



Евсеева И.С., Ушакова О.В., Жернов Ю.В.

## Содержание фтора в почве территорий, подлежащих обслуживанию Федеральным медико-биологическим агентством России

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Одна из основных целей профилактической медицины — охрана здоровья людей от вредного воздействия окружающей среды. В промышленных районах индустриальных стран проблема санитарной охраны почв относится к наиболее острым. Фтор (F) относится к микроэлементам, которым уделяют большое внимание из-за его вредного воздействия на окружающую среду, здоровье человека и животных. Основные источники промышленного загрязнения почв фторсодержащими соединениями — предприятия по производству алюминия и стали, керамики, фосфорных удобрений, стекольные, цементные и кирпичные заводы.

**Цель исследования** — гигиеническая оценка содержания фтора в почве территорий, обслуживаемых ФМБА России, и выявление возможных потенциальных источников его поступления в почву на примере городов Обнинска Калужской области и Пересвета Московской области.

**Материалы и методы.** Изучены данные литературы о влиянии фтора на состояние окружающей среды и здоровье населения с использованием баз данных PubMed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, РИНЦ. Проведены натурные исследования содержания фтора в почве различного назначения в Обнинске Калужской области и в Пересвете Московской области.

**Результаты.** По результатам натурных исследований установлено, что три пробы почвы в Пересвете и две в Обнинске не соответствовали гигиеническому нормативу содержания фтора (водорастворимая форма), превышение ПДК — в 1,2–1,5 раза. Аналитический поиск данных о типах предприятий (особенности производства, химического состава выбросов, месторасположение, близость к точкам, где обнаружены превышения ПДК) позволил сформировать список потенциальных источников загрязнения почвы фтором.

**Ограничения исследования** обусловлены изучением почв сходных типов; превышение ПДК фтора выявлено однократно, что требует дальнейших наблюдений.

**Заключение.** Проведённые исследования позволили выявить территории, где ПДК содержания фтора (водорастворимая форма) в почве была превышена. Установлено, что контроль содержания фтора в почве лишь в зоне воздействия больших производств (холдинги по производству алюминия и др.) не решает всех поставленных задач. Показано, что даже небольшие по мощности предприятия могут быть источниками поступления фтора в окружающую среду, следовательно, необходим контроль не только атмосферных выбросов, но и содержания фтора в почве (не менее одного раза в год).

**Ключевые слова:** почва; промышленность; здоровье; ПДК в почве; фтор; мониторинг

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Для цитирования:** Евсеева И.С., Ушакова О.В., Жернов Ю.В. Содержание фтора в почве территорий, подлежащих обслуживанию Федеральным медико-биологическим агентством. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(11): 1394–1398. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1394-1398> <https://elibrary.ru/bobegk>

**Для корреспонденции:** Евсеева Ирина Сергеевна, e-mail: [Ievseeva@cspsfmba.ru](mailto:Ievseeva@cspsfmba.ru)

**Участие авторов:** Евсеева И.С. — концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, написание текста, редактирование; Ушакова О.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Жернов Ю.В. — концепция исследования, редактирование. 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 выполнено в рамках государственного задания.

Поступила: 14.10.2025 / Принята к печати: 03.11.2025 / Опубликовано: 19.12.2025

Irina S. Evseeva, Olga V. Ushakova, Yury V. Zhernov

## Hygienic assessment of the fluorine content in the soil of territories to be serviced by the Federal medical and biological agency

Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The main purpose of preventive medicine is to protect public health from the harmful effects of the human environment. In industrial areas of large industrial countries, the problem of sanitary protection of soils is put forward as one of the most acute. Fluorine is one of those trace elements that receives a lot of attention due to its harmful effects on the environment, human and animal health. The main sources of industrial soil contamination with fluorinated compounds are enterprises producing aluminum and steel, ceramics, phosphorous fertilizers, glass, cement and brick factories.

**The purpose of the study.** To conduct a hygienic assessment of the fluoride content in the soil of territories serviced by the FMBA of Russia and identify possible potential sources of its entry into the soil using the example of Obninsk, the Kaluga Region, and Peresvet, the Moscow Region.

**Materials and methods.** Literature sources on the effects of fluorine on the environment and public health were studied, and the following databases were used in the search: PubMed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, RSCI. Field studies of fluorine content in soil for various purposes were conducted in Obninsk, the Kaluga region and in Peresvet, the Moscow region.

**Results.** Based on the results of field studies, it was found that there were five soil samples in Obninsk, the Kaluga region and Peresvet, the Moscow region (three points in Peresvet, the Moscow region, two points in Obninsk, the Kaluga region), did not meet the hygienic standard for the content of fluorine (water-soluble form) and exceeded the maximum permissible concentration by 1.2–1.5 times. The conducted analytical search for data on the types of enterprises, which included production features, chemical composition of emissions, location (proximity of enterprises to the points where the maximum permissible concentration of fluorine in the soil was detected) allowed creating a list of potential sources of soil contamination with fluorine.

**Limitation.** Due to the fact that the studies were conducted on soils selected in territories with a similar soil type, excess fluorine was detected once during the study, which requires further observations.

**Conclusion.** A screening study of the soils of the territories serviced by the FMBA of Russia on the principle of “samples of unknown composition” revealed the points where the excess of the maximum permissible concentration of fluorine (water-soluble form) in the soil exceeds the established standards. Monitoring the levels of fluoride in the soil, only in the area of exposure to large industries, such as aluminum production holdings, is insufficient. As we can see, in cities where even small enterprises are located, which can be sources of fluoride entering the environment, it is necessary to monitor not only atmospheric emissions, but also the fluorine content in the soil, at least once a year.

**Keywords:** soil; industry; health; maximum permissible concentration in soil; fluorine; monitoring

**Compliance with ethical standards.** The study does not require submission to a biomedical ethics committee or other documents.

**For citation:** Evseeva I.S., Ushakova O.V., Zhernov Yu.V. Hygienic assessment of the fluorine content in the soil of territories to be serviced by the Federal medical and biological agency. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(11): 1394–1398. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1394-1398> <https://elibrary.ru/bobegk> (In Russ.)

**For correspondence:** Irina S. Evseeva, e-mail: [levseeva@cspfmba.ru](mailto:levseeva@cspfmba.ru)

**Contribution:** Evseeva I.S. — concept and design of research, collection of material and data processing, text writing, editing; Ushakova O.V. — concept and design of the study, writing, editing; Zhernov Yu.V. — research concept, editing. 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 was carried out within the framework of a state assignment.

Received: October 14, 2025 / Accepted: November 3, 2025 / Published: December 19, 2025

## Введение

Одна из основных целей профилактической медицины — охрана здоровья людей от вредного воздействия окружающей среды. В промышленных районах индустриальных стран проблема санитарной охраны почв относится к наиболее острому. Производственная деятельность человека оказывает разностороннее влияние на формирование профиля химического загрязнения педосферы. Отрицательное влияние связано с попаданием в неё различных экзогенных органических и минеральных химических веществ. Фтору уделяют большое внимание из-за его вредного воздействия на окружающую среду, здоровье человека и животных [1–6]. Основные источники промышленного загрязнения почв фторсодержащими соединениями — предприятия по производству алюминия и стали, керамики, фосфорных удобрений, стекольные, цементные и кирпичные заводы. Источниками загрязнения сельскохозяйственных почв и растений являются фосфорные удобрения: до 50% фтора, поступающего с фосфатным сырьём для производства удобрений, остаётся в них в виде легкорастворимых солей [7]. В почвах водорастворимые формы фтора регламентируются предельно допустимой концентрацией (ПДК), которая составляет для этого элемента 10 мг/кг. Поскольку данный элемент не относится к веществам, обязательным для контроля в почве в рамках социально-гигиенического мониторинга, содержание его определяется для оценки качества почв населённых мест при специальных запросах и в научных исследованиях, а в рутинной гигиенической практике проводится редко. Загрязнение почвы фтором в результате антропогенной деятельности может быть значительным и иметь как промышленное происхождение (выбросы отходов алюминиевых заводов, стоки угольных электростанций и заводов по переработке различных материалов — стекла, керамики, пластика, пестицидов, дезинфицирующих средств и др.), так и сельскохозяйственное, например, долгосрочное неконтролируемое использование фосфатных удобрений или орошение водой, обогащённой фторидом.

Мигрируя в контактирующие с почвой среды и накапливаясь в них, F способствует возникновению обусловленных производственной деятельностью человека локальных эндемических очагов флюороза. Связь между чрезмерным содержанием фтора в окружающей среде и высоким уровнем флюороза у населения загрязнённых территорий в настоящее время хорошо известна. Длительное воздействие высоких доз F может вызывать серьёзные патологии зубно-го аппарата и костной системы, причём он накапливается в большей степени в растущих организмах. Высокие дозы фтора могут повреждать и внутренние органы (особенно у людей с дисфункцией лёгких и почек), нервную, репродуктивную и иммунную системы [8–13].

Цель исследования — гигиеническая оценка содержания фтора в почве территорий, обслуживаемых Федеральным

медико-биологическим агентством (ФМБА России), и выявление возможных потенциальных источников его поступления в почву на примере городов Обнинска Калужской области и Пересвета Московской области.

## Материалы и методы

Изучены данные литературы о влиянии фтора на окружающую среду и здоровье населения, использованы базы данных PubMed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, РИНЦ. Проведены натурные исследования в городах Обнинске Калужской области и Пересвете Московской области для определения содержания фтора в почве. Почвенные образцы отбирали согласно нормативным требованиям. Исследования проводили в соответствии с общепринятыми принципами оценки качества почв по действующим документам: СанПиН 1.2.3685–21, СанПиН 2.1.3684–21, МУ 2.1.7.730–99.

## Результаты

Соединения фтора присутствуют в естественных средах (в почве, воде и продуктах питания). Фтор содержится в почве на территориях Российской Федерации главным образом в связанной форме коллоидной фракции от 96 до 340 мг/кг. Уровень обнаружения обусловлен такими факторами, как механический состав почвы, содержание карбонатов, засоленность, pH. Почвы сенокосов и пастбищ загрязняются в большей степени, чем почвы на пашне, неорошаемые земли загрязнены более орошаемых. Наиболее опасны за счёт высокой химической активности и токсичности водорастворимые формы фтора [14, 15]. Накопление фтора в объектах природной среды отмечается в районах размещения предприятий по переработке фторсодержащего сырья (суперфосфатные и кирпичные заводы, предприятия по производству фосфорной кислоты и фтористых соединений), а также вблизи объектов производства, использующих соединения фтора (предприятия чёрной металлургии, стекольные и алюминиевые заводы) [16, 17]. В табл. 1 представлены основные пути поступления фтора в почву.

Опасность загрязнения природных сред соединениями фтора в промышленных районах определяется плотностью выпадения и радиусом распространения фторидов вокруг источников выбросов, уровнем и масштабом загрязнения почв, негативным воздействием фторидов на растительность, изменением физико-химических и других свойств почв в условиях загрязнения фтором, миграцией соединений фтора по профилям почвы [18–21]. Накопление фтора в почве вокруг промышленных предприятий обусловлено в основном аэрозольной составляющей. Исследования показали, что в радиусе 15 км от алюминиевого завода на почве осажается не более 15% общего количества фтора, поступившего в атмосферу с дымовыми выбросами, а мелкодисперс-

Таблица 1 / Table 1

**Основные пути попадания фтора в почву****The main routes of fluorine entry into the soil**

Путь поступления The path of admission	Количество фтора, поступающего в почву, мг/кг The amount of fluorine entering the soil, mg/kg
Сточные воды Waste water	до / up to 1840 вблизи отстойников очистных сооружений of fluorine in the vicinity of sewage treatment plants
Промышленные отходы и отходы горнодобывающей промышленности Industrial and mining waste	> 1600 в виде пыли / in the form of dust
С атмосферными выбросами предприятий алюминиевой, стекольной промышленности, заводов по производству суперфосфатных удобрений With atmospheric emissions from aluminum, glass industry enterprises, plants for the production of superphosphate fertilizers	до / up to 900 в верхнем слое почвы вблизи предприятий in the topsoil near enterprises
Суперфосфатные удобрения Superphosphate fertilizers	> 600

Таблица 2 / Table 2

**Точки отбора проб на территориях, обслуживаемых ФМБА России, в которых содержание фтора (водорастворимая форма) превышало ПДК****Sampling points in territories serviced by the FMBA of Russia where the fluorine content (water-soluble form) exceeded the maximum permissible concentration**

№	Точка отбора проб / Sampling point	ПДК, мг/кг MPC, mg/kg	Содержание фтора, мг/кг Fluorine content, mg/kg
	наименование / name		
1	Пересвет, Московская обл., ул. Пионерская, 12, проходная ООО «Курорт Пересвет» Peresvet, Moscow region, Pionerskaya str., 12, passageway, LLC "Resort Peresvet"	10	15
2	Пересвет, Московская обл. ул. Строителей, МБОУ ДО СОШ № 8 Peresvet, Moscow region Stroiteley St., MBOU to Secondary school No. 8		12
3	Пересвет, Московская обл., на границе территории СНТ «Коврово-1» Peresvet, Moscow region, on the border of the territory of the Kovrovo-1 farming co-op		15
4	Обнинск, Калужская обл., Киевское ш., 57 / Obninsk, Kaluga region, Kievskoe highway, 57		15
5	Обнинск, Калужская обл., пр. Ленина, 121 / Obninsk, Kaluga region, Lenin ave., 121		15

ные и газообразные соединения фтора могут перемещаться на расстояния свыше 50 км, что приводит к загрязнению почвы на площади в десятки тысяч гектаров [22]. Поступление фтора из водных объектов также играет значительную роль в увеличении его содержания в почве [23]. Большинство исследований влияния F на окружающую среду посвящено его избыточному содержанию в воде, атмосферном воздухе и рискам, связанным с воздействием этих объектов на здоровье населения [24, 25]. Оценка влияния избыточного содержания фтора в почве населённых мест изучается чаще всего косвенно (применительно к другим объектам окружающей среды). Поскольку почва является естественным накопителем поллютантов, фтор может оставаться в ней длительное время и отрицательно воздействовать на здоровье населения. Для контроля содержания фтора в почве установлены ПДК для нескольких форм: подвижная — 2,8 мг/кг, водорастворимая — 10 мг/кг. Лимитирующим показателем вредности в обоих случаях является транслокационный. С гигиенической точки зрения степень загрязнения почв фтором целесообразно оценивать по водорастворимой форме. По данным исследований, отрицательное влияние фтора на растительность, почвенную микрофлору и здоровье человека определяется в основном содержанием его водорастворимых форм, а также составом и величиной выбросов [26, 27].

Задачи гигиенистов при оценке и профилактике загрязнения почвы промышленными химическими веществами органической и неорганической природы лежат в области изучения технологий производства для определения тех промышленных предприятий, где образуется наибольшее количество загрязняющих веществ, способных оказать влияние на почвенный покров расположенной рядом жилой

застройки и увеличить риски вредного воздействия на здоровье населения. Нами были проведены комплексные натурные исследования территорий, обслуживаемых ФМБА России, для определения загрязнения объектов окружающей среды (вода, атмосферный воздух, почва). В двух населённых пунктах (Обнинск Калужской области и Пересвет Московской области) по результатам анализа проб почв методом пробы неизвестного состава было выявлено превышение содержания фтора (водорастворимая форма) на территории жилой застройки.

В Обнинске и Пересвете из 30 проб почвы, отобранных в точках на территории жилой застройки, пять (три в Пересвете и две в Обнинске) не соответствовали гигиеническому нормативу содержания фтора (водорастворимая форма), ПДК была превышена в 1,2–1,5 раза. В двух пробах почвы, отобранных в Обнинске, содержание фтора было на уровне ПДК — 10 мг/кг. Точки отбора проб на территориях, обслуживаемых ФМБА России, в которых содержание фтора (водорастворимая форма) превышает ПДК, представлены в табл. 2.

Фтор обладает выраженной физиологической активностью, превышение его ПДК на территории жилой застройки может оказать влияние на здоровье населения. С целью прогнозирования возможного отрицательного воздействия на здоровье человека нами был рассчитан коэффициент опасности развития неканцерогенных эффектов (АНҚ) при суммарном пероральном поступлении фтора из почвы. Он составил  $4,76 \cdot 10^{-4}$ , уровень риска настораживающий\*.

\* Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания».

Таблица 3 / Table 3

**Потенциальные источники загрязнения почвы фтором в Обнинске (Калужская область) и Пересвете (Московская область)****Potential sources of soil contamination with fluoride in Obninsk, Kaluga region, and Peresvet, Moscow region**

Предприятие Company	Тип предприятия Type of company	Производство Production	Адрес Address
Фабрика алюминиевого профиля Aluminum Profile Factory	Металлургия (алюминиевые заводы) Metallurgy (Aluminum plants)	Производство радиаторов охлаждения и изделий из алюминиевого профиля Production of cooling radiators and aluminum profile products	Калужская обл., Обнинск Kaluga region, Obninsk
Завод металлических конструкций Ventall Metal Construction Plant	Машиностроение и металлообработка Mechanical engineering and metalworking	Производство стальных конструкций и объектов из стали Production of objects made of steel and steel structures	Калужская обл., Обнинск Kaluga region Obninsk, Kievskoe highway
Машиностроительный завод Machine-building plant	Машиностроение и металлообработка Mechanical engineering and metalworking	Производство аппаратуры и оборудования Production of equipment and equipment	Калужская обл., Обнинск Kaluga Region Obninsk
Предприятие химической промышленности Chemical industry enterprise	Химическая промышленность Chemical industry	Производство моторных масел, антифризов, технических смазок и автохимии Production of motor oils, antifreeze, technical lubricants and auto chemicals	Обнинск, Калужская обл., Киевское ш. Kaluga region Obninsk, Kievskoe highway
Завод по производству труб Pipe Production Plant	Трубные заводы (металлургия) Pipe plants (metallurgy)	Производство электросварных труб Production of electro-welded pipes	Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, Пересвет Moscow region, Sergiev Posad district, city of Peresvet
Научно-исследовательский центр Scientific Research Center	Производители криогенного оборудования (промышленное оборудование) Cryogenic Equipment Manufacturers (Industrial Equipment)	Стендовая отработка Specializes in bench testing	Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, Пересвет Moscow region, Sergiev Posad district, city of Peresvet

Такой уровень является неприемлемым для населения и требует повышенного внимания. Для установления объектов, которые могут быть потенциальными источниками повышенного содержания F в почвах Обнинска и Пересвета, был проведён аналитический поиск данных о типах предприятий (особенности производства, химический состав выбросов, месторасположение – близость предприятий к местам, где обнаружены превышения ПДК). Это позволило сформировать список потенциальных источников загрязнения почвы фтором в изученных населённых пунктах (табл. 3).

## Обсуждение

Исследование почв территорий, обслуживаемых ФМБА России, по принципу пробы неизвестного состава позволило выявить места на территории жилой застройки, где превышены ПДК содержания фтора (водорастворимая форма) в почве. Полученные данные позволяют предположить, что расположенные в Обнинске и Пересвете предприятия могут вносить существенный вклад в загрязнение фтором почвы на территории жилой застройки. Масштаб загряз-

нения и его влияние на почвенный покров и здоровье населения определяют необходимость дополнительных исследований. Контроль содержания фтора в почве лишь вблизи больших производств (холдинги по производству алюминия и др.) является недостаточным. Установлено, что даже небольшие по мощности предприятия могут быть источниками поступления значительного количества фтора в окружающую среду, поэтому необходим регулярный контроль содержания этого элемента в почве.

## Заключение

Мониторинг содержания фтора в почве на протяжении длительного времени позволит выявить источники его поступления и предотвратить негативное воздействие фторидного загрязнения на население. Проведение скрининговых исследований почв по принципу пробы неизвестного состава один раз в год целесообразно внедрить в практику гигиенической оценки качества почв населённых мест для выявления приоритетных токсикантов, специфичных для каждой территории.

## Литература

(п.п. 4–6, 8–13, 16, 17, 20–27 см. References)

- Савенко А.В., Савенко В.С. О водорастворимом фторе почв. *Агрохимия*. 2019; (3): 61–4. <https://doi.org/10.1134/S000218811903013X> <https://elibrary.ru/vubqec>
- Конарбаева Г.А., Смоленцева Е.Н., Демин В.В. Валовое содержание и подвижные формы галогенов (фтора, брома и йода) в почвах Тывы. *Агрохимия*. 2023; (3): 87–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188123030079> <https://elibrary.ru/knwotq>
- Конарбаева Г.А., Смоленцева Е.Н. Фтор и йод в почвах Кулундинской равнины. *Почвоведение*. 2023; (2): 170–83. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600792> <https://elibrary.ru/bkdqqu>
- Плисова Е.Ю., Павлова Е.В. Геоинформационная система мониторинга загрязнения почв соединениями фтора. В кн.: *Адаптация детей и молодежи к современным социально-экономическим условиям на основе здоровьесберегающих технологий: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции*. Абакан; 2021: 113–5. <https://elibrary.ru/gvpoki>
- Куцаков А.Л., Кадычegov А.Н. Водорастворимый фтор как лимитирующий фактор для плодородия почв санитарно-защитной зоны Саяногорского алюминиевого завода. *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*. 2023; (4): 21–3. <https://elibrary.ru/narbzq>
- Якименко В.Н., Конарбаева Г.А., Бойко В.С., Тимохин А.Ю. Изменение содержания фтора в почвах лесостепи Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании. *Агрохимия*. 2020; (4): 38–46. <https://doi.org/10.31857/S0002188120040122> <https://elibrary.ru/dnylbz>
- Бойназаров Б.Р., Абдуллаев Ф.Т. Влияние загрязнения почвы соединениями фтора на её ферментативную активность. *Universum: химия и биология*. 2023; (11–1): 9–11. <https://elibrary.ru/daduai>
- Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях. *Агрохимия*. 2019; (3): 65–71. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030062> <https://elibrary.ru/ywydqd>

## References

1. Savenko A.V., Savenko V.S. On the water-soluble fluorine in soils. *Agrokhimiya*. 2019; (3): 61–4. <https://doi.org/10.1134/S000218811903013X> <https://elibrary.ru/vubqec> (in Russian)
2. Konarbaeva G.A., Smolentseva E.N., Demin V.V. Gross content and mobile forms of halogens (fluorine, bromine and iodine) in the soils of republic of Tyva. *Agrokhimiya*. 2023; (3): 87–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188123030079> <https://elibrary.ru/knwotq> (in Russian)
3. Konarbaeva G.A., Smolentseva E.N. Fluorine and iodine in soils of the Kulunda plain. *Eurasian Soil Sci.* 2023; 56(2): 147–59. <https://doi.org/10.1134/s1064229322602116> <https://elibrary.ru/ecvthe>
4. Dehnen S., Schafer L.L., Lectka T., Togni A. Fluorine: a very special element and its very special impacts on chemistry. *Inorg. Chem.* 2021; 60(23): 17419–25. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c03509>
5. Kyzer J.L., Martens M. Metabolism and toxicity of fluorine compounds. *Chem. Res. Toxicol.* 2021; 34(3): 678–80. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.0c00439>
6. Lubojanski A., Piesiak-Panczyszyn D., Zakrzewski W., Dobrzynski W., Szymonowicz M., Rybak Z., et al. The safety of fluoride compounds and their effect on the human body – a narrative review. *Materials (Basel)*. 2023; 16(3): 1242. <https://doi.org/10.3390/ma16031242>
7. Plisova E.Yu., Pavlova E.V. Geoinformation system for monitoring soil pollution by fluorine compounds. In: *Adaptation of Children and Youth to Modern Socio-Economic Conditions Based on Health-Saving Technologies: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference [Adaptatsiya detei i molodezhi k sovremennym sotsial'no-ekonomicheskim usloviyam na osnove zdorov'esberegayushchikh tekhnologii: Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Abakan; 2021: 113–5. <https://elibrary.ru/gvpoki> (in Russian)
8. Olejarczyk M., Rykowska I., Urbaniak W. Management of solid waste containing fluoride – a review. *Materials (Basel)*. 2022; 15(10): 3461. <https://doi.org/10.3390/ma15103461>
9. Ahn Y., Pandi K., Cho D.W., Choi J. Feasibility of soil washing agents to remove fluoride and risk assessment of fluoride-contaminated soils. *J. Soils Sediment.* 2021; (8): 2770–7.
10. Wang C., Yang Z., Chen L., Yuan X., Liao Q., Ji J. The transfer of fluorine in the soil–wheat system and the principal source of fluorine in wheat under actual field conditions. *Field Crops Res.* 2012; 137: 163–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.001>
11. Guth S., Hüser S., Roth A., Degen G., Diel P., Edlund K., et al. Toxicity of fluoride: critical evaluation of evidence for human developmental neurotoxicity in epidemiological studies, animal experiments and in vitro analyses. *Arch. Toxicol.* 2020; 94(5): 1375–415. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02725-2>
12. He J., Yang Y., Wu Z., Xie C., Zhang K., Kong L., et al. Review of fluoride removal from water environment by adsorption. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020; 8(6): 104516. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104516>
13. Yu Y.Q., Cui S.F., Fan R.J., Fu Y.Z., Liao Y.L., Yang J.Y. Distribution and superposed health risk assessment of fluorine co-effect in phosphorous chemical industrial and agricultural sources. *Environ. Pollut.* 2020; 262: 114249. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114249>
14. Kutsakov A.L., Kadychevov A.N. Water-soluble fluorine as a limiting factor for soil fertility of the sanitary protection zone of the Sayanogorsk aluminum smelter. *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova*. 2023; (4): 21–3. <https://elibrary.ru/napbqz> (in Russian)
15. Yakimenko V.N., Konarbaeva G.A., Boyko V.S., Timokhin A.Yu. Change of fluorine content in soils of the forest-steppe of western Siberia at their agricultural use. *Agrokhimiya*. 2020; (4): 38–46. <https://doi.org/10.31857/S0002188120040122> <https://elibrary.ru/dnylbz> (in Russian)
16. Wang M., Yang J.Y., He W.Y., Li J.X., Zhu Y.Y., Yang X.E. Vertical distribution of fluorine in farmland soil profiles around phosphorous chemical industry factories. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019; 26(1): 855–66. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3647-x>
17. Li B., Zhang L., Cheng M., Chen L., Fang W., Liu S., et al. Evaluation of fluoride emissions and pollution from an electrolytic aluminum plant located in Yunnan province. *J. Hazard. Mater.* 2024; 478: 135500. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135500>
18. Boynazarov B., Abdullayev F. Influence of soil pollution with fluorine compounds on its enzymatic activity. *Universum: khimiya i biologiya*. 2023; (11–1): 9–11. <https://elibrary.ru/daduai> (in Russian)
19. Frid A.S., Borisochkina T.I. Fluorine: migration mobility in technogenic polluted soils. *Agrokhimiya*. 2019; (3): 65–71. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030062> <https://elibrary.ru/ywyddq> (in Russian)
20. Patel J., Gosai H.G., Srivastava V.K., Mujumdar S. Fluoride and fluorocarbon in soil and plant: sources, toxicity, and prevention methods. In: *Fluoride and Fluorocarbon Toxicity: Sources, Issues, and Remediation*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024: 345–66. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-7733-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-97-7733-4_13)
21. Gan C.D., Peng M.Y., Liu H.B., Yang J.Y. Concentration and distribution of metals, total fluorine, per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in vertical soil profiles in industrialized areas. *Chemosphere*. 2022; 302: 134855. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134855>
22. Davydova N.D. Technogenic fluorine in the Siberian steppe soils due to a metallurgical plant operation. In: *Advances in Understanding Soil Degradation*. Cham: Springer International Publishing; 2021: 403–22.
23. Kumar R., Sinha R., Kumari P., Ivy N., Kumar P., Kant N., et al. Bioaccumulation of fluoride in plants and its microbially assisted remediation: a review of biological processes and technological performance. *Processes*. 2021; 9(12): 2154. <https://doi.org/10.3390/pr9122154>
24. Lodh R., Chakraborty S., Khaple S. Study on Contamination of Fluoride in Global Groundwater and Its Various Possible Remedies. In: *Integrated Land and Water Resource Management for Sustainable Agriculture Volume 2*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2025: 109–26.
25. Yadav A., Kumari N., Kumar R., Kumar M., Yadav S. Fluoride distribution, contamination, toxicological effects and remedial measures: a review. *Sust. Wat. Resour. Man.* 2023; 9(5): 150.
26. Sinha B., Behera P.R., Saha B. Fluoride contamination in ecosystem and mitigation strategy. In: *Environmental Contaminants*. Apple Academic Press; 2024: 141–66.
27. He L., Tu C., He S., Long J., Sun Y., Sun Y., 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): 1137–54. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00568-5>

## Сведения об авторах

Евсеева Ирина Сергеевна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. отд. гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: Ievseeva@cspfmba.ru

Ушакова Ольга Владимировна, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: Oushakova@cspfmba.ru

Жернов Юрий Владимирович, доктор мед. наук, доцент, директор НИИ ЭЧиГОС им. А.Н. Сынина ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: YZhernov@cspfmba.ru

## Information about the authors

Irina S. Evseeva, PhD (Medicine), researcher, Hygiene department, Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5765-0192> E-mail: Ievseeva@cspfmba.ru

Olga V. Ushakova, PhD (Medicine), leading researcher of the Hygiene Department Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2275-9010> E-mail: Oushakova@cspfmba.ru

Yury V. Zhernov, DSc (Medicine), Director, A.N. Sytin Research Institute of Human Ecology and Environmental Hygiene, Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119435, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8734-5527> E-mail: YZhernov@cspfmba.ru