

Читать
онлайн
Read
online

Панев Н.И., Красильникова П.Л., Коротенко О.Ю., Румпель О.А., Семенова Е.А.

Иммунные механизмы формирования патологии органов дыхания при хронической интоксикации фтором и его соединениями

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний», 654041, Новокузнецк, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Иммунная система чутко реагирует на контакт организма с вредными веществами производственной и окружающей среды. Развитие нарушений клеточного и гуморальных звеньев иммунитета у больных профессиональными болезнями может способствовать усилению инфекционно-воспалительного процесса и прогрессированию патологии.

Материалы и методы. Обследованы работники алюминиевого завода ($n = 121$, мужчины, средний возраст $52,39 \pm 0,37$ года, стаж работы во вредных условиях труда $24,84 \pm 0,39$ года). Проведены физикальные обследования, лабораторная диагностика, включающая общий клинический анализ крови, анализ иммунного статуса, показателей острой фазы воспаления, а также выполнена коагулограмма.

Результаты. У пациентов с сочетанием хронической профессиональной интоксикации соединениями фтора с патологией органов дыхания (хронический бронхит, хроническая обструктивная болезнь лёгких) отмечается формирование иммунной недостаточности гуморального типа: снижение количества В-лимфоцитов ($CD19^+$) и уровня сыровоточного иммуноглобулина G, а также снижение фагоцитарной активности нейтрофилов по сравнению с пациентами с изолированными хронической профессиональной интоксикацией соединениями фтора, патологией органов дыхания, а также с пациентами контрольной группы (длительно работающие в контакте с фтором и его соединениями, не имеющие клинических признаков хронической профессиональной интоксикации соединениями фтора).

Ограничения исследования. Данное исследование лимитировано выборкой работников основных профессий алюминиевой промышленности, находящейся на обследовании в клинике ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний».

Заключение. Выявлены иммунные механизмы формирования патологии органов дыхания (хронический бронхит, хроническая обструктивная болезнь лёгких) у работников алюминиевого производства с хронической профессиональной интоксикацией фтором и его соединениями.

Ключевые слова: болезни органов дыхания; хроническая интоксикация фтором и его соединениями; алюминиевая промышленность; иммунологический статус

Соблюдение этических стандартов. В соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (ред. 2013 г.) все обследуемые ознакомились и подписали информированное согласие на участие в исследовании, протокол которого удовлетворял требованиям биоэтического комитета ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний» (§ 2 протокола заседания № 4 от 18 ноября 2021 г.).

Для цитирования: Панев Н.И., Красильникова П.Л., Коротенко О.Ю., Румпель О.А., Семенова Е.А. Иммунные механизмы формирования патологии органов дыхания при хронической интоксикации фтором и его соединениями. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(4): 450–455. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-4-450-455> <https://elibrary.ru/mmxxtbj>

Для корреспонденции: Коротенко Ольга Юрьевна, e-mail: olgakorotenko@yandex.ru

Вклад авторов: Панев Н.И. — концепция и дизайн исследования, сбор материала, написание текста; Красильникова П.Л. — анализ данных, написание текста; Коротенко О.Ю. — анализ данных, написание текста; Румпель О.А. — сбор материала; Семенова Е.А. — сбор материала. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 17.02.2026 / Поступила после доработки: 02.03.2026 / Принята к печати: 24.03.2026 / Опубликовано: 18.05.2026

Nikolay I. Panev, Polina L. Krasilnikova, Olga Yu. Korotenko, Olesya A. Rumpel, Elena A. Semenova

Immune mechanisms of the formation of respiratory pathology in chronic intoxication with fluorine and its compounds

Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The immune system of the body is sensitive to exposure to harmful substances in the workplace and the environment. The development of disorders of the cellular and humoral compartments of immunity system in patients with occupational diseases can contribute to the intensification of the infectious and inflammatory process and the progression of the disease.

Materials and methods. One hundred twenty one worker at an aluminum plant, men, with an average age of 52.39 ± 0.37 years and 24.84 ± 0.39 years of work experience in hazardous conditions, were examined. All of them underwent physical examinations, laboratory diagnostics, including a general clinical blood test, immune status analysis, acute phase inflammation indices, and a coagulogram.

Results. In patients with a combination of chronic occupational intoxication with fluoride compounds with respiratory pathology the (chronic bronchitis, chronic obstructive pulmonary disease), there is noted the formation of deficiency the humoral immunity manifested by a decrease in the number of $CD19^+$ (B-lymphocytes) and immunoglobulin G serum level, as well as a decline in the phagocytic activity of neutrophils compared with patients with isolated chronic occupational intoxication with fluoride compounds, respiratory pathology, as well as with the control group (who works in contact with fluorine and its compounds for a long time, without clinical signs of chronic occupational intoxication with fluoride compounds).

Limitations. This study is limited to a sample of workers in the main occupations of the aluminum industry who were examined at the Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases.

Conclusion. In workers at aluminum production there have been identified immune mechanisms of the formation of the respiratory pathology (chronic bronchitis, chronic obstructive pulmonary disease) with chronic occupational intoxication with fluorine and its compounds.

Keywords: respiratory diseases; chronic intoxication with fluorine and its compounds; aluminum industry; immunological status

Compliance with ethical standards. In accordance with the Declaration of Helsinki of the World Medical Association (ed. 2013), all subjects read and signed an informed consent to participate in the study, the protocol of which met the requirements of the Bioethics Committee of the Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases (Protocol of the Meeting No. 4, § 2 dated November 18, 2021).

For citation: Panev N.I., Krasilnikova P.L., Korotenko O.Yu., Rumpel O.A., Semenova E.A. Immune mechanisms of the formation of respiratory pathology in chronic intoxication with fluorine and its compounds. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(4): 450–455. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-4-450-455> <https://elibrary.ru/mmxtbj> (In Russ.)

For correspondence: Olga Yu. Korotenko, e-mail: olgakorotenko@yandex.ru

Contribution: Panev N.I. — concept and design of the study, collection of material, writing the text; Krasilnikova P.L. — collection of material, writing the text; Korotenko O.Yu. — collection of material, writing the text; Rumpel O.A. — collection of material; Semenova E.A. — collection of material. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Received: February 17, 2026 / Revised: March 2, 2026 / Accepted: March 24, 2026 / Published: May 18, 2026

Введение

В мировой промышленности алюминиевое производство по-прежнему занимает лидирующие позиции в структуре цветной металлургии. На алюминиевых заводах России работают в настоящее время более 60 тыс. человек [1]. Производство алюминия — трудоёмкий многоступенчатый процесс, сопровождающийся воздействием комплекса вредных производственных факторов, среди которых фтор и его соединения, шум, общая и локальная вибрация, неблагоприятный микроклимат, смолистые вещества, электромагнитные поля, физические перегрузки [2]. Несмотря на постоянное совершенствование процессов очистки рабочих залов и переход на современную технологию предварительного обожжённых анодов, уровень загрязнения воздуха в цехах остаётся высоким. Наряду с выбросами фторида натрия в воздухе обнаруживаются такие компоненты, как глинозём (оксид алюминия), криолит, фторуглеродистые соединения, сажа и её компоненты.

Изученные агломераты частиц представляют собой кристаллы дезинтеграции с заострёнными гранями и округлые кристаллы конденсации. В составе частиц обнаружен не только гидрофторид, но и железо, никель, хром, сера и другие микроэлементы. Преобладают частицы респираторного размера до 10 мкм, в том числе ультратонкие частицы до 0,5 мкм, и наночастицы (60–100 нм). Именно наночастицы промышленных аэрозолей выступают фактором развития профессиональных болезней системы органов дыхания [3, 4]. Определение уровней нерастворимых фторидов в цехах с технологией самообжигающихся анодов и технологией предварительно обожжённых анодов показало, что превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) в рабочих зонах электролизников, анодчиков, машинистов крана и операторов практически было примерно одинаковым и превосходило ПДК в 1,5–2,5 раза [1].

Традиционные представления о хронической профессиональной интоксикации соединениями фтора (ХПИСФ) как о токсическом факторе поражения опорно-двигательного аппарата, с учётом полного анализа воздуха основных рабочих мест производства алюминия, не дают информации о поражении лёгких респираторными, ультратонкими частицами и наночастицами аэрозольных смесей. Тем не менее патологии нижних дыхательных путей наиболее распространены среди работников алюминиевых заводов [5, 6]. В основе поражения лёгких соединениями фтора лежат окислительный стресс, активация белков острой фазы и активных форм кислорода (АФК), приводящие к разрушению мембран клеточных элементов крови, гемостазу и нарушению микроциркуляции. Действие соединений фтора проявляется в индукции апоптоза в лейкоцитах, фибробластах, альвеолоцитах, эпителиальных клетках лёгкого [7–9]. В слизистых оболочках дыхательных путей работников, подвергающихся

воздействию фтора и его соединений более 6 лет, происходят атрофические катаральные изменения. Основные патологии у алюминщиков — хронический необструктивный бронхит, хроническая обструктивная болезнь лёгких (ХОБЛ), бронхиальная астма и бронхит с астматическим компонентом [10–12]. Влияние фтора проявляется также ослаблением иммунной защиты лёгких: такие пациенты больше предрасположены к инфекционным болезням, что было продемонстрировано в экспериментальном исследовании Shoji Yamamoto. Бактерицидная активность лёгких в ответ на адгезию золотистого стафилококка была снижена за счёт меньшей выработки альвеолярных макрофагов при длительном действии концентрации фторида 5 и 10 мг/м³ [1].

Токсическое воздействие фтора на иммунитет проявляется в поражении органов иммунной системы (тимус, селезёнка), развитии патологических молекулярных реакций с угнетением клеточного и гуморального иммунитета [7].

Таким образом, целью исследования стало изучение иммунных механизмов в формировании патологии органов дыхания при хронической интоксикации фтором и его соединениями.

Материалы и методы

На базе ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний» (НИИ КППЗ) нами обследован 121 работник алюминиевого завода, из них 83 человека (68,59%) с установленным диагнозом ХПИСФ (проявляющейся остеопатией длинных трубчатых костей и позвоночника) без сопутствующей патологии лёгких и 21 человек (17,35%) с ХПИСФ в сочетании с патологией лёгких. В группу контроля вошли длительно работающие в контакте с фтором и его соединениями, не имеющие клинических признаков хронической профессиональной интоксикации соединениями фтора (42 человека; 34,71%), и рабочие алюминиевого завода с болезнями органов дыхания без ХПИСФ (17 человек; 14,04%). Патологии лёгких были представлены хроническим бронхитом и хронической обструктивной болезнью лёгких. Все обследованные — мужчины, возраст от 29 до 63 лет, средний возраст $52,39 \pm 0,37$ года, стаж работы $24,84 \pm 0,39$. Группы сопоставимы по стажу работы: у пациентов с ХПИСФ без сопутствующей патологии лёгких стаж работы составил $24,9 \pm 0,71$ года, у работников с ХПИСФ в сочетании с патологией лёгких — $25,3 \pm 0,93$ года ($p = 0,77$). В группах контроля также не выявлено достоверных различий в стаже работы с превышением концентраций соединений фтора (пациенты без признаков ХПИСФ и респираторной патологии — $24,9 \pm 0,8$ года и пациенты с респираторной патологией без ХПИСФ — $24,8 \pm 0,58$ года ($p = 0,98$)).

У обследованных пациентов с ХПИСФ болезнь лёгких была признана проявлением основной профессиональной патологии наряду с остеопатией длинных трубчатых

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная оценка воспалительных показателей у работников алюминиевой промышленности, $M \pm m$ Comparative assessment of inflammatory indices in workers of the aluminum industry, $M \pm m$

Показатель Parameter	Группа / Group			
	Контрольная Control	ХПИСФ Chronic occupational intoxication with fluoride compounds	ХПИСФ в сочетании с патологией лёгких Chronic occupational intoxication with fluoride compounds in combination with respiratory pathology	Патология лёгких Respiratory pathology
Число наблюдений, n Number of observations, n	42	83	21	17
Лейкоциты Leukocytes	7.20 ± 0.33	6.91 ± 0.13	7.16 ± 0.45	6.67 ± 0.15
Скорость оседания эритроцитов (СОЭ) Erythrocyte sedimentation rate	9.17 ± 0.34	9.00 ± 0.42	9.31 ± 1.42	9.07 ± 0.56
Фибриноген Fibrinogen	2.79 ± 0.13	2.92 ± 0.06	2.71 ± 0.19	2.86 ± 0.07
Протромбиновое отношение (ПО) Prothrombin ratio	0.94 ± 0.03	$0.95 \pm 0.01^*$	0.92 ± 0.03	0.90 ± 0.01
РФМК Soluble fibrin-monomer complexes	3.18 ± 0.85	2.37 ± 0.34	2.04 ± 0.81	2.20 ± 0.39
ХIIa-зависимый фибринолиз XIIa-dependent fibrinolysis	7.36 ± 0.37	7.916 ± 0.86	6.75 ± 0.47	7.02 ± 0.41
С-реактивный белок (СРБ) C-reactive protein	3.62 ± 0.86	3.41 ± 0.39	3.21 ± 0.93	4.46 ± 0.78

Примечание. * – значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ($p < 0,05$).

Note: * – significant differences in indices compared to the control group ($p < 0.05$).

костей и позвоночника; у работников с патологией лёгких без ХПИСФ связь болезней органов дыхания с профессией ранее не была установлена.

Участникам исследования проведены физикальные обследования, лабораторная диагностика, включающая общий клинический анализ крови, анализ иммунного статуса, острофазовых показателей воспаления (СРБ), а также выполнена коагулограмма. Общий клинический анализ крови выполняли на автоматическом гематологическом анализаторе МЕК 7222 (Nihon Kohden, Япония). Определение С-реактивного белка (СРБ, мг/л) осуществляли иммунотурбидиметрическим методом на автоматическом анализаторе Сапфир 400 (Токуо Воеки, Япония). Для работы использовали наборы фирмы АО «Вектор-Бест» (Россия). Показатели коагуляционного гемостаза [фибриноген (ФГ, г/л), активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ, с), протромбиновое время (ПВ, с)] определяли на автоматическом коагулометре Sysmex CA 500 (Sysmex, Япония). Протромбиновое отношение (ПО) рассчитывали по формуле: $ПО = ПВ \text{ больного} / ПВ \text{ контрольной плазмы}$. Растворимые фибрин-мономерные комплексы (РФМК, мг%) определяли о-фенантролиновым методом («Технология-Стандарт», Россия). Фибринолитическую систему оценивали по времени ХIIa-калликреин-зависимого фибринолиза (ХIIa-КЗФ, мин) в фибринолиз-тесте («Технология-Стандарт», Россия). Вычисление иммуноглобулинов IgA, IgM, IgG проводили иммунотурбидиметрическим методом на автоматическом биохимическом анализаторе Сапфир 400 (Япония) с помощью наборов фирмы АО «Вектор-Бест» (Россия). Иммунофенотипирование относительного и абсолютного количества $CD3^+$, $CD4^+$, $CD8^+$, $CD20^+$, $CD16^+$, $CD19^+$ выполняли с использованием детектирующих моноклональных антител фирмы Beckman Coulter производства США на проточном цитометре FC 500. Дополнительно был рассчитан иммунорегуляторный индекс (IRI) – соотношение $CD4^+ / CD8^+$.

Статистическая обработка результатов проведена с помощью пакета прикладных программ Statistica (версия 10.0) с вычислением критерия Стьюдента с использованием поправки Бонферрони для сравнения трёх и более групп. Уровень критерия достоверности $p < 0,05$.

Результаты

Общий и биохимический анализ крови достоверных различий в показателях, отражающих воспалительную реакцию (уровни лейкоцитов, СОЭ, СРБ, фибриногена), и свёртываемости крови (РФМК, ХIIa-зависимый фибринолиз) в изучаемых группах не выявил (табл. 1). Однако в группе работников с ХПИСФ протромбиновое отношение было больше, чем в контроле ($p = 0,02$).

Выявлены достоверные различия в показателях иммунного статуса работников алюминиевого производства (табл. 2). Видна достоверная разница в показателях $CD19^+$ ($177,54 \pm 12,34$ против $230,51 \pm 11,06$ и $224,89 \pm 7,94$ соответственно), иммуноглобулина G ($10 \pm 0,33$ против $11,92 \pm 0,4$ и $11,49 \pm 0,22$ соответственно) и фагоцитарного индекса ($36,37 \pm 3,83$ против $54,74 \pm 3,57$ и $49,72 \pm 2,35$ соответственно) у лиц с сочетанным поражением ХПИСФ и патологией лёгких в сравнении с группой контроля и группой работников с ХПИСФ без поражения лёгких. Также уровни $CD19^+$, IgG и фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН) достоверно ниже при сочетанной патологии лёгких с ХПИСФ в сравнении с остальными группами. Выявлено достоверное различие между пациентами с ХПИСФ и патологией лёгких и обследованными лицами с патологией лёгких без фтористой интоксикации в сторону снижения $CD19^+$ ($177,54 \pm 12,34$ против $251,84 \pm 39,8$ соответственно; $p = 0,01$) и IgG ($10 \pm 0,33$ против $11,51 \pm 0,5$ соответственно; $p = 0,01$).

Таблица 2 / Table 2

Сравнительная оценка показателей иммунного статуса у работников алюминиевой промышленности, $M \pm m$ Comparative evaluation of indices of the immune status in workers at the aluminum industry, $M \pm m$

Показатель Parameter	Группа / Group			
	Контрольная Control	ХПИСФ Chronic occupational intoxication with fluoride compounds	ХПИСФ в сочетании с патологией лёгких Chronic occupational intoxication with fluoride compounds in combination with respiratory pathology	Патология лёгких Respiratory pathology
Число наблюдений, n Number of observations, n	42	83	21	17
CD3 ⁺ , %	72.8 ± 1.17	73.45 ± 0.79	75.28 ± 2.66	74.14 ± 2.34
CD3 ⁺ , абс. • 10 ⁹ /л abs. • 10 ⁹ /L	1537.28 ± 94.29	1689.14 ± 70.13	1590.63 ± 146.52	1705.53 ± 158.81
CD4 ⁺ , %	44.92 ± 1.14	46.35 ± 0.88	43.67 ± 2.59	43.91 ± 1.71
CD4 ⁺ , абс. • 10 ⁹ /л abs. • 10 ⁹ /L	929.87 ± 57.43	1048.68 ± 43.05	893.72 ± 22.67	956.92 ± 83.24
CD8 ⁺ , %	25.70 ± 1.34	24.51 ± 0.86	26.91 ± 3.04	28.78 ± 2.44
CD8 ⁺ , абс. • 10 ⁹ /л abs. • 10 ⁹ /L	552.90 ± 49.97	581.27 ± 35.61	581.36 ± 81.46	664.46 ± 85.21
CD16 ⁺ , %	13.97 ± 1.09	14.84 ± 0.77	14.64 ± 2.92	14.15 ± 2.51
CD16 ⁺ , абс. • 10 ⁹ /л abs. • 10 ⁹ /L	273.05 ± 21.72	328.30 ± 21.58	311.45 ± 72.57	310.08 ± 39.54
CD19 ⁺ (%)	11.49 ± 0.66	10.08 ± 0.42	8.87 ± 0.96	10.65 ± 1.19
CD19 ⁺ , абс. • 10 ⁹ /л abs. • 10 ⁹ /L	230.51 ± 11.06	224.89 ± 7.94	177.54 ± 12.34*, #, ■	251.84 ± 39.80
Иммунореактивный инсулин (IRI) Immunoreactive insulin	1.95 ± 0.12	2.14 ± 0.09	2.21 ± 0.61	1.90 ± 0.15
Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН) с латексом, % Phagocytic activity of neutrophils with latex, %	54.74 ± 3.57	49.72 ± 2.35	36.37 ± 3.83*, #, ■	53.16 ± 8.33
IgA, г/л g/L	2.54 ± 0.15	2.60 ± 0.09	2.38 ± 0.25	2.33 ± 0.12
IgM, г/л g/L	0.91 ± 0.05	0.94 ± 0.03	0.87 ± 0.10	0.90 ± 0.08
IgG, г/л g/L	11.92 ± 0.40	11.49 ± 0.22	10.00 ± 0.33*, #, ■	11.51 ± 0.50
Циркулирующие иммунные комплексы (ЦИК), у. е. Circulating immune complexes, c. u.	182.26 ± 30.04	180.69 ± 18.74	217.2 ± 58.97	226.14 ± 58.84

Примечание. Значимые различия показателей ($p < 0,05$): * — по сравнению с контрольной группой; # — при ХПИФС с патологией лёгких и патологией лёгких без ХПИФС; ■ — при ХПИФС с патологией лёгких и ХПИФС без патологии лёгких.

Note: Significant differences ($p < 0.05$): * — in indices compared to the control group; # — in indices for chronic occupational intoxication with fluoride compounds with pulmonary pathology and pulmonary pathology without chronic occupational intoxication with fluoride compounds; ■ — in indices for chronic occupational intoxication with fluoride compounds with respiratory pathology and chronic occupational intoxication with fluoride compounds without pulmonary pathology.

Обсуждение

Многочисленные исследования показывают, что фтор — высокотоксичное вещество, способное вызывать значимые нарушения биохимических компонентов организма (начиная с транспорта кислорода и заканчивая синтезом макроэргических соединений), что приводит к гибели клеток различных органов и систем. Фторсодержащие соединения выступают в роли токсического фактора, влияющего на метаболизм, активируя программируемый апоптоз. Безусловно, их воздействие на организм зависит от концентраций и длительности воздействия [13]. Соединения фтора повышают уровень клеточных маркёров воспаления [14]. В нашем исследовании значимых увеличений количества лейкоцитов, концентраций СРБ, фибриногена в сыворотке крови, а также СОЭ у работников выявлено не было, как и различий между изучаемыми группами.

В эксперименте доказаны активация медиаторов воспаления и развитие иммунологических нарушений, которые способствуют формированию системной воспалительной реакции [15]. Токсическое действие фтора на иммунитет происходит на разных уровнях: запуск апоптоза клеток тимуса, повреждение его эпителиальных клеток с изменением экспрессии генов, стимулирующих продукцию Т-лимфоцитов и иммуномодулирующих цитокинов, что приводит к сни-

жению количества CD4⁺ и CD8⁺ Т-клеток тимуса, а также уровней иммунорегуляторных цитокинов IL-2, IL-10 [16]. Повреждению фторидами подвержен и второй крупный орган иммунной системы — селезёнка. Фторид ингибирует деление клеток селезёнки, снижая её иммунный индекс, способствует апоптозу, запуску окислительного стресса. Влияние фтора на отдельные кластеры иммунных клеток проявляется в виде нарушения поляризации макрофагов, снижения дифференцировки M2, активации системы перекисного окисления липидов, митохондриальной дисфункции. При исследовании на мышах было выявлено значительное снижение в результате воздействия фторида натрия фракции В-лимфоцитов в селезёнке и слизистой оболочке кишечника. Длительное действие фторидов ингибирует секрецию иммуноглобулинов А, М, G [17].

Повреждение лёгочной ткани в экспериментальных исследованиях выявило застойные явления, утолщение и разрыв межалвеолярных перегородок, увеличение процентного содержания коллагена и макрофагов в лёгочной ткани, десквамацию эпителия и некроз лёгочной ткани [18]. Проведённое нами исследование подтверждает данные литературных источников и экспериментальных исследований: выявлены снижение CD19⁺ как отражение угнетения гуморального звена иммунитета и снижение иммуноглобулина G у пациентов с диагнозом ХПИФС и поражением лёгких.

CD19⁺ отражают уровень В-лимфоцитов и характеризуют гуморальный иммунитет, ответственный за борьбу с инфекционными агентами. Иммуноглобулин G составляет до 80% всех иммуноглобулинов, обеспечивая долговременный иммунитет к большинству инфекций бактериальной и вирусной этиологии [19]. Фагоцитарный индекс отражает работу клеточного иммунитета, указывая на количество фагоцитов, задействованных в поглощении чужеродных для макроорганизма агентов (бактерий, вирусов). Снижение показателей CD19⁺ и ФАН свидетельствует об уменьшении активности как гуморального, так и клеточного иммунитета у лиц с хронической профессиональной интоксикацией фтором и поражением лёгких. Снижение иммуноглобулина G подтверждает глубокое истощение иммунных долгосрочных механизмов защиты у данной категории пациентов. Наиболее выраженное снижение показателей в группах с ХПИФС и поражением лёгких в сравнении с рабочими без развития хронической профессиональной интоксикации фтором указывает на токсическое действие фтора как агента, приводящего к истощению иммунных механизмов защиты и увеличивающего риск развития коморбидных патологий, таких как болезни лёгких.

Таким образом, выявлены иммунные механизмы формирования патологии органов дыхания (хронический бронхит, хроническая обструктивная болезнь лёгких) у работников

алюминиевого производства с хронической профессиональной интоксикацией фтором и его соединениями. Можно предположить вероятный профессиональный или профессионально обусловленный характер болезней лёгких у обследованных работников с патологиями органов дыхания без установленного диагноза ХПИФС, что требует дополнительного обследования и экспертизы связи болезни с профессией.

Ограничения исследования. Данное исследование лимитировано выборкой работников основных профессий алюминиевой промышленности и проведено в период обследования в клинике ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний».

Заключение

У пациентов с сочетанием ХПИФС с патологией органов дыхания (хронический бронхит, ХОБЛ) отмечено формирование иммунной недостаточности гуморального типа: снижение количества В-лимфоцитов (CD19⁺) и снижение уровня сыровороточного иммуноглобулина G, а также снижение фагоцитарной активности нейтрофилов. Различия выявлены в сравнении с пациентами с изолированными ХПИФС, патологией органов дыхания, а также с лицами контрольной группы.

Литература

1. Шаяхметов С.Ф., Мешакова Н.М., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В., Журба О.М., Алексеев А.Н. и др. Гигиенические аспекты условий труда в современном производстве алюминия. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(10): 899–904. <https://elibrary.ru/yocqtz>
2. Сюрин С.А. Состояние здоровья работников алюминиевой промышленности европейского севера России. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(1): 68–72. <https://elibrary.ru/tsbqmn>
3. Шпагина Л.А., Зенкова М.А., Сапрыкин А.И., Логашенко Е.Б., Шпагин И.С., Котова О.С. и др. Роль наночастиц промышленных аэрозолей в формировании профессиональной бронхолегочной патологии. *Медицина труда и промышленная экология*. 2024; 64(2): 111–20. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-111-120> <https://elibrary.ru/dbxtzj>
4. Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В. Характеристика образующихся аэрозольных взвесей – комплексов при традиционной и модернизированной технологиях электролиза алюминия. *Медицина труда и промышленная экология*. 2022; 62(7): 452–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458> <https://elibrary.ru/fhqvga>
5. Бейгель Е.Б., Кудасева И.В., Маснабиева Л.Б. Состояние показателей липидного обмена и системы перекисного окисления – антиоксидантной защиты у работников производства алюминия с профессиональной бронхолегочной патологией. *Медицина труда и промышленная экология*. 2023; 63(9): 605–10. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-9-605-610> <https://elibrary.ru/fayswf>
6. Гуревич Е.Б., Калинина О.Л., Лахман О.Л., Рослая Н.А., Семенихин В.А. Хроническая профессиональная интоксикация неорганическими соединениями фтора. В кн.: Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Шпагина Л.А., Алексеев В.Б., Амиров Н.Х., Анварул Н.А. и др. *Профессиональная патология*. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2024: 846–59. <https://elibrary.ru/ifenw>
7. Zhu S., Wei W. Progress in research on the role of fluoride in immune damage. *Front. Immunol.* 2024; 15: 1394161. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1394161>
8. Жукова А.Г., Михайлова Н.Н., Казичкая А.С., Алехина Д.А. Современные представления о молекулярных механизмах физиологического и токсического действия соединений фтора на организм. *Медицина в Кубассе*. 2017; 16(3): 4–11. <https://elibrary.ru/zgilyf>
9. Шеянов М.В., Паринов О.В. Острое повреждение легких и нижних дыхательных путей при ингаляционном воздействии фтороводорода. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2022; (1): 74–81. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2022-0-1-74-81> <https://elibrary.ru/fospab>
10. Шалина Т.И., Васильева Л.С. Общие вопросы токсического действия фтора. *Сибирский медицинский журнал*. 2009; 88(5): 5–9. <https://elibrary.ru/kzbtbl>
11. Sorgdrager B., de Looft A.J., Pal T.M., van Dijk F.J., de Monchy J.G. Factors affecting FEV₁ in workers with potroom asthma after their removal from exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 2001; 74(1): 55–8. <https://doi.org/10.1007/s004200000180>
12. Shaaban L.H., Zayet H.H., Aboufaddan H.H., Elghazally S.A. Respiratory hazards: clinical and functional assessment in aluminum industry workers. *Egypt. J. Chest Dis. Tuberc.* 2016; 65(2): 537–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejcdt.2016.01.004>
13. Рубцова О.Г., Ямалетдинова Г.Ф., Алекберова Г.И., Островская И.Г., Минаев А.В. Биохимические механизмы токсического действия фтора на организм человека. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2025; (6): 4. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.48> <https://elibrary.ru/ywqeo>
14. Den Besten P., Wells C.R., Abdurweli Uyghurturk D. Fluoride exposure and blood cell markers of inflammation in children and adolescents in the United States: NHANES, 2013–2016. *Environ. Health*. 2022; 21(1): 102. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00911-6>
15. Казичкая А.С., Ядыкина Т.К., Бугаева М.С., Жукова А.Г., Михайлова Н.Н., Горохова Л.Г. Патологические механизмы иммунной реактивности печени в условиях длительного экспериментального воздействия на организм фторида натрия. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*. 2019; 63(3): 64–72. <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2019.03.64-72> <https://elibrary.ru/eknaqk>
16. Бодякова Г.М., Боклаженко Е.В., Ушакова О.В. Иммунорегуляторные маркеры бронхолегочной патологии у работников алюминиевой промышленности. *Медицина труда и промышленная экология*. 2018; (9): 29–34. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-9-29-34> <https://elibrary.ru/vicsin>
17. Федоров А.А., Ермак Н.А., Герашенко Т.С., Топольницкий Е.Б., Шефер Н.А., Родионов Е.О. и др. Поляризация макрофагов: механизмы, маркеры и факторы индукции. *Сибирский онкологический журнал*. 2022; 21(4): 124–36. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2022-21-4-124-136> <https://elibrary.ru/lybkug>
18. Бугаева М.С., Бондарев О.И., Ядыкина Т.К., Жукова А.Г., Михайлова Н.Н. Экспериментальное изучение морфологических изменений сердца и сосудов в динамике хронической фтористой интоксикации. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(4): 397–401. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-397-401> <https://elibrary.ru/hwckht>
19. Земсков А.М., Земскова В.А., Бакулева Н.И., Глаголева А.Б., Ширяев О.Ю. Иммуноглобулины – настоящее и будущее иммунотерапии. *Научно-медицинский вестник Центрального Черноземья*. 2021; (86): 61–72. <https://elibrary.ru/ftjrmj>

References

1. Shayakhmetov S.F., Meshchakova N.M., Lisetskaya L.G., Merinov A.V., Zhurba O.M., Alekseyenko A.N., et al. Hygienic aspects of working conditions in the modern production of aluminum. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(10): 899–904. <https://elibrary.ru/yocqtz> (in Russian)
2. Syurin S.A. Health state of aluminum industry workers in the European North of Russia. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2015; 94(1): 68–72. <https://elibrary.ru/tsbqmn> (in Russian)
3. Shpagina L.A., Zenkova M.A., Saprykin A.I., Logashenko E.B., Shpagin I.S., Kotova O.S., et al. The role of nanoparticles of industrial aerosols in the formation of occupational bronchopulmonary pathology. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2024; 64(2): 111–20. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-111-120> <https://elibrary.ru/dbxtzj> (in Russian)
4. Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Characteristics of generated aerosol suspensions-complexes at traditional and modernized aluminum electrolysis technologies. *Meditsina truda i*

Original article

- promyshlennaya ekologiya*. 2022; 62(7): 452–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458> <https://elibrary.ru/fhqvra> (in Russian)
5. Beigel E.A., Kudaeva I.V., Masnavieva L.B. The state of lipid metabolism indicators and the system of peroxidation – antioxidant protection in aluminum production workers with occupational bronchopulmonary pathology. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2023; 63(9): 605–10. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-9-605-610> <https://elibrary.ru/fayswf> (in Russian)
 6. Gurevich E.B., Kalinina O.L., Lakhman O.L., Roslaya N.A., Semenikhin V.A. Chronic occupational intoxication with inorganic fluorine compounds. In: Bukhtiyarov I.V., Kuzmina L.P., Shpagina L.A., Alekseev V.B., Amirov N.K.H., Anvarul N.A., et al. *Occupational Pathology [Professional'naya patologiya]*. Moscow: GEOTAR-Media; 2024: 846–59. <https://elibrary.ru/ifiennw> (in Russian)
 7. Zhu S., Wei W. Progress in research on the role of fluoride in immune damage. *Front. Immunol.* 2024; 15: 1394161. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1394161>
 8. Zhukova A.G., Mikhailova N.N., Kazitskaya A.S., Alekhina D.A. Contemporary concepts of molecular mechanisms of the physiological and toxic effects of fluorine compounds on an organism. *Meditsina v Kuzbasse*. 2017; 16(3): 4–11. <https://elibrary.ru/zgilyf> (in Russian)
 9. Sheianov M.V., Parinov O.V. Acute lung and lower respiratory tract damage after inhalation exposure to hydrogen fluoride. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2022; (1): 74–81. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2022-0-1-74-81> <https://elibrary.ru/fospab> (in Russian)
 10. Shalina T.I., Vasilyeva L.S. General problems of toxic effect of fluorine. *Sibirskii meditsinskii zhurnal*. 2009; 88(5): 5–9. <https://elibrary.ru/kzbtii> (in Russian)
 11. Sorgdrager B., de Looft A.J., Pal T.M., van Dijk F.J., de Monchy J.G. Factors affecting FEV₁ in workers with potroom asthma after their removal from exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 2001; 74(1): 55–8. <https://doi.org/10.1007/s004200000180>
 12. Shaaban L.H., Zayet H.H., Aboufaddan H.H., Elghazally S.A. Respiratory hazards: clinical and functional assessment in aluminum industry workers. *Egypt. J. Chest Dis. Tuberc*. 2016; 65(2): 537–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejcdt.2016.01.004>
 13. Rubtsova O.G., Yamaletdinova G.F., Alekberova G.I., Ostrovskaya I.G., Minaev A.V. Biochemical mechanisms of the toxic effect of fluorine on the human body. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2025; (6): 4. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.48> <https://elibrary.ru/ywyqeo> (in Russian)
 14. Den Besten P., Wells C.R., Abduweli Uyghurturk D. Fluoride exposure and blood cell markers of inflammation in children and adolescents in the United States: NHANES, 2013–2016. *Environ. Health*. 2022; 21(1): 102. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00911-6>
 15. Kazitskaya A.S., Yadykina T.K., Bugaeva M.S., Zhukova A.G., Mikhailova N.N., Gorokhova L.G. Pathophysiological mechanisms of hepatic immune reactivity in prolonged experimental exposure of the body to sodium fluoride. *Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya*. 2019; 63(3): 64–72. <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2019.03.64-72> <https://elibrary.ru/eknaqk> (in Russian)
 16. Bodienkova G.M., Boklazhenko E.V., Ushakova O.V. Immunoregulatory markers of bronchopulmonary diseases in workers of the aluminium industry. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2018; (9): 29–34. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-9-29-34> <https://elibrary.ru/vicsin> (in Russian)
 17. Fedorov A.A., Ermak N.A., Gerashchenko T.S., Topolnitskiy E.B., Shefer N.A., Rodionov E.O., et al. Polarization of macrophages: mechanisms, markers and factors of induction. *Sibirskii onkologicheskii zhurnal*. 2022; 21(4): 124–36. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2022-21-4-124-136> <https://elibrary.ru/lybkug> (in Russian)
 18. Bugaeva M.S., Bondarev O.I., Yadykina T.K., Zhukova A.G., Mikhailova N.N. Experimental study of morphological changes in the heart and blood vessels in the course of chronic fluoride intoxication. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(4): 397–401. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-397-401> <https://elibrary.ru/hwckht> (in Russian)
 19. Zemskov A.M., Zemskova V.A., Bakuleva N.I., Glagoleva A.B., Shiryayev O.J. Immunoglobulins – present and future of immunotherapy: literature review and clinical experience. *Nauchno-meditsinskii vestnik Tsentral'nogo Chernozem'ya*. 2021; (86): 61–72. <https://elibrary.ru/ftjrmj> (in Russian)

Сведения об авторах

Панев Николай Иванович, доктор мед. наук, зав. лаб. охраны здоровья работающего населения ФГБНУ «НИИ КППГЗ»; 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: panevni@gmail.com

Красильникова Полина Леонидовна, аспирант ФГБНУ «НИИ КППГЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: aergos0203@mail.ru

Коротенко Ольга Юрьевна, канд. мед. наук, н.о. директора ФГБНУ «НИИ КППГЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: olgakorotenko@yandex.ru

Румпель Олеся Александровна, канд. мед. наук, зав. клинико-диагностической лаб. ФГБНУ «НИИ КППГЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: olesyar.ne@ya.ru

Семенова Елена Александровна, зав. профпатологическим отделением № 1 (терапевтическим) клиники ФГБНУ «НИИ КППГЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: lena-semenova66@yandex.ru

About the authors

Nikolay I. Panev, DSc (Medicine), head, Laboratory for the health protection of the working population, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5775-2615> E-mail: panevni@gmail.com

Polina L. Krasilnikova, postgraduate student, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-2333-1725> E-mail: aergos0203@mail.ru

Olga Yu. Korotenko, PhD (Medicine), acting director, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7158-4988> E-mail: olgakorotenko@yandex.ru

Olesya A. Rumpel, PhD (Medicine), head, Clinical and diagnostic laboratory, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2417-0261> E-mail: olesyar.ne@ya.ru

Elena A. Semenova, head, Department of the occupational pathology No. 1 (therapeutic), Clinic of the Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3886-4934> E-mail: lena-semenova66@yandex.ru