

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco106008>

# Оценка экскреции фтора из организма детей при различных уровнях воздействия выбросов производства алюминия

Н.В. Ефимова<sup>1</sup>, Л.Г. Лисецкая<sup>1</sup>, М.Ф. Савченков<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований, Ангарск, Российская Федерация;<sup>2</sup> Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для оценки риска развития нарушений, вызванных избытком или недостатком фтора, важно иметь информацию об уровнях экспозиции и выведения фтора из организма при различных путях поступления.

**Цель.** Выявить особенности экскреции фторид-иона у детей, проживающих в зонах воздействия выбросов производства алюминия.

**Материал и методы.** Сформированы две группы наблюдения из детей, проживающих на территориях размещения производств алюминия Иркутской области: 245 детей, подвергающихся высокому уровню экспозиции соединениями, и 148 — подвергающихся низкому уровню экспозиции. Контрольная группа состояла из 155 детей, проживающих в городах, не имеющих на своей территории промышленных источников эмиссии фтора. В качестве биосубстрата, отражающего уровень экскреции, использованы суточные пробы мочи. Содержание фторид-иона анализировали потенциометрическим методом с применением фторселективного электрода. Сравнение арифметических средних проведено с помощью t-критерия Стьюдента, медиан — с использованием U-критерия Манна-Уитни с поправкой Бонферрони. Корреляционная связь с возрастом оценена по коэффициенту Спирмена.

**Результаты.** Полученные данные свидетельствуют, что экскреция фторид-иона с мочой у детей, проживающих в промышленных центрах Иркутской области, не имеет различий как по средним величинам, так и по доле детей, у которых выведение превышает референсные региональные значения. Сравнительная оценка выведения фторид-иона у исследуемых с наибольшим содержанием токсиканта в зависимости от уровня экспозиции показала, что в моче детей, вошедших в подгруппу с высокой экспозицией, среднее содержание фторид-иона выше, чем в контрольной группе, в 1,4 раза ( $p < 0,001$ ). Максимальные величины выведения фторид-иона у детей, проживающих в зонах влияния выбросов крупных предприятий по производству алюминия, в 2,4 раза выше максимума в неэкспонированной группе.

**Заключение.** Выведение фторид-иона с мочой у детей, проживающих в промышленных центрах, не только связано с уровнем ингаляционной экспозиции, но и имеет обратную зависимость от возраста.

**Ключевые слова:** фтор; экскреция; детское население; ингаляционное воздействие.

## Как цитировать:

Ефимова Н.В., Лисецкая Л.Г., Савченков М.Ф. Оценка экскреции фтора из организма детей при различных уровнях воздействия выбросов производства алюминия // Экология человека. Т. 29, № 7. С. 599–607. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco106008>

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco106008>

# Fluorine excretion in children at various levels of exposure to emissions from aluminum production

Natalia V. Efimova<sup>1</sup>, Lyudmila G. Lisetskaya<sup>1</sup>, Mikhail F. Savchenkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** To assess the risk of development of disorders caused by excess or lack of fluorine, information regarding the levels of exposure and excretion of fluorine by various routes of intake is important.

**AIM:** To determine the features of fluoride ion excretion in children exposed to different levels of fluorine compounds contained in emissions from aluminum production.

**MATERIAL AND METHODS:** Observation groups were formed from 245 and 148 people exposed to high and low levels of fluorine compounds, respectively. For comparison, a control group of 155 children living in cities who had no industrial sources of fluorine emission in their territory was created. Daily urine samples, which reflect the level of excretion, were used as a biomaterial. Analysis of fluoride ion content was conducted using the potentiometric method with a fluorine selective electrode. Means were compared using Student's t-test, whereas medians were compared using the Mann–Whitney U test with Bonferroni correction. Correlation with age was assessed using the Spearman coefficient.

**RESULTS:** No significant differences in the average urinary excretion of fluorine and proportion of children whose excretion exceeds the reference regional levels were observed among children living in the industrial centers of the Irkutsk region. A comparative assessment of fluorine excretion among children with the highest toxicant content showed that those in the high-exposure subgroup had a 1.4 times higher average fluorine content compared to the control group ( $p < 0.001$ ). The maximum values of fluoride ion excretion in children living in the areas affected by emissions from large aluminum production enterprises are 2.4 times higher than the maximum in the unexposed group.

**CONCLUSION:** Fluoride ion excretion via urine in children living within industrial centers was directly associated with the level of inhalation exposure but inversely associated with age.

**Keywords:** fluorine; excretion; children; inhalation exposure.

## To cite this article:

Efimova NV, Lisetskaya LG, Savchenkov MF. Fluorine excretion in children at various levels of exposure to emissions from aluminum production. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2022;29(7):599–607. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco106008>

## ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия служит мощным источником загрязнения окружающей среды фтористыми соединениями, которые способны к межсредовым переходам и одновременному загрязнению целого ряда объектов (атмосферный воздух, почва, вода, пищевые продукты). Одним из элементов системы минимизации риска может служить мониторинг за содержанием токсиканта в окружающей среде и биологических материалах. Считается, что воздействие фтора имеет как краткосрочные, так и долгосрочные последствия, особенно когда происходит в критические моменты развития. В ряде работ [1–3] показан нейротоксический эффект воздействия фтора, проявляющийся в том числе снижением интеллекта. Установлено [4–7], что хроническое воздействие даже низких концентраций фтора может привести к пожизненному дефициту интеллекта, а также к проблемам с психическим здоровьем в будущем. Хотя существует мнение, что фторирование воды снижает риск кариеса зубов, доказано, что фтор тропен к костной системе и при избытке поступления приводит к флюорозу. Для того, чтобы оценивать риск развития нарушений, вызванных избытком или недостатком фтора, важно иметь информацию об уровнях экспозиции и выведения этого элемента при различных путях поступления в организм. В настоящее время убедительно показано, что у детей уровень удержания фтора выше, чем у взрослых: взрослые обычно сохраняют 50–60% поступившего фтора, в то время как младенцы и дети — примерно 80–90% [5]. У детей концентрация фторид-иона в моче ниже, скорее всего, из-за включения фтора в растущий скелет [1, 8]. Экскреция фтора происходит в основном с мочой, где его концентрация формируется за счет недавней абсорбции и высвобождения в результате непрерывного ремоделирования костной ткани [8].

Несмотря на довольно большое количество работ, посвящённых данной проблеме, основное внимание исследователей уделяется поступлению фтора в организм с питьевой водой [1, 2, 4, 9]. Вместе с тем большие группы населения, проживающие в зоне влияния промышленных объектов, подвергаются ингаляционному воздействию данного токсиканта [10–12]. Вследствие того, что фтор и его соединения обладают узким диапазоном физиологического оптимума, проблема воздействия указанных ингредиентов на здоровье населения требует углублённого изучения.

**Цель работы.** Выявить особенности экскреции фторид-иона у детей, проживающих в зонах воздействия выбросов производства алюминия.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в Иркутской области, на территориях, характеризующихся низким природным содержанием фтора как в почве, так и в подземных

и поверхностных водах [13, 14]. В связи с этим основными источниками поступления соединений фтора в объекты среды обитания являются предприятия по производству алюминия. В городах Братске и Шелехове длительное время функционируют два крупных алюминиевых завода, а в городе Тайшете с 2003 года функционировала опытно-экспериментальная установка небольшой мощности. Ранее нами достаточно подробно рассмотрены уровни загрязнения объектов окружающей среды в указанных городах и рассчитаны риски для здоровья населения в указанных населённых пунктах [15–17]. В зоны, находящиеся под воздействием высоких уровней фтора и его соединений, включены территории Центрального округа г. Братска и г. Шелехова, удалённые от промплощадок алюминиевых заводов на 1,5–9,0 км. Коэффициенты опасности (НҚ), рассчитанные по среднегодовым концентрациям в атмосферном воздухе на постах наблюдения Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Иркутской области, составили: по гидрофториду — 1,5–1,7, по твёрдым фторидам — 0,2–0,5. К зонам с низким уровнем воздействия отнесены Падунский округ г. Братска, удалённый от промплощадки на 20–25 км, и г. Тайшет, в которых НҚ по гидрофториду и твёрдым фторидам составили 0,3–0,4 и 0,1–0,2.

Опираясь на результаты исследований [15–17], случайным образом сформированы 2 группы из детей, проживающих на территориях размещения производств алюминия Иркутской области: 245 детей, подвергающихся высокому уровню экспозиции соединениями фтора; 148 — подвергающихся низкому уровню экспозиции. Контрольная группа включала 155 детей, проживающих в городах, которые не имеют на своей территории промышленных источников эмиссии фтора (Саянск и Ангарск).

Критерии включения в группы: рождение и постоянное (не менее 350 дней в году) проживание в изучаемых городах, возраст 5–15 лет, информированное согласие родителей/опекунов. Критерий исключения — использование фторсодержащих лекарственных препаратов и БАДов, зубной пасты с фтором.

Группы не имели различий в распределении детей по полу (51–52% девочек и 48–49% мальчиков).

Медико-биологические исследования проводили в соответствии с этическими принципами, изложенными в Хельсинкской декларации (2013 год), с Национальным стандартом РФ (ГОСТ Р 52379-2005 «Надлежащая клиническая практика»). Исследование одобрено локальным этическим комитетом Восточно-Сибирского института медико-экологических исследований и выполнено при наличии письменного информированного добровольного согласия от законных представителей детей.

В качестве биосубстрата, отражающего уровень экскреции, использованы суточные пробы мочи. Анализ содержания фторид-иона проводили на приборе «Мультитест ИПЛ-211» потенциометрическим методом с использованием фторселективного электрода в комплекте

**Таблица 1.** Содержание фторид-иона в моче детей в зависимости от уровня экспозиции, мкмоль/л**Table 1.** The content of fluoride ion in the urine of children, depending on the level of exposure,  $\mu\text{mol/l}$ 

Уровень экспозиции в группе Group exposure level	<i>n</i>	М (ДИ) M (CI)	St.dev	Kvar	<i>m</i>	<i>p</i>
Высокая / High	245	39,7 (36,7–42,8)	24,1	60,7	1,5	0,159
Низкая / Low	148	38,5 (35,0–42,1)	21,5	55,8	1,8	0,472
Контроль / Control	155	36,9 (34,4–39,6)	16,4	44,4	1,3	—

Примечание: статистическая значимость различий значений (*p*) с контролем оценена по *t*-критерию Стьюдента.

Note: The statistical significance of differences in values (*p*) with control was assessed by Student's *t*-test.

с рН-метром в соответствии с МУК 4.1.773-99. За уровень нормального содержания  $\text{F}^-$  в моче взяли региональную референсную величину — 35,2 мкмоль/л [18].

**Статистическая обработка данных** проведена с помощью автоматизированной программы Statistica v. 10. Характер распределения первичных данных проверен методом Шапиро–Уилка. В связи с параметрическим распределением аналитических параметров в группах с различным уровнем экспозиции величины представлены в виде арифметических средних с 95-процентным доверительным интервалом — М (ДИ), стандартного отклонения (St.dev.) и ошибки среднего (*m*), сравнение с контрольной группой проведено с помощью *t*-критерия Стьюдента с поправкой Бонферрони (критический уровень значимости  $p=0,0253$ ). В подгруппах, сформированных по возрастному принципу, распределение данных не подчинялось параметрическому закону, поэтому средние групповые характеристики, кроме указанных выше, включали медиану и 1 и 3-й квартили (Me [Q1; Q3]), сравнение проведено по *U*-критерию Манна–Уитни с поправкой Бонферрони ( $p=0,008$ ). Для выявления вариабельности рядов наблюдения в группах использован коэффициент вариации (Kvar). Корреляционная связь с возрастом оценена по коэффициенту Спирмена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание фторид-иона в моче у детей в зависимости от уровня воздействия представлено в табл. 1.

Средние групповые величины экскреции фторид-иона не имели статистически значимых различий, однако следует отметить значительную вариацию концентраций

в экспонированных группах. Так, в группе со сравнительно высоким уровнем воздействия выбросов, содержащих соединения фтора, коэффициент вариации составил 60,7%, с низким — 55,8%. В связи с этим определённый интерес представляла сравнительная оценка выведения фторид-иона у детей с наибольшим содержанием токсиканта в зависимости от уровня экспозиции, для чего рассмотрели концентрации фторид-иона в моче детей, вошедших в 4-е квартили. В подгруппах с высокой и низкой экспозициями средние концентрации фторид-иона выше, чем в контрольной, в 1,4 ( $p < 0,001$ ) и 1,2 раза ( $p=0,045$ ) соответственно (табл. 2). Максимальные из зарегистрированных величин составили в группе с высокой экспозицией 209 мкмоль/л, а с низкой — 144,7 мкмоль/л, что в 2,4 и 1,7 раза выше максимума в контрольной группе. При сравнении уровней экскреции фторид-иона между экспонированными подгруппами статистически значимых различий не выявлено ( $p=0,250$ ).

Результаты оценки экскреции по отдельным возрастным подгруппам среди детей, подвергающихся высокой экспозиции, и в контрольной группе представлены в табл. 3. Во всех возрастных подгруппах неэкспонированных фтором детей его выведение не имело различий: медиана колебалась от 28,0 (23,1–38,3) мкмоль/л в возрастной подгруппе 9–11 лет до 38,1 (26,0–46,3) мкмоль/л в группе 7–8 лет. Среди детей с высокой экспозицией вариабельность экскреции фтора значительно больше: минимальное значение медианы — 26,6 (19,8–41,5) мкмоль/л в группе 9–11 лет, максимальное — 47,2 (34,1–73,6) мкмоль/л — в группе 7–8 лет. Выявлена статистическая значимость различий экскреции фторид-иона у экспонированных детей по возрастным группам: 7–8/5–6 лет —

**Таблица 2.** Содержание фторид-иона в моче детей, вошедших в 4-й квартиль, в зависимости от уровня экспозиции, мкмоль/л**Table 2.** The content of fluoride ion in the urine of children included in the 4th quartile, depending on the level of exposure,  $\mu\text{mol/l}$ 

Уровень экспозиции в группе Group exposure level	<i>n</i>	М (ДИ) M (CI)	St.dev	Kvar	<i>m</i>	<i>p</i>
Высокая / High	62	72,4 (66,4–78,5)	23,72	32,75	3,01	0,000
Низкая / Low	38	66,9 (60,0–73,7)	20,78	31,07	3,37	0,045
Контроль / Control	41	58,9 (54,8–62,9)	12,91	21,93	2,02	—

Примечание: статистическая значимость различий значений (*p*) с контролем оценена по *t*-критерию Стьюдента.

Note: The statistical significance of differences in values (*p*) with control was assessed by Student's *t*-test.

**Таблица 3.** Содержание фторид-иона в моче детей в зависимости от возраста, мкмоль/л**Table 3.** Fluoride ion content in the urine of children according to age,  $\mu\text{mol/L}$ 

Группы (возраст, лет) Groups (age, years)	<i>n</i>	М (ДИ) M (CI)	Me [Q1; Q3]	St.dev
<i>Контроль / Control</i>				
5–6	71	39,6 (35,5–43,7)	35 [27,1; 46,6]	17,7
7–8	10	37,2 (28,9–45,50)	38,1 [26,0; 46,3]	13,3
9–11	31	31,0 (27,1–34,9)	28,0 [23,1; 38,3]	11,0
12–15	29	36,7 (30,6–42,8)	35,0 [26,2; 43,1]	16,8
<i>Экспонированная / Exposed</i>				
5–6	83	38,5 (34,0–43,1)	32,3 [21,2; 53,2]*	21,1
7–8	51	56,1 (48,4–63,6)	47,2 [34,1; 73,6]	27,6
9–11	84	32,7 (27,5–37,9)	26,6 [19,8; 41,5]*	24,2
12–15	32	40,1 (32,8–47,4)	35,5 [26,3; 50,7]*	21,0

Примечание: статистическая значимость различий значений (*p*) по возрастным группам оценена по U-критерию Манна–Уитни.

\* статистически значимые различия в экспонированных возрастных группах: 7–8/5–6 —  $p < 0,001$ ; 7–8/9–11 —  $p < 0,001$ ; 7–8/12–15 —  $p = 0,002$ .

Note: Statistically significant differences in the values (*p*) according to age groups were assessed using the Mann–Whitney U test.

\* Statistically significant differences in the exposed age groups: 7–8/5–6 ( $p < 0.001$ ); 7–8/9–11 ( $p < 0.001$ ); 7–8/12–15 ( $p = 0.002$ ).

$p < 0,001$ ; 7–8/9–11 лет —  $p < 0,001$ ; 7–8/12–15 лет —  $p = 0,002$ . Выявленная закономерность свидетельствует, что при длительном высоком воздействии фтора происходит увеличение выведения фторид-иона с мочой к 7–8 годам, а затем — к пубертатному периоду (в период активного роста детей фтор аккумулируется в организме и его концентрация в моче снижается).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют, что экскреция фторид-иона с мочой у детей, проживающих в промышленных центрах Иркутской области, не имеет различий как по средним величинам, так и по доле детей, у которых выведение превышает референсные региональные значения. При индивидуальной оценке выведения  $F^-$  отмечено, что доля детей с экскрецией выше региональной референсной величины в экспонированной группе составила  $45,7 \pm 3,2\%$ , в группе с низкой экспозицией —  $43,9 \pm 4,1\%$ , а в контрольной —  $47,7 \pm 4,0\%$ . В группе детей, проживающих вблизи предприятий по производству алюминия, среднее содержание фторид-иона в моче составляет 39,7 (36,7–42,8) мкмоль/л, максимальное — 209 мкмоль/л. Исследование, проведенное Н.В. Зайцевой с соавт. [19], показало, что в зоне воздействия выбросов алюминиевого завода у детей в возрасте 5–10 лет среднее содержание  $F^-$  в моче составило  $0,955 \text{ мг/дм}^3$  (50,3 мкмоль/л). У 224 детей 4–7 лет, проживающих на территории, экспонированной выбросами производства глинозёма, которые содержат соединения фтора, экскреция фторид-иона с мочой находилась на уровне  $0,588 \text{ мг/дм}^3$  (30,9 мкмоль/л) [20].

В качестве одного из возможных источников эмиссии фтора в окружающую среду можно рассматривать местные предприятия теплоэнергетики, работающие на угле. Подобные факты приведены в некоторых работах [21, 22]. Однако более значимыми источниками следует считать предприятия по производству алюминия, высокие трубы которых могут приводить не только к локальному загрязнению объектов среды обитания, но и к региональному переносу на десятки километров [10]. Ранее [23] нами показано, что суточное поступление фтористых соединений из почвы в г. Братске для взрослых в среднем за изучаемый период оценивается в 0,4 мг/кг в сутки, что равно 19% от необходимой среднесуточной дозы фтора, для детей — 1 мг/кг в сутки (67% от необходимой среднесуточной дозы фтора). Доля лиц с высоким содержанием фтора в волосах составляет 12% от числа обследованных. Отметим, что эти величины ниже, чем дозы у детей, подверженных поступлению фтора с водой на территориях природных геохимических аномалий. У этих детей выявлены признаки нарушения развития костной системы и психоневрологического развития [1, 4, 24]. Наибольшие дозы поступления характерны для территорий, расположенных в непосредственной близости от источника выбросов, для детей это — 1,3 мг/кг в день. Для детского населения г. Тайшета доза поступления оценивалась в 0,5 мг/кг в день (33%). На примере г. Братска установлено, что у подростков, родившихся и постоянно проживающих на расстоянии 8–12 км от промышленной площадки завода, концентрация фтора в волосах составила  $97,0 \pm 3,2 \text{ мг/кг}$ , что в 2 раза выше, чем у жителей удалённого на 20–25 км от завода Падунского

округа г. Братска, и в 9 раз выше, чем у лиц группы сравнения [23].

Проведённый нами анализ экскреции с мочой фтора, поступающего преимущественно ингаляционным путем, по отдельным возрастным группам (от 5 до 15 лет) выявил следующие особенности. Как среди детей, подвергающихся высокой фтористой нагрузке, так и среди проживающих на территориях, не имеющих предприятий-источников загрязнения фтором, минимальное выведение выявлено в препубертатном возрасте, а максимальная экскреция зарегистрирована в 7–8 лет. Установлено, что выведение фторид-иона с мочой у детей связано с возрастом и имеет обратную зависимость средней силы, что подтверждено коэффициентом корреляции Спирмена ( $r_{sp} = -0,41$ ;  $p = 0,021$ ). У детей с высоким уровнем ингаляционного воздействия фторсодержащими веществами выявлено, что в возрасте 7–8 лет экскреции фторид-иона статистически значимо выше, чем в других возрастных группах. Вероятно, это связано с меньшей активностью процессов роста опорного аппарата детей в указанный период, что доказано в работах Т.И. Шалиной с соавт. [8] на примере г. Шелехова. В научном обзоре, посвящённом содержанию фтора в воде [9], убедительно показано, что у детей уровень аккумуляции этого элемента, поступающего с питьевой водой, в организме выше, чем у взрослых, что связано с активными процессами роста. Результаты средних оценок возрастной группы 9–11 лет нельзя считать окончательными, так как численность группы наблюдения недостаточна для однозначного вывода. Однако они позволяют определить проблему дальнейшего изучения вопроса включения фтора в растущий скелет. Такие исследования целесообразно проводить, рассматривая динамику развития опорно-двигательного аппарата детей и выведения фторид-иона с учётом критических возрастных периодов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средние уровни экскреции фторид-иона с мочой у детей 5–15 лет, проживающих в промышленных центрах Иркутской области, не имели статистически значимых различий, но превышали региональные референсные значения у 43,9–47,7% обследованных.

Максимальные величины выведения фторид-иона у детей, проживающих в зонах влияния выбросов крупных предприятий по производству алюминия, в 2,4 раза выше максимума в неэкспонированной группе, а среднее содержание в подгруппе, входящей в 4-й квартиль, выше, чем в контрольной, в 1,4 раза.

У детей с высоким уровнем ингаляционного воздействия фторсодержащих веществ выведение фторид-иона с мочой связано с возрастом и имеет обратную зависимость средней силы: в возрасте 7–8 лет экскреция

Ф<sup>-</sup> статистически значимо выше, чем в возрастных группах 5–6, 9–11 и 12–15 лет.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / ADDITIONAL INFORMATION

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределён следующим образом: Н.В. Ефимова — концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, статистическая обработка, написание текста; М.Ф. Савченков — общая концепция статьи, редактирование; Л.Г. Лисецкая — химико-аналитические исследования, сбор и обработка данных.

**Authors' contribution.** N.V. Efimova was involved in the concept and design of research, collection and processing of materials, statistical processing, and text writing; M.F. Savchenkov was involved in the concept and editing of the text; L.G. Lisetskaya was involved in the chemical analysis, collection, and processing of materials. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Финансирование.** Публикация осуществлена при поддержке гранта, полученного Научно-исследовательским центром адаптации человека в Арктике, филиалом Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», на тему «The contribution of reproductive health and the quality of the Arctic environment to the Wellbeing of the Kola Sami», софинансируемого через сквозные фонды Международного арктического научного комитета (IASC) при участии Рабочих групп IASC: по социальным и гуманитарным вопросам (SHWG) и Международной научной инициативы в Российской Арктике (ISIRA). Работа выполнена в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований».

**Funding sources.** The publication was supported by a grant received by the Research Center for Human Adaptation in the Arctic, a branch of the Federal Research Center "Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", on the topic "The contribution of reproductive health and the quality of the Arctic environment to the Wellbeing of the Kola Sami", co-financed through the International Arctic Science Committee (IASC) through funds with the participation of the IASC Social and Humanitarian Working Groups (SHWG) and the International Science Initiative in the Russian Arctic (ISIRA). The work was carried out within the framework of the funds allocated for the implementation of the state task by the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

**Конфликт интересов.** Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zuo H., Chen L., Kong L., et al. Toxic effects of fluoride on organisms // *Life Sci.* 2018. Vol. 198. P. 18–24. doi: 10.1016/j.lfs.2018.02.001
2. Green R., Rubenstein J., Popoli R., et al. Sex-specific neurotoxic effects of early-life exposure to fluoride: a review of the epidemiologic and animal literature // *Curr Epidemiol Rep.* 2020. Vol. 7, N 4. P. 263–273. doi: 10.1007/s40471-020-00246-1
3. Farmus L., Till C., Green R., et al. Critical windows of fluoride neurotoxicity in Canadian children // *Environ Res.* 2021. Vol. 200. P. 111315. doi: 10.1016/j.envres.2021.111315
4. Choi A.L., Sun G., Zhang, Y., Grandjean P. Developmental fluoride neurotoxicity: a systematic review and meta-analysis // *Environ Health Perspect.* 2012. Vol. 120, N 10. P. 1362–1368. doi: 10.1289/ehp.1104912
5. Grandjean P., Landrigan P.J. Neurobehavioural effects of developmental toxicity // *Lancet Neurol.* 2014. Vol. 13, N 3. P. 330–338. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70278-3
6. Grandjean P. Developmental fluoride neurotoxicity: an updated review // *Environ Health.* 2019. Vol. 18, N 1. P. 110. doi: 10.1186/s12940-019-0551-x
7. Adkins E.A., Yolton K., Strawn J.R., et al. Fluoride exposure during early adolescence and its association with internalizing symptoms // *Environ Res.* 2022. Vol. 204 (Pt C):112296. doi: 10.1016/j.envres.2021.112296
8. Шалина Т.И., Николаева Л.А., Савченков М.Ф., и др. Загрязнение окружающей среды фтористыми соединениями и их влияние на здоровье детей // *Гигиена и санитария.* 2016. Т. 95, № 12. P. 1133–1137. doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-12-1133-1137
9. <https://www.cdc.gov/> [internet]. Water Fluoridation Basics|Community Water Fluoridation |Division of Oral Health| CDC. [cited 01.03.2022]. Available from: <https://www.cdc.gov/fluoridation/basics/index.htm>.
10. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях // *Агрохимия.* 2019. № 3. С. 65–71. doi: 10.1134/S0002188119030062
11. Вековшина С.А., Клейн С.В., Жданова-Заплесвичко И.Г., Четвёркина К.В. Качество среды обитания и риск здоровью населения, проживающего под воздействием выбросов предприятий цветной металлургии и деревообрабатывающей промышленности // *Гигиена и санитария.* 2018. Т. 97, № 1. С. 16–20. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-1-16-20
12. He L., Tu C., He S., et al. Fluorine enrichment of vegetables and soil around an abandoned aluminium plant and its risk to human health // *Environ Geochem Health.* 2021. Vol. 43, N 3. P. 1137–1154. doi: 10.1007/s10653-020-00568-5
13. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Пройдакова О.А., Зарубина О.В. Многолетний геохимический мониторинг истока р. Ангара (сток оз. Байкал) // *Доклады Академии наук.* 2018. Т. 480. № 4. С. 449–454. doi: 10.7868/S0869565218160144
14. Безгодов И.В., Ефимова Н.В., Кузьмина М.В. Качество питьевой воды и риск для здоровья населения сельских террито- рий Иркутской области // *Гигиена и санитария.* 2015. Т. 94. № 2. С. 15–19.
15. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.L., Doroshkov A.A., et al. Chemical contamination of soil on urban territories with aluminium production in the Baikal region, Russia // *Air, soil and water research.* 2021. Vol. 14. P. 1–11. doi: 10.1177/11786221211004114
16. Ефимова Н.В., Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., и др. Комплексная оценка влияния производства алюминия на окружающую среду и население (на примере Байкальского региона) // *Проблемы безопасности окружающей среды; Сентябрь 27–29, 2016; Ереван. Ереван : Издательство: «Гитутюн» НАН РА.* С. 78–84.
17. Ефимова Н.В., Мильникова И.В., Парамонов В.В., и др. Оценка химического загрязнения и риска для здоровья населения Иркутской области // *География и природные ресурсы.* 2016. № S6. С. 99–103. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(99-103)
18. Ефимова Н.В., Лисецкая Л.Г., Журба О.М., и др. Региональные референсные уровни содержания химических веществ в биосубстратах населения Иркутской области (методические рекомендации). Ангарск : Иркутский институт повышения квалификации работников образования, 2013. 28 с.
19. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Булатова Н.И., Кольдибекова Ю.В. Исследование и оценка нарушений протеомного профиля плазмы крови, обусловленных повышенной концентрацией фторид-иона в моче у детей // *Здоровье населения и среда обитания — ЗНиСО.* 2019. № 7. С. 23–27. doi: 10.35627/2219-5238/2019-316-7-23-27
20. Землянова М.А., Тихонова И.В. Реализация рисков развития заболеваний органов дыхания у детей, подвергающихся воздействию химических факторов экспозиции, связанной с хозяйственной деятельностью субъекта по производству глинозема // *Здоровье населения и среда обитания — ЗНиСО.* 2019. № 11. С. 42–47. doi: 10.35627/2219-5238/2019-320-11-42-47
21. Mikkonen H.G., van de Graaff R., Mikkonen A.T., et al. Environmental and anthropogenic influences on ambient background concentrations of fluoride in soil // *Environ Pollut.* 2018. Vol. 242 (Pt B). P. 1838–1849. doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.083
22. Голов В.И., Бурдуковский М.Л., Тимошинов Р.В., и др. Агрогенное и техногенное загрязнение почв дальнего востока фтором. Реальные и мнимые проблемы // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук.* 2017. № 2. С. 84–90.
23. Ефимова Н.В., Дорогова В.Б., Журба О.М., Никифорова В.А. Оценка воздействия фтора на детское население Иркутской области // *Медицина труда и промышленная экология.* 2009. № 1. С. 23–26.
24. Rango T., Vengosh A., Jeuland M., et al. Biomarkers of chronic fluoride exposure in groundwater in a highly exposed population // *Sci Total Environ.* 2017. Vol. 596-597. P. 1–11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.021

## REFERENCES

- Zuo H, Chen L, Kong M, et al. Toxic effects of fluoride on organisms. *Life Sci.* 2018;198:18–24. doi: 10.1016/j.lfs.2018.02.001
- Green R, Rubenstein J, Popoli R, et al. Sex-specific neurotoxic effects of early-life exposure to fluoride: a review of the epidemiologic and animal literature. *Curr Epidemiol Rep.* 2020;7(4):263–273. doi: 10.1007/s40471-020-00246-1
- Farmus L, Till C, Green R, et al. Critical windows of fluoride neurotoxicity in Canadian children. *Environ Res.* 2021;200:111315. doi: 10.1016/j.envres.2021.111315
- Choi AL, Sun G, Zhang Y, Grandjean P. Developmental fluoride neurotoxicity: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect.* 2012;120(10):1362–1368. doi: 10.1289/ehp.1104912
- Grandjean P, Landrigan PJ. Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *Lancet Neurol.* 2014;13(3):330–338. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70278-3
- Grandjean P. Developmental fluoride neurotoxicity: an updated review. *Environ Health.* 2019;18(1):110. doi: 10.1186/s12940-019-0551-x
- Adkins EA, Yolton K, Strawn JR, et al. Fluoride exposure during early adolescence and its association with internalizing symptoms. *Environ Res.* 2022;204(Pt C):112296. doi: 10.1016/j.envres.2021.112296
- Shalina TI, Nikolaeva LA, Savchenkov MF, et al. Environmental pollution with fluoride compounds and their influence on children health. *Hygiene and Sanitation.* 2016;95(12):1133–1137. (In Russ). doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-12-1133-1137
- <https://www.cdc.gov/> [Internet]. Water Fluoridation Basics [Community Water Fluoridation | Division of Oral Health] CDC. [cited 01.03.2022]. Available from: <https://www.cdc.gov/fluoridation/basics/index.htm>.
- Frid AS, Borisochkina TI. Fluorine: migration mobility in technogenic polluted soils. *Agrohimiya.* 2019;(3):65–71. (In Russ). doi: 10.1134/S0002188119030062
- Vekovshina SA, Klein SV, Zhdanova-Zaplesvichko IG, Chetverkina KV. The quality of the environment and the risk to the health of the population living under the influence of emissions from non-ferrous metallurgy and woodworking industries. *Hygiene and Sanitation.* 2018;97(1):16–20. (In Russ). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-1-16-20
- He L, Tu C, He S, et al. Fluorine enrichment of vegetables and soil around an abandoned aluminium plant and its risk to human health. *Environ Geochem Health.* 2021;43(3):1137–1154. doi: 10.1007/s10653-020-00568-5
- Grebenshchikova VI, Kuzmin MI, Proydakova OA, Zarubina OV. Long-term geochemical monitoring of the source of the Angara river (runoff from lake Baikal). *Doklady Earth Sciences.* 2018;480(4):449–454. (In Russ). doi: 10.7868/S0869565218160144
- Bezgodov IV, Efimova NV, Kuzmina MV. Assessment of the quality of drinking water and risk for the population's health in rural territories in the Irkutsk region. *Hygiene and Sanitation.* 2015;94(2):15–19. (In Russ).
- Grebenshchikova VI, Kuzmin ML, Doroshkov AA, et al. Chemical contamination of soil on urban territories with aluminium production in the Baikal region, Russia. *Air, Soil and Water Research.* 2021;14:1–11. doi: 10.1177/11786221211004114
- Efimova NV, Gornov AY, Zarodnyuk TS, et al. Comprehensive assessment of the impact of aluminum production on the environment and population (on the example of the Baikal region). In: *Problems of Environmental Safety.* 2016 Sep 27–29; Erevan. Erevan: Izdatel'stvo: «Gitutjun» NAN RA. P. 78–84. (In Russ).
- Efimova NV, Mylnikova IV, Paramonov VV, et al. Assessment of chemical pollution and public health risks in the Irkutsk region. *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and Natural Resources].* 2016;S6:99–103. (In Russ).
- Efimova NV, Lisetskaya LG, Zhurba OM, et al. *Regional reference levels of chemicals in biosubstrates of the population of the Irkutsk region (guidelines).* Angarsk: Irkutskij institut povysheniya kvalifikacii rabotnikov obrazovaniya; 2013. 28 p. (In Russ).
- Zaitseva NV, Zemlianova MA, Bulatova NI, Koldibekova JV. Analysis and evaluation of blood plasma proteomic profile violations due to the increased concentration of fluoride ion in children's urine. *Public Health and Life Environment — PH&LE.* 2019;7:23–27. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2019-316-7-23-27
- Zemlianova MA, Tikhonova IV. Occurrence of the risks for the development of respiratory diseases in children exposed to the chemical factors of alumina refinery associated economic activity. *Public Health and Life Environment — PH&LE.* 2019;11:42–47. (In Russ). doi: 10.35627/22195238/2019320114247 2019
- Mikkonen HG, van de Graaff R, Mikkonen AT, et al. Environmental and anthropogenic influences on ambient background concentrations of fluoride in soil. *Environ Pollut.* 2018;242(Pt B):1838–1849. doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.083
- Golov VI, Burdukovsky ML, Timoshinov RV, et al. Agrogenic and technogenic contamination of soil by fluorine in the Russian far east. Real and perceived problems. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk.* 2017;2:84–90. (In Russ).
- Efimova NV, Dorogova VB, Zhurba OM, Nikiforova VA. Evaluating fluorine effects in children of Irkutsk area. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology.* 2009;1:23–26. (In Russ).
- Rango T, Vengosh A, Jeuland M, et al. Biomarkers of chronic fluoride exposure in groundwater in a highly exposed population. *Sci Total Environ.* 2017;596-597:1–11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.021

## ОБ АВТОРАХ

**\*Наталья Васильевна Ефимова**, д.м.н., профессор,  
ведущий научный сотрудник;  
адрес: Россия, 665816, Иркутская область, Ангарск,  
микрорайон 12а, 3, а/я 1170;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7218-2147>;  
eLibrary SPIN: 4537-9381;  
e-mail: medecolab@inbox.ru

**Людмила Гавриловна Лисецкая**, к.б.н.;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0876-2304>;  
eLibrary SPIN: 1575-7497;  
e-mail: lis\_lu154@mail.ru

**Михаил Федосович Савченков**, д.м.н., профессор,  
академик РАН;  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1246-8327>;  
eLibrary SPIN: 2950-0415;  
e-mail: mfs36@mail.ru

## AUTHORS INFO

**\*Natalia V. Efimova**, Dr. Sci. (Med.), professor,  
leader research associate;  
address: microdistrict 12a, 3, PO box 1170, 665816,  
Irkutskaja oblast', Angarsk, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7218-2147>;  
eLibrary SPIN: 4537-9381;  
e-mail: medecolab@inbox.ru

**Lyudmila G. Lisetskaya**, Cand. Sci. (Biol.);  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0876-2304>;  
eLibrary SPIN: 1575-7497;  
e-mail: lis\_lu154@mail.ru

**Mikhail F. Savchenkov**, Dr. Sci. (Med.), professor,  
academician of the Russian Academy of Sciences;  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1246-8327>;  
eLibrary SPIN: 2950-0415;  
e-mail: mfs36@mail.ru

\*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author