. В профессиональных группах, применявших ТОА, элиминация алюминия у операторов АППА на ваннах составляла $105,62 \pm 25,48$ мкг/дм³, у операторов АППА на анодных рамах — $153,53 \pm 78,19$ мкг/дм³, а у операторов АППА на кране — $115,53 \pm 40,27$ мкг/дм³. Была построена трендовая модель зависимости концентрации алюминия в моче рабочих от концентрации диоксида алюминия в воздухе, имеющая вид экспоненциальной кривой. Перегиб кривой начинается с концентрации диоксида алюминия в воздухе примерно 4,2 мг/м³.

Ограничения исследований. Исследование лимитировано числом обследованных работников, проходивших периодический медицинский осмотр.

Заключение. Результаты биомониторинга показали, что у рабочих основных профессий элиминация алюминия с мочой отражает уровень воздействия токсиканта. Рассчитано уравнение зависимости концентрации алюминия в моче от концентрации диоксида алюминия в воздухе.

Ключевые слова: алюминий; экскреция с мочой; рабочие алюминиевого производства

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований» (протокол заседания № 6 от 15.11.2023 г.), проведено согласно общепринятым научным принципам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (ред. 2013 г.).

Для цитирования: Лисецкая Л.Г. Уровни экспозиции алюминием у работников электролитического производства. Гигиена и санитария. 2024; 103(9): 967–972. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-967-972> <https://elibrary.ru/lwedxw>

Для корреспонденции: Лисецкая Людмила Гавриловна, e-mail: lis_lu154@mail.ru

Благодарность. Автор выражает благодарность доктору мед. наук, профессору Шаяхметову С.Ф. за организацию исследований на предприятии алюминиевой промышленности.

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

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 20.08.2024 / Принята к печати: 23.09.2024 / Опубликовано: 16.10.2024

Lyudmila G. Lisetskaya

Aluminum exposure levels in workers at electrolytic production

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Occupational exposure to aluminum has been established to lead to accumulation of metal in tissues and create a risk of functional impairment in the central nervous system.

The aim of the work was to assess the levels of external and internal aluminum exposure in workers at the electrolytic production of aluminum under modern occupation conditions.

Materials and methods. Two hundred fifty measurements of the average shift aluminum oxide concentration were analyzed at various stages of the technological process. The urine aluminum concentration was determined by the atomic absorption method.

Results. The aluminum oxide concentration in the housings with the unbaked anode technology varied from 0.59 to 17.95 mg/m³. The MPC was exceeded at the electrolyzer workplace in 10% of measurements, the anode maker — in 40%, and the crane operator — in 50%. In housings with a baked anode, the aluminum oxide concentration in all measurements did not exceed the MPC. The highest aluminum emission was observed in occupational groups associated with unbaked anodes. A trend model was constructed for the dependence of urine aluminum concentration on the aluminum dioxide level in the air, which has the form of an exponential curve. The bend in the curve begins with an air aluminum dioxide content of about 4.2 mg/m³.

Limitations. The study is limited by the number of examined workers who underwent periodic medical examination.

Conclusion. The results of biomonitoring showed the elimination of aluminum with urine to reflect the level of exposure to the toxicant. The equation of the dependence of the urine aluminum concentration on the air aluminum dioxide level was calculated.

Keywords: aluminum; urinary excretion; aluminum workers

Compliance with ethical standards. The study was approved by the local ethical committee of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research (meeting protocol No. 6 dated 15.11.2023), and the Helsinki Declaration of the World Medical Association (as amended 2013) was carried out.

For citation: Lisetskaya L.G. Aluminum exposure levels in workers at electrolytic production. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(9): 967–972. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-967-972> <https://elibrary.ru/lwedxw> (In Russ.)

For correspondence: Lyudmila G. Lisetskaya, E-mail: lis_lu154@mail.ru

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Acknowledgment. The author expresses gratitude to Salim F. Shayakhmetov, MD, PhD, DSci., professor, for managing research at an aluminum industry enterprise.

Received: August 8, 2024 / Accepted: September 23, 2024 / Published: October 16, 2024

Введение

Алюминий (Al) является самым распространённым металлом на планете. Его доля в земной коре составляет 8,1%, и он повсеместно встречается в окружающей среде. Этот элемент присутствует в питьевой воде, продуктах питания, в некоторых фармпрепаратах, следовательно, поступает в организм большинства людей, что отражается на фоновом уровне содержания в тканях. Al относится к неэссенциальным элементам, в норме количество его в организме невелико. Токсичность алюминия связана с его антагонизмом по отношению к кальцию и магнию, а также способностью легко связываться с белками и накапливаться в почках, костях, нервной ткани [1]. Установлено, что профессиональное воздействие алюминия ведёт к накоплению металла в тканях и создаёт риск функционального нарушения центральной нервной системы [2]. Исследования производства порошкового алюминия показали, что длительное ингаляционное воздействие алюминия может вызвать фиброз лёгких, ухудшение когнитивных функций и более широкую распространённость неврологических симптомов [3]. В ряде исследований доказана связь между тонкими неврологическими нарушениями и воздействием аэрозоля металлического алюминия или его нерастворимых соединений на рабочих алюминиевых производств [4]. Механизмы нейротоксичности, вызываемой алюминием, ещё не полностью выяснены. Было выявлено, что воспалительная нейродегенерация приводит к усилению амилоидогенеза, дефициту нейротрофической передачи сигналов и синаптогенеза, а также к нарушению саморегуляции цитоплазмы и паренхимы клеток головного мозга [5]. При хроническом аэрогенном воздействии в регионе с развитой алюминиевой промышленностью у детей установлено повышенное выведение алюминия с мочой, нарушение процесса ремоделирования костей с преобладанием процесса резорбции, что явилось причиной повышенной частоты патологий опорно-двигательного аппарата [6]. У детей, проживающих в зоне влияния предприятия по производству алюминия, чаще встречаются функциональные расстройства нервной системы, болезни органов дыхания, костно-мышечной системы [7, 8]. Белковые маркёры плазмы крови, идентифицированные при экспозиции соединениями алюминия, свидетельствуют о снижении активности гуморального звена иммунитета. Это выражается экспрессией J-цепи иммуноглобулина и нарушением тонуса сосудистой стенки при экспрессии Кельх-подобного белка 4 [9–11]. У взрослых жителей селитебной территории вблизи алюминиевого производства чаще диагностируются сердечно-сосудистые патологии по сравнению с контрольными группами [12]. Нейрокогнитивные эффекты отмечены у сварщиков, экспонированных алюминием [13, 14]. В качестве индикаторов избыточной аэрогенной экспозиции соединениями алюминия предложены показатели протеинового профиля – уровень белков, принимающих участие в апоптозе [15].

Обследования рабочих, подвергающихся воздействию алюминия, подтвердили, что неоднократное ингаляционное воздействие может привести к значимому увеличению содержания алюминия в моче и сыворотке крови по сравнению с контрольной группой. Эти данные указывают на то, что перенос алюминия в системный кровоток происходит либо непосредственно из лёгких, либо опосредованно через желудочно-кишечный тракт после удаления из лёгких путём мукоцилиарного транспорта [16]. Адекватные количественные данные о проникновении и абсорбции после кожного воздействия металлического алюминия и пыли оксидов отсутствуют. Малорастворимые соединения алюминия в микро- и наноразмерных формах обнаруживают только в верхних слоях рогового слоя кожи [17, 18].

По данным Американской ассоциации государственных промышленных гигиенистов (ACGIH), разработка пороговых значений содержания алюминия в биологических субстратах (TLV_s) и индекса биологического воздействия (BEL_s)

в настоящее время невозможна из-за недостатка научных данных. Поскольку Al представляет серьёзный риск для здоровья работников, необходимы экспериментальные исследования соотношения биологического индикатора и риска для здоровья [19].

Цель работы – оценка уровней внешней и внутренней экспозиции алюминием у работников электролитического производства в современных условиях.

Материалы и методы

Исследования проводили на заводе, входящем в корпорацию СУАЛ и осуществляющем электролитическое разложение глинозёма с получением первичного алюминия. В электролизном цехе и большей части производственных корпусов применяется традиционная технология самообжигающихся анодов Содерберга (ТСА). Кроме того, в двух реконструированных корпусах внедрена современная технология с предварительно обожжёнными анодами (ТОА), позволяющая существенно уменьшить загрязнение воздушной среды и улучшить условия труда.

Внешнее воздействие алюминия на организм работников электролизного цеха определяли по результатам специальной оценки условий труда и собственным исследованиям. Концентрацию алюминия определяли фотометрическим методом*. Всего проанализировано 250 измерений средней концентрации оксида алюминия на различных стадиях технологического процесса.

Для изучения экскреции алюминия с мочой были сформированы группы работников основных профессий электролизного цеха и вспомогательной профессии производства алюминия (аппаратчик фторсолей). Отбор биологического материала осуществляли во время периодического медицинского осмотра. В качестве сравнения была исследована экскреция алюминия у работников, не связанных с производством и обработкой содержащих алюминий материалов. В первую группу сравнения вошли работники сельскохозяйственного акционерного общества (СХАО), во вторую – аппаратчики химических реактивов производства металлического калия (ПМК). Характеристика обследованных работников представлена в табл. 1.

Для анализа использовали мочу работников, проходящих профилактический медицинский осмотр через 1–2 дня после непосредственного воздействия алюминия на организм в производственных условиях.

Концентрацию алюминия в моче определяли атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией на спектрометре AAC DUO (Agilent, США). Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с помощью программ Microsoft Excel и Statistica 6.1. Для проверки нормальности распределения количественных показателей использовали критерий Шапиро – Уилка. Рассчитывали медианные значения (*Me*) и квартилей (25 и 75). Статистические различия оценивали с помощью критерия Крускала – Уоллиса.

Результаты

Мониторинг окружающей среды. На рис. 1 отражены концентрации оксида алюминия в воздухе электролизного цеха алюминиевого завода, воздействующие на различные профессиональные группы. Концентрация оксида алюминия в корпусах с ТСА варьировала от 0,59 до 13,79 мг/м³ (ПДК 6 мг/м³). Превышение ПДК наблюдалось на рабочем месте электролизника в 14% проведённых измерений, анодчика – в 40%, крановщика – в 50%. Диапазон 25-го и 75-го квартилей среднесменной концентрации Al₂O₃ в воздухе рабочей зоны на рабочем месте электролизника – 3,1–5,05 мг/м³, анодчика – 3,09–7,02 мг/м³, машиниста

* МУК 4.1.2466–09 Измерение массовой концентрации алюминия и диалюминия триоксида (оксида алюминия) в пыли взрывчатых веществ воздуха рабочей зоны методом фотометрии.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика обследованных работников
Characteristics of the examined workers

Производство Production	Профессия Occupation	Кол-во проб Number of samples	Возраст, лет Age, years	Стаж работы, лет Work experience, years
Производство алюминия, электролизный цех ТСА Aluminum production, Electrolysis department with unbaked anode technology	Электролизник / Electrolyzer	40	37.2 ± 0.9	10.1 ± 1.2
	Анодчик / Anode operator	27	36.4 ± 1.5	10.1 ± 1.7
	Машинист штырьевого крана Pin crane operator	16	38.2 ± 2.1	9.2 ± 1.3
Производство алюминия, электролизный цех ТОА Aluminum production, Electrolysis department with baked anode technology	Оператор на ванне / Bath operator	20	40.5 ± 1.6	11.2 ± 1.6
	Оператор на анодной раме Anode frame operator	7	36.6 ± 0.9	13.1 ± 1.9
	Оператор на кране / Crane operator	10	37.5 ± 1.8	10.2 ± 0.6
Производство алюминия, вспомогательное отделение Aluminum production, auxiliary department	Аппаратчик фторсолей Fluoride salts operator	10	42.9 ± 2.9	18.3 ± 2.5
Сельскохозяйственное предприятие (СХАО) Agricultural enterprise	Слесари-ремонтники, станочники, электромонтёры Repairmen, machine operators, electricians	28	48.8 ± 1.8	16.8 ± 3.6
Производство металлического калия (ПМК) Production of metallic potassium	Аппаратчик производства химических реактивов Chemical reagents production operator	25	40.5 ± 1.7	15.1 ± 1.9

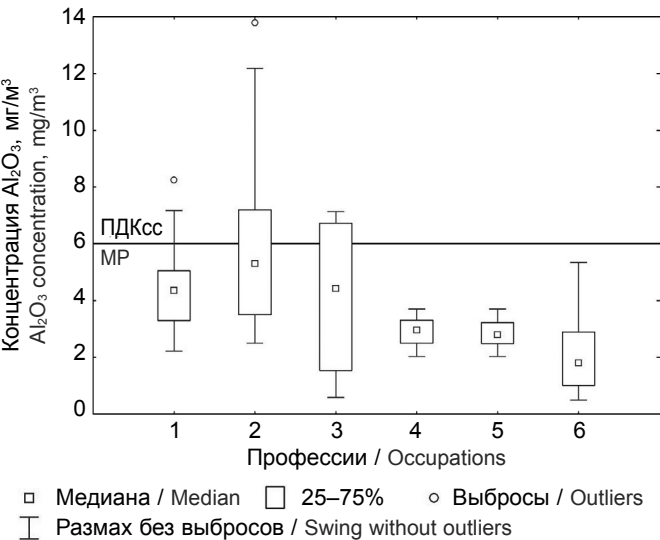


Рис. 1. Внешняя экспозиция Al_2O_3 у различных профессиональных групп.
Профессии: 1 – электролизник; 2 – анодчик; 3 – машинист штырьевого крана; 4 – оператор на ванне; 5 – оператор на анодной раме; 6 – оператор на кране.
Fig. 1. External exposure to Al_2O_3 in different occupational groups.
Occupations: 1 – electrolysis worker; 2 – anode worker; 3 – crane manipulator; 4 – electrolysis operator; 5 – anode operator; 6 – crane operator.

крана – 2,47–7,84 мг/м³. В корпусах с ТОА при работе оператора на ванне среднесменная концентрация аэрозоля Al_2O_3 составляла 1,37–1,9 мг/м³, оператора по обслуживанию анодов – 0,53–1,83 мг/м³, оператора по обслуживанию крана – 0,87–3,41 мг/м³. В корпусах с ТОА концентрация оксида алюминия во всех измерениях не превышала ПДК. Статистически значимой была разница в загрязнении рабочих мест у электролизников с анодчиками ($p < 0,05$), операторами на ванне ($p < 0,01$), операторами на анодах ($p < 0,003$), операторами на кране ($p < 0,001$).

Биологические показатели. Наиболее высокая экскреция алюминия с мочой наблюдалась у рабочих в профес-

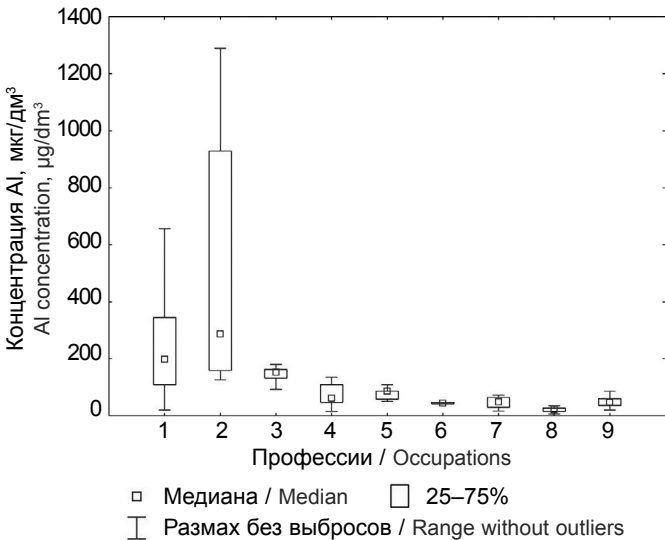


Рис. 2. Содержание алюминия в моче рабочих различных профессиональных групп.
Профессии: 1 – электролизник; 2 – анодчик; 3 – машинист штырьевого крана; 4 – оператор на ванне; 5 – оператор на анодной раме; 6 – оператор на кране; 7 – аппаратчик фторсолей; 8 – рабочие сельскохозяйственного предприятия; 9 – рабочие производства металлического калия.
Fig. 2. Aluminum content in the urine of workers of different occupational groups. Occupations: 1 – electrolysis worker; 2 – anode worker; 3 – crane manipulator; 4 – electrolysis operator; 5 – anode operator; 6 – crane operator; 7 – fluoride salt operators; 8 – workers of an agricultural enterprise; 9 – workers in the production of metallic potassium.

сиональных группах, связанных с ТСА. У электролизников медиана концентрации составляла 194,5 мкг/дм³, величины 1-го и 3-го квартилей достигали 103,5 и 335,6 мкг/дм³. В группе анодчиков медиана концентрации алюминия в моче составили 294,8 мкг/дм³, 1-й и 3-й квартили – 165,9 и 956,7 мкг/дм³. У машинистов штырьевого крана – 152,4 и 132,4–153,9 мкг/дм³ соответственно. В профессиональных группах с ТОА медиана концентрации алюминия в моче колебалась от 15,2 до 123,4 мкг/дм³. У операторов АППА на ваннах медианное значение составляло 61,8 мкг/дм³ (48,2–101,6 мкг/дм³), у операторов АППА на анодных рамах – 86,4 мкг/дм³ (58,9–86,5 мкг/дм³), а у операторо-

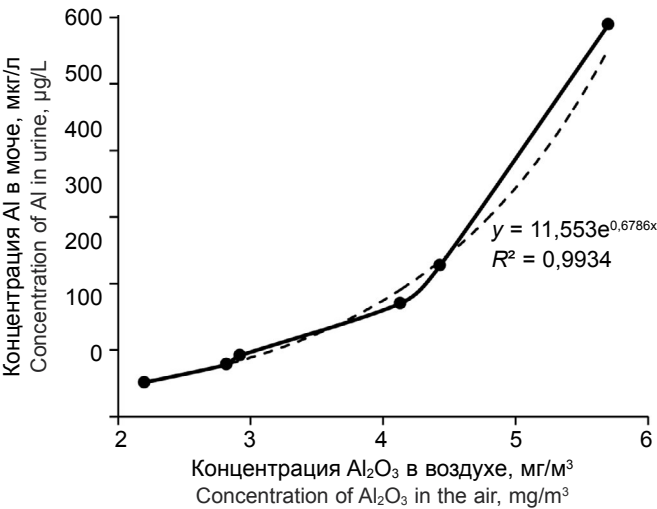


Рис. 3. Зависимость содержания алюминия в моче от внешней экспозиции.
Fig. 3. Dependence of aluminum content in urine on external exposure.

ров АППА на кране – 43,9 мкг/дм³ (42,5–46,9 мкг/дм³). В группе операторов фторсолей медианное значение было равно 48,5 мкг/дм³ (31,9–62,9 мкг/дм³). Экскреция алюминия в первой и второй группах сравнения составляла 22,01 и 47,1 мкг/дм³ (15,8–25,8 и 36,5–59,4 мкг/дм³) соответственно. В группах сравнения концентрация алюминия в моче колебалась незначительно, что указывает на невысокие уровни внутреннего воздействия (рис. 2). Рассчитанный критерий Крускала – Уоллеса показал уровень статистической значимости межгрупповой разницы < 0,001.

Регрессионный анализ. На основании полученных результатов была построена трендовая модель зависимости концентрации алюминия в моче от концентрации диоксида алюминия в воздухе (рис. 3). Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 показал степень соответствия экспоненциальной модели исходным данным.

Обсуждение

Среди неблагоприятных последствий воздействия алюминия на здоровье одной из наиболее чувствительных целей и наиболее критичной конечной точкой является нейротоксичность [4]. Пары металлического алюминия и оксид алюминия умеренно растворимы в воде, и поэтому всасы-

вание вдыхаемых частиц алюминия из лёгких невелико. На основе оценки содержания алюминия в воздухе и экскреции его с мочой фракционная абсорбция оценивалась на уровне 1,5–2% [20]. Al депонируется в костях, печени, лёгких и сером веществе головного мозга. С возрастом содержание этого элемента в лёгких и головном мозге увеличивается. Алюминий выводится из организма с мочой, калом, потом и выдыхаемым воздухом [1]. Для биологического мониторинга может быть рекомендовано определение концентрации алюминия в моче, так как он выводится преимущественно почками. В Германии пороговое значение содержания Al составляет 220 мкг/л [16]. Для оценки внутренней экспозиции алюминием нами был использован анализ однократных проб мочи, поскольку, по данным Y.J. Gitelman, в случае длительного профессионального воздействия время отбора проб имеет второстепенное значение при определении нагрузки на организм [21]. Этот вывод подтверждён исследованием В. Rossbach с соавт. [16]. Такой подход объясняется длительным периодом полураспада соединений алюминия в организме человека. После ингаляционного отложения в лёгких частиц, содержащих алюминий, длительный период полувыведения алюминия способствует медленной резорбции (от нескольких дней до месяцев и даже лет) [22].

Экскреция алюминия у работников вспомогательной профессии и в группах сравнения находится на уровне неэкспонированного населения различных территорий. В табл. 2 представлено сравнение содержания алюминия в моче для различных категорий населения (по литературным данным).

Сравнение полученных нами результатов с литературными данными показывает, что содержание алюминия в моче работников электролитического производства при использовании ТОА в 2–6 раз выше, чем у неэкспонированного населения, и в 1,5–3 раза выше, чем у представителей экспонированных групп. Содержание алюминия в моче работников электролитического производства при использовании ТСА в 7–22 раза выше по сравнению с неэкспонированным населением и в 5–11 раз превышает аналогичный показатель экспонированного.

Производственные корпуса с различными технологиями электролиза отличались друг от друга не только по концентрации алюминия в воздухе, но и по его гранулометрическим характеристикам. Ранее нами были исследованы пробы пылегазового аэрозоля на рабочих местах в алюминийевом производстве. С помощью электронной микроскопии было выявлено, что взвешенная в воздухе пыль представлена частицами кристаллической и сферической формы, из которых 95% имеют размеры до 10 мкм и 46% – менее 0,5 мкм [26]. Рентгеноструктурный анализ показал, что основными компонентами пылевых частиц являются алюминий и фтор.

Таблица 2 / Table 2

Содержание алюминия в моче неэкспонированного и экспонированного взрослого населения различных территорий, мкг/дм³
Urine aluminum content in unexposed and exposed adult population of different territories, $\mu g/dm^3$

Территория Territory	Группа населения Population group	Представление результатов / Presentation of results	
		медиана / median	диапазон / range
Финляндия [23] Finland	НЭ / UnE	8.9	1.9–22.1
	Э, сварщики / E, welders	37.8	29.2–55.1
Германия [16] Germany	НЭ / UnE	29.3	2.4–30.8
	Э, сварщики / E, welders	19.4	1.4–159.4
Россия [24] Russia	Э, рабочие завода по получению бериллия E, workers at a beryllium plant	54.7	10.5–223
США [21] USA	Э, рабочие завода по получению глинозёма E, workers at an alumina plant	18.3	17.1–20.1
Россия [25] Russia	НЭ, жители города с предприятием по производству алюминия UnE, Residents of the city with an aluminum production plant	22	6.2–104

Примечание. НЭ – неэкспонированные; Э – экспонированные.
Note: UnE – unexposed; E – exposed.

При ТСА отмечен больший процент частиц с содержанием алюминия в респираторной форме, что проявилось в биологической реакции на воздействие токсиканта. Размер частиц, растворимость в воде и процессы выведения влияют на всасывание алюминия после его отложения в лёгких [27]. У рабочих предприятия по производству первичного алюминия при проведении анализа альвеолярной жидкости и лёгочной ткани с помощью трансмиссионного электронного микроскопа были идентифицированы частицы алюминия через четыре года после прекращения воздействия [28].

В нашем исследовании все группы были сопоставимы по возрасту (в среднем 37,7 года). Продолжительность воздействия на работников металлургического предприятия была многолетней, со средним значением 10,6 года для групп с неизменным и высоким уровнем экспозиции. Значительное увеличение экскреции алюминия было обнаружено в группе высокого воздействия. У рабочих, занятых в производстве с технологией ТООА и на вспомогательных работах, концентрация алюминия в моче практически не отличалась от групп сравнения. Концентрации алюминия в воздухе и моче были определены связанными. Рассчитанное нами уравнение характеризует зависимость уровня экспозиции и биологического эффекта. Полученная трендовая модель имеет вид экспоненциальной кривой. Перегиб экспоненциальной кривой наблюдается при среднесменной концентрации диоксида алюминия в воздухе рабочей зоны 4,2 мг/м³, что ниже ПДК_{сс} (6 мг/м³). Нелинейный характер зависимости биологического эффекта от внешней экспозиции связан со сложным характером метаболизма частиц алюминия в организме.

Оценка зависимости «доза — эффект» является этапом оценки экспозиции и в последующем характеристики риска. Выявление корреляций между физиологическими параметрами и уровнем воздействия может служить обоснованием новых биомаркёров эффекта, что позволит более точно оценивать величину экспозиции для определения реального риска, выявления лиц с повышенным индивидуальным риском и ранними признаками интоксикации.

Ограничения исследования. Исследование лимитировано числом обследованных работников, проходивших периодический медицинский осмотр, а также определением общего содержания металла без учёта формы его химических соединений.

Заключение

Исследования показали, что на предприятии по электролитическому производству алюминия, использующем технологию самообжигающихся анодов, наблюдается значительный уровень загрязнения воздушной среды соединениями алюминия. Реконструкция и внедрение более современной технологии с предварительным обожжёнными анодами (ТООА) существенно уменьшили загрязнение воздушной среды и улучшили условия труда. Результаты биомониторинга показали, что у рабочих основных профессий элиминация алюминия с мочой отражает уровень воздействия токсиканта. По результатам оценки полученной кривой рассчитано уравнение зависимости концентрации алюминия в моче от концентрации диоксида алюминия в воздухе.

Литература

(п.п. 1–5, 13, 14, 16–24, 27, 28 см. References)

- Пережогин А.Н., Кольдибекова Ю.В. Анализ негативных эффектов со стороны опорно-двигательного аппарата, обусловленных повышенным выведением алюминия и фтора с мочой у детей. В кн.: *Анализ риска здоровью в современных условиях. Материалы XI межрегиональной научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием. Том I*. Саратов; 2021: 122–4.
- Зайцева Н.В., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Жданова-Заплесвичко И.Г., Пережогин А.Н., Клейн С.В. Оценка аэрогенного воздействия приоритетных химических факторов на здоровье детского населения в зоне влияния предприятий по производству алюминия. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(1): 68–75. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-68-75> <https://elibrary.ru/ywahgx>
- Жданова-Заплесвичко И.Г., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В. Биомаркеры неканцерогенных негативных эффектов со стороны центральной нервной системы у детей в зоне влияния источников выбросов алюминиевого производства. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(5): 461–9. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-5-461-469> <https://elibrary.ru/xtufal>
- Землянова М.А., Зайцева Н.В., Кольдибекова Ю.В., Пережогин А.Н., Степанков М.С., Булатова Н.И. Выявление омик-маркеров негативных эффектов, ассоциированных с аэрогенным комбинированным воздействием соединений алюминия и фтора. *Анализ риска здоровью*. 2022; (1): 123–32. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.13> <https://elibrary.ru/timblr>
- Пескова Е.В., Кольдибекова Ю.В. Оценка изменения протеинового профиля плазмы крови детей, подвергающихся воздействию алюминия и бенз(а)пирена с атмосферным воздухом. В кн.: *Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения. Материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора*. Пермь; 2022: 252–9. <https://elibrary.ru/roqimd>
- Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А., Булатова Н.И., Пустовалова О.В. Идентификация протеомных маркеров негативных эффектов со стороны нейроэндокринной и иммунной систем у детей с повышенным содержанием алюминия и фторид-иона в моче. В кн.: *Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения. Материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора*. Пермь; 2022: 243–8. <https://elibrary.ru/lavavp>
- Зайцева Н.В., Устинова О.Ю., Землянова М.А., Горюев Д.В., Луцкий К.П., Валина С.А. и др. Роль химических факторов риска в развитии сосудистых нарушений у взрослого населения селитебных территорий в зоне влияния предприятий алюминиевого производства. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(11): 8–13. <https://elibrary.ru/ztwslt>
- Аликина И.Н., Долгих О.В., Казакова О.А. Особенности экспрессии иммуномедиаторов при аэрогенной экспозиции алюминия. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(11): 1203–10. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1203-1210> <https://elibrary.ru/tflzsf>
- Уланова Т.С., Вейхман Г.А., Недошитова А.В. Методические особенности и практическое использование определения алюминия в крови и моче методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. *Анализ риска здоровью*. 2019; (4): 165–74. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.18> <https://elibrary.ru/kaltxb>
- Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В. Исследование фракционного и компонентного состава высокодисперсионных частиц пыли в воздухе рабочей зоны алюминиевого производства. *Российские нанотехнологии*. 2018; 13(5-6): 108–12. <https://elibrary.ru/vocmzk>

References

- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease registry). Toxicological profile for aluminum. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2008.
- Fulgenzi A., Vietti D., Ferrero M.E. Aluminium involvement in neurotoxicity. *Biomed. Res. Int*. 2014; 2014: 758323. <https://doi.org/10.1155/2014/758323>
- Kraus T., Schaller K.H., Angerer J., Letzel S. Aluminium dust-induced lung disease in the pyro-powder-producing industry: detection by high-resolution computed tomography. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 2000; 73(1): 61–4. <https://doi.org/10.1007/pl00007939>
- Willhite C.C., Karyakina N.A., Nordheim E., Arnold I., Armstrong V., Momoli F., et al. The REACH registration process: A case study of metallic aluminium, aluminium oxide and aluminium hydroxide. *Neurotoxicology*. 2021; 83: 166–78. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2020.12.004>
- McLachlan D.R.C., Bergeron C., Alexandrov P.N., Walsh W.J., Pogue A.I., Percy M.E., et al. Aluminum in Neurological and Neurodegenerative Disease. *Mol. Neurobiol*. 2019; 56(2): 1531–8. <https://doi.org/10.1007/s12035-018-1441-x>
- Perezhogin A.N., Kildibekova Yu.V. Analysis of negative effects from the musculoskeletal system caused by increased excretion of aluminum and fluoride in urine in children. In: *Analysis of Health Risks in Modern Conditions. Materials of the XI Interregional Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Specialists of Rosпотребнадзор with International Participation. Volume 1 [Анализ риска здоровью в современных условиях. Материалы*

- XI mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Rosпотреbnadzora s mezhdunarodnym uchastiem. Tom II. Saratov; 2021: 122–4. (in Russian)*
7. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V., Zhdanova-Zaplesvichko I.G., Perezhogin A.N., Klein S.V. Evaluation of the aerogenic impact of priority chemical factors on the health of the child population in the zone of the exposure of aluminum enterprises. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(1): 68–75. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-68-75> <https://elibrary.ru/ywahgx> (in Russian)
 8. Zhdanova-Zaplesvichko I.G., Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V. Biological markers of non-carcinogenic negative impacts on the central nervous system of children in the area with exposure to aluminum production emissions. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(5): 461–9. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-5-461-469> <https://elibrary.ru/xtufal> (in Russian)
 9. Zemlyanova M.A., Zaitseva N.V., Kol'dibekova Yu.V., Perezhogin A.N., Stepankov M.S., Bulatova N.I. On detecting omic-markers of negative effects associated with combined aerogenic exposure to aluminum and fluoride compounds. *Analiz riska zdorov'yu*. 2022; (1): 113–22. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.13.eng> <https://elibrary.ru/vhqmmb>
 10. Peskova E.V., Kol'dibekova Yu.V. Assessment of changes in the protein profile of children's blood plasma caused by the air of aluminum and gasoline (a)pyrene with atmospheric air. In: *Fundamental and Applied Aspects of Public Health Risk Analysis. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Specialists of Rosпотреbnadzor [Fundamental'nye i prikladnye aspekty analiza riska zdorov'yu naseleniya. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Rosпотреbnadzora]*. Perm'; 2022: 252–9. <https://elibrary.ru/roqimnd> (in Russian)
 11. Koldibekova Yu.V., Zemlyanova M.A., Bulatova N.I., Pustovalova O.V. Identification of proteomic markers of negative effects from the neuroendocrine and immune systems in children with an increased content of aluminum and fluoride ion in urine. In: *Fundamental and Applied Aspects of Public Health Risk Analysis. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Specialists of Rosпотреbnadzor [Fundamental'nye i prikladnye aspekty analiza riska zdorov'yu naseleniya. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Rosпотреbnadzora]*. Perm'; 2022: 243–8. <https://elibrary.ru/lavavp> (in Russian)
 12. Zaitseva N.V., Ustinova O.Yu., Zemlyanova M.A., Goryaev D.V., Luzhetskii K.P., Valina S.A., et al. Role of chemical risk factors in vascular disorders development in adult residents of populated area influenced by Aluminium production enterprises. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2017; 57(11): 8–13. <https://elibrary.ru/zitwsl> (in Russian)
 13. Giorgianni C.M., D'Arrigo G., Brecciaroli R., Abbate A., Spataro G., Tringali M.A., et al. Neurocognitive effects in welders exposed to aluminium. *Toxicol. Ind. Health*. 2014; 30(4): 347–56. <https://doi.org/10.1177/0748233712456062>
 14. Klotz K., Weistenhöfer W., Neff F., Hartwig A., van Thriel C., Drexler H. The health effects of aluminum exposure. *Dtsch. Arztebl. Int*. 2017; 114(39): 653–9. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2017.0653>
 15. Alikina I.N., Dolgikh O.V., Kazakova O.A. Peculiarities of the expression of immune mediators under aerogenic exposure of aluminum. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(11): 1203–10. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1203-1210> <https://elibrary.ru/tflzsf> (in Russian)
 16. Rossbach B., Buchta M., Csanády G.A., Filser J.G., Hilla W., Windorfer K., et al. Biological monitoring of welders exposed to aluminium. *Toxicol. Lett*. 2006; 162(2–3): 239–45. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2005.09.018>
 17. De Ligt R., van Duijn E., Grossouw D., Bosgra S., Burggraaf J., Windhorst A., et al. Assessment of dermal absorption of aluminum from a representative antiperspirant formulation using a ²⁶Al microtracer approach. *Clin. Transl. Sci*. 2018; 11(6): 573–81. <https://doi.org/10.1111/cts.12579>
 18. Mauro M., Crosera M., Bovenzi M., Adami G., Maina G., Baracchini E., et al. *In vitro* transdermal absorption of Al₂O₃ nanoparticles. *Toxicol. In Vitro*. 2019; 59: 275–80. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2019.04.015>
 19. ACGIH. Threshold Limit Values for chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure indices. Defining the Science of Occupational and Environmental Health; 2020.
 20. Yokel R.S., Sjögren B. Aluminum. Chapter 1. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. Academic press; 2022: 1–22. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04908-4>
 21. Gitelman H.J. Aluminum exposure and excretion. *Sci. Total. Environ*. 1995; 163(1–3): 129–35. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04483-h](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04483-h)
 22. Letzel S., Schaller K.H., Hilla W., Windorfer K., Krauss T. Untersuchungen zur biologischen Halbwertszeit der renalen Aluminiumausscheidung bei Aluminiumsechweibern. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed*. 1999; 34: 456–60. (in German)
 23. Valkonen S., Aitio A. Analysis of aluminium in serum and urine for the biomonitoring of occupational exposure. *Sci. Total. Environ*. 1997; 199(1–2): 103–10. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05485-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05485-5)
 24. Ivanenko N.B., Ivanenko A.A., Solov'yev N.D., Zeimal' A.E., Navolotskii D.V., Drobyshev E.J. Biomonitoring of 20 trace elements in blood and urine of occupationally exposed workers by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 2013; 116: 764–9. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.079>
 25. Ulanova T.S., Veikhan G.A., Nedoshitova A.V. Methodical peculiarities and practice of determining aluminum in blood and urine via mass spectrometry with inductively coupled plasma. *Analiz riska zdorov'yu*. 2019; (4): 165–74. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.18.eng> <https://elibrary.ru/cvuldr>
 26. Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Study of fractional and component composition of high-dispersed dust particles in air of the work area of an aluminum smelter. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2018; 13(5–6): 108–12. <https://doi.org/10.1134/S1995078018030163> <https://elibrary.ru/yuegpb> (in Russian)
 27. Krewski D., Yokel R.A., Nieboer E., Borchelt D., Cohen J., Harry J., et al. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev*. 2007; 10(Suppl. 1): 1–269. <https://doi.org/10.1080/10937400701597766>
 28. Voisin C., Fisekci F., Buclez B., Didier A., Couste B., Bastien F., et al. Mineralogical analysis of the respiratory tract in aluminium oxide-exposed workers. *Eur. Respir. J*. 1996; 9(9): 1874–9. <https://doi.org/10.1183/09031936.96.09091874>

Сведения об авторе

Лисецкая Людмила Гавриловна, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: lis_lu154@mail.ru

Information about the author

Lyudmila G. Lisetskaya, MD, PhD, researcher of the Lab. of analytic ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0876-2304> E-mail: lis_lu154@mail.ru