

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 504.03; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-214-225

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Гронь Элина Витальевна;

✉ Бурдонов Александр Евгеньевич;

Зелинская Елена Валентиновна.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

✉ [burdonovae@ex.istu.edu](mailto:burdonovae@ex.istu.edu)

**Аннотация.** Представлены результаты оценки состояния почв, подземных вод и атмосферного воздуха в районах деятельности предприятий алюминиевой промышленности Иркутской области. Отходы производства классифицированы по форме, объему и классу опасности. Показано, как загрязняющие вещества из глиноземсодержащих отходов, объем которых ежегодно составляет 400 т, мигрируют из одной части биосфера в другие, оказывая негативное влияние на качество жизни населения. Значительным содержанием как минимум 15 загрязняющих веществ объясняется опасность использования почв и вод в производственно-хозяйственных и бытовых целях, что препятствует рациональному обращению с природными ресурсами. В 99 % случаев рассеивание токсикантов в воздухе происходит при неблагоприятных метеорологических условиях. Результатами исследования подтверждаются высокие экологические риски территории, обосновывается возможность и необходимость вторичного применения твердых отходов производства. Одним из решений проблемы авторы исследования видят экологический мониторинг с определением приоритетных для контроля веществ, разработкой методов их минимизации в компонентах окружающей среды.

**Ключевые слова:** алюминий, металлургия, глиноземсодержащее сырье, техногенные поверхностные образования, геохимическое загрязнение, миграция тяжелых металлов, подземные воды, шламовые поля, качество воздуха, неканцерогенный риск, потребление воздуха

**Для цитирования:** Гронь Э.В., Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В. Экологические риски алюминиевого производства в Иркутской области // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 214–225. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-214-225.

Scientific article

# ENVIRONMENTAL RISKS OF ALUMINUM PRODUCTION IN THE IRKUTSK REGION

Gron Elina V.;

✉ Burdonov Alexander E.;

Zelinskaya Elena V.

Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

✉ burdonovae@ex.istu.edu

*Abstract.* The results of the assessment of the state of soils, groundwater and atmospheric air in the areas of activity of enterprises of the aluminum industry of the Irkutsk region are presented. Industrial waste is classified by form, volume and hazard class. It is shown how pollutants from alumina-containing waste, which annually amount to 400 tons, migrate from one part of the biosphere to others, having a negative impact on the quality of life of the population. The significant content of at least 15 pollutants explains the danger of using soils and waters for industrial, economic and domestic purposes, which hinders the rational management of natural resources. In 99 % of cases, the dispersion of toxicants in the air occurs under unfavorable meteorological conditions. The results of the study confirm the high environmental risks of the territory, substantiate the possibility and necessity of recycling solid production waste. The authors of the study see environmental monitoring as one of the solutions to the problem, with the identification of priority substances for control and the development of methods for minimizing them in environmental components.

**Keywords:** aluminum, metallurgy, alumina-containing raw materials, man-made surface formations, geochemical pollution, migration of heavy metals, groundwater, sludge fields, air quality, non-carcinogenic risk, air consumption

**For citation:** Gron E.V., Burdonov A.E., Zelinskaya E.V. Environmental risks of aluminum production in the Irkutsk region // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 214–225. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-214-225.

## Введение

Алюминиевая промышленность России – динамично развивающаяся отрасль. На мировом рынке алюминий выпускается в объемах, превышающих совокупный показатель всех цветных металлов. Это объясняется высоким спросом у предприятий авиастроения [1, 2].

Производство алюминия – энергоемкий процесс, протекающий в условиях высоких температур, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду [3]. Предприятия производят 0,45–0,5 Гт выбросов эквивалента диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) в год, 1 % антропогенных выбросов парниковых газов [4, 5] и 2,5 % –  $\text{CO}_2$ .

Алюминий – третий по распространенности в земной коре (7,96 %), редко встречается в элементарной форме – его необходимо извлекать из минерального рудного сырья. В 2023 г. в мире было добыто 300 млн т бокситовой руды, произведено 130,9 млн т оксида алюминия (глинозема), выплавлено 60 млн т первичного алюминия [6]. Прогнозируется рост спроса на алюминий вдвое в течение десяти лет, консервативно мнение об увеличении в два-три раза к 2050 г. с использованием больших природных ресурсов и образованием отходов, что сопровождается определенными экорисками [7, 8].

Иркутская обл. является одним из лидеров в России по производству первичного алюминия. По данным отчетов, в 2022–2023 гг. алюминиевые заводы региона произвели 1 542 тыс. т металла – 39,9 % от общего продукта в России и 5 % от мирового [9].

При производстве образуются газообразные отходы – оксиды углерода [10]. К твердым формам относят: ртутные лампы, отработанные свинцовые аккумуляторы, загрязненные отходы угольных анодов, пыль, минеральный шлам, лом футеровки, гидрофобные продукты флотации, отходы ремонта электролизеров. Для размещения предусмотрены шламонакопители, полигон промышленных отходов, свалка нетоксичных строительно-промышленных отходов, золоотвал [11].

По данным Минприроды Иркутской обл. за 2018–2022 гг., на долю технологических отходов приходится 56,63 % от общей массы отходов алюминиевого предприятия. Отходы I (ртутные лампы) и II (аккумуляторы свинцовые) классов опасности предприятие передает Федеральному экологическому оператору (ФЭО). Общезаводские отходы IV–V классов опасности занимают 35,24 % всех производственных отходов. Отходы V класса используются на производстве и сторонними организациями на 66,32 %, на полигонах алюминиевого завода складируется 17 % обрези натуральной чистой древесины, большой объем неутилизируемых отходов относится к III–IV классам опасности.

1. III класс опасности (т): отходы угольных анодов, загрязненные фторидами металлов, – 12 042,22, в том числе использовано 11 073,91; размещено на объектах предприятия 968,31 (8 %); пыль электрофильтров – 17 968,575 и 19 781,851 минерального шлама от газоочистки со 100 % размещением на объектах предприятия; отходы очистки зеркала криолит-глиноземного расплава при производстве алюминия – 143 589,82 со 100 % использованием или передачей сторонним организациям.

2. IV класс опасности (т): гидрофобный продукт флотации – 51 964,76 со 100 % размещением на объектах предприятия; лом футеровок – 114 283,46, из которых 82 212,797 (71,9 %) размещено на территории предприятия.

Установлено, что из отходов III класса опасности в 100 % объеме складируют шлам, содержащий сульфат натрия, и пыль газоочистки, с которой в почву поступают криолит, металлы бериллий, галлий, никель, способные мигрировать в естественных условиях. Из отходов IV класса опасности переработке не подвергают хвосты флотации – источник фторглиноземного концентрата, углеродсодержащего продукта. Отработанная футеровка с повышенными концентрациями криолита и соединений углерода вторично используется на 29,1 % [12, 13].

При производстве алюминия в России образуется глиноземсодержащий смет, непригодный для повторного электролиза из-за высоких концентраций соединений железа и кремния. Использование данного вида отходов без очистки от примесей снижает технико-экономические показатели работы предприятия (повышенное энергопотребление и низкое качество получаемого металла). Именно поэтому глинозем складируется или добавляется в технологические процессы в незначительных количествах. Из-за содержания в сырье как минимум 15 веществ возможна их миграция в почву с ухудшением ее геохимического и гигиенического качества [14, 15].

В настоящей работе предпринята попытка оценить экологические риски одного из предприятий Иркутской обл. путем анализа состояния почв, подземных вод и воздуха на промышленной территории и за ее пределами.

## Материалы и методы исследования

В работе использовались методы систематизации, анализа и сопоставления информации о воздействии объектов металлургии Иркутской обл. на окружающую среду и здоровье людей. Основой анализа послужили госдоклады Министерства природных ресурсов и экологии Иркутской обл., отчеты о деятельности алюминиевых предприятий ОГКУЗ «Медицинский информационно-аналитический центр». Интерпретированы научно-технические отчеты по результатам научно-исследовательских работ по очистке от примесей глиноземсодержащего сырья для вторичного использования в процессе электролиза.

Расчет интегральных показателей мониторинга качества почвы проводили по методике из ГОСТ 17.4.3.06–86 и воздуха по методике из ГОСТ 17.2.1.03–84.

## Результаты

По данным АО «РУСАЛ Всероссийский алюминиево-магниевый институт», в техногенных поверхностных образованиях (ТПО) и грунтах территорий вблизи предприятий алюминиевой промышленности Иркутской обл. содержатся кадмий, ртуть, марганец, железо, алюминий, мышьяк, никель и другие компоненты, опасные для человека и окружающей среды. Концентрации свинца и цинка (I класс опасности), меди, хрома и кобальта (II класс опасности) выше двух и более фоновых региональных значений (рис. 1).

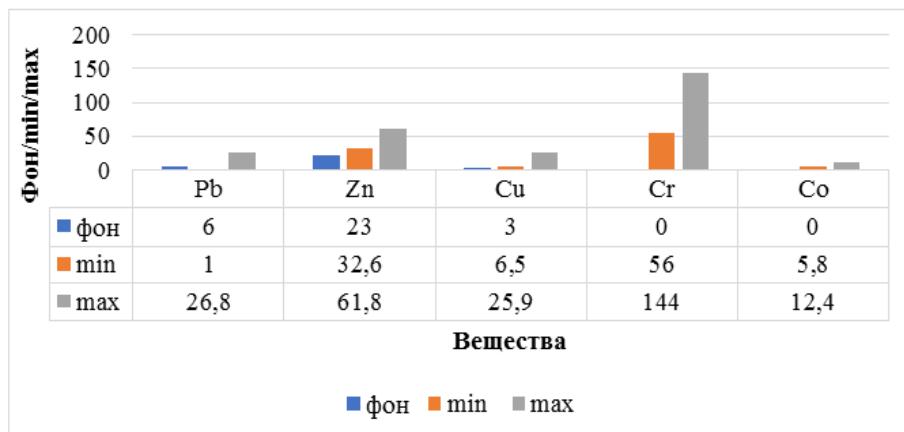


Рис. 1. Превышение фоновых концентраций химических соединений в почвах на территории алюминиевого завода в Иркутской обл.

Средний уровень накопления свинца – 11,9 мг/кг, региональные фоновые значения превысили в 44,8 % случаев (39 из 87 проб). К сильной категории загрязнения цинком относятся 10 % проб. Концентрация меди равна 4,1–25,9 мг/кг (среднее – 11,7), допустимыми характеризуются 4 % изучаемых на заводе образцов грунта и ТПО. В пробах 42–144 мг/кг хрома (среднее – 91), только 1/50 часть материала допустимая. Относительно постоянным является показатель кобальта, не выходящий за 14,1 мг/кг.

Основываясь на шести образцах с полиэлементным содержанием, авторы рассчитали геохимический уровень загрязнения по формуле:

$$z_c = \sum_{j=1}^m k_{c_j} - (m - 1),$$

где  $k_{c_j}$  – коэффициенты концентраций веществ в почве, равные  $\bar{C}_j / C_{\text{фр}j}$  (средняя и фоновая региональная концентрации соответственно);  $m$  – число определяемых веществ.

Геохимическое загрязнение почв тяжелыми металлами, металлоидами и соединениями алюминия составляет 18; 16,6; 16,6; 17,7; 23,2 и 17,9 соответственно. Степень загрязнения – умеренно опасная, так как  $z_c = 16–32$ .

Таким образом, глиноземсодержащие, складируемые на заводе отходы можно использовать при обустройстве промплощадки. Уровень загрязнения почвы не допускает ее применение в сельском хозяйстве. Наиболее эффективно вторичное использование отходов в производстве.

В результате ранее проводимых исследований Иркутского национального исследовательского технического университета и предприятий определены гранулометрический, химический составы глиноземсодержащих отходов до и после переработки по действующей технологической схеме – Na, Al, F, C, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, влага, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, AlF<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Для вторичного использования глиноземсодержащего сырья в электролизе массовая доля примесей железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) должна составлять до 0,2 %, а примесей кремния ( $\text{SiO}_2$ ) – до 0,3 %. Опытным же путем установлено, что реализуемая технологическая схема не обеспечивает таких условий. После цикла, состоящего из нескольких этапов грохочения, магнитной сепарации, дробления, доставки транспортом, на электролиз поступает материал, в котором 0,42 % оксида железа и 1,88 % оксида кремния. Предприятие складирует неликвидные отходы в больших объемах, что снижает экологическую безопасность алюминиевого производства, повышает антропогенную нагрузку на окружающую среду [16, 17].

Негативное воздействие алюминиевых предприятий Иркутской обл. на водные ресурсы возможно при их заборе из централизованной системы водоснабжения, передаче хозяйствственно-бытовых сточных вод в централизованную систему городской инфраструктуры с последующей очисткой и сбросом в реку, оседании загрязненных выбросами предприятия атмосферных осадков на водную поверхность и водосборную площадь, фильтрации через дно и откосы шламонакопителей, расположенных на правобережных и левобережных поймах рек.

Максимальные показатели качества подземных вод в пределах завода (содержание / ПДК, мг/дм<sup>3</sup>): нефтепродукты (0,095/0,3), Al (0,38/0,2), Fe (2,256/0,3), Mn (0,12/0,1), сульфаты (488,8/500), фториды (1,408/1,5). Индекс загрязненности (ИЗВ) был рассчитан по формуле:

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^m \left( \frac{c_j}{\text{ПДК}} \right),$$

где  $c_j$  – фактическая концентрация вещества в воде.

Количественный показатель 2,14 характеризует подземные воды в пределах производства как загрязненные, пригодные для хозяйственно-питьевого пользования только со специальной очисткой. Для культурно-бытовых нужд применение таких вод сомнительно.

Таким образом, загрязнение подземных вод – результат взаимодействия шлама с технической водой системы шламоудаления. Снизить фильтрационные потери можно путем комплексной оценки объемов утечки из гидротехнических сооружений шламовых полей, зонирования площадей размещения отходов. Сеть скважин необходима для экомониторинга мест скопления отходов. Контролю подлежат сульфаты и криолит, обладающие высокой водорастворимостью. Следует изучить, насколько возможна переработка содержащихся в них тонкодисперсных отходов с ценными для электролиза железом и алюминием.

Стоит учесть, что шламовые воды нельзя считать загрязненными: они находятся в границах гидротехнических сооружений шламонакопителей. Однако превышение предельно-допустимых концентраций (ПДК) в подземных водах потенциально опасно для окружающей среды [18].

Высок уровень загрязнения атмосферного воздуха в одном из районов алюминиевой промышленности Иркутской обл. По официальным данным, в 2022 г. было составлено 201 предупреждение об ухудшении обстановки с вероятностью 99 % – рассеивании загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях [19].

Динамика превышения ПДК (данные из госдокладов Минприроды Иркутской обл. о состоянии и об охране окружающей среды): 2018 г. – оксид углерода (1,6 ПДК), плохо растворимые фториды (1,7 ПДК), фторид водорода (2 ПДК), пыль неорганическая (1,5 ПДК), диоксид серы (ПДК); 2019 г. – оксид углерода (ПДК), плохо растворимые фториды (1,3 ПДК), фторид водорода (2,2 ПДК), пыль неорганическая (1,4 ПДК), диоксид серы (ПДК); 2020 г. – оксид углерода (4,1 ПДК), плохо растворимые фториды (1,3 ПДК), фторид водорода (1,7 ПДК), пыль неорганическая (1,6 ПДК), диоксид серы (ПДК); 2021 г. – оксид углерода (2,2 ПДК), плохо растворимые фториды (ПДК), фторид водорода (1,1 ПДК), пыль неорганическая (10 ПДК), диоксид серы (ПДК); 2022 г. – оксид углерода (2 ПДК), плохо растворимые фториды (1,3 ПДК), фторид водорода (2,8 ПДК), пыль неорганическая (2,6 ПДК), диоксид серы (1,2 ПДК).

Авторами был рассчитан индекс загрязненности атмосферы (ИЗА), отражающий качество воздуха, по формуле [20]:

$$\text{ИЗА} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{c_j}{\text{ПДК}} \right)^{p_i},$$

где  $c_j$  – среднегодовая концентрация вещества в атмосфере, определяемых веществ;  $p_i$  – показатель, зависящий от класса опасности вещества I–IV (1,7; 1,3; 1,0; 0,9 соответственно).

Результаты расчетов ИЗА: 2018 г. – 8,52; 2019 г. – 7,6; 2020 г. – 9,6; 2021 г. – 15,3; 2022 г. – 10,87. Воздух загрязненный (за исключением 2021 г., когда атмосфера была сильно загрязненной).

На основании данных был оценен неканцерогенный риск здоровью сотрудников производства и жителей района по формулам [21, 22]:

$$m = \frac{C \cdot f \cdot T_v}{P \cdot T},$$

где  $C$  – концентрация токсиканта в воздухе ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );  $V$  – объем воздуха, поступающего в легкие ( $20 \text{ м}^3$ );  $f$  – дни воздействия токсиканта за год;  $T_v$  – количество лет воздействия токсиканта;  $P$  – средняя масса тела человека (70 кг);  $T$  – усредненное время воздействия токсиканта (30 лет или 10 950 сут).

$$HQ = \frac{m}{H_v},$$

где  $H_v$  – пороговая мощность дозы.

Если индекс меньше 1, экологическая обстановка считается безопасной. В остальных случаях у людей могут наблюдаться заболевания. Согласно Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания», риск возрастает прямо пропорционально индексу опасности.

Риск угрозы здоровью людей при воздействии веществ, содержащихся в воздухе районов алюминиевой промышленности Иркутской обл. (вещество, среднесуточное поступление –  $m$  / индекс опасности –  $H$ ), выражен отметками максимальной опасности:

1. Сотрудник завода (за год работы с учетом отпуска 36 дней и 118 выходных и праздничных дней в 2024 г.): оксид углерода (0,25/5,3); плохо растворимые фториды (0,0015/0,79); фторид водорода (0,0057/1,2); пыль неорганическая (0,0059/2,03); диоксид серы (0,003/0,63). Суммарный индекс – 9,95.

2. Житель района (за 15 лет проживания в районе предприятия): оксид углерода (6,229/132,5); плохо растворимые фториды (0,0377/19,8); фторид водорода (0,14/29,4); пыль неорганическая (0,146/50,3); диоксид серы (0,074/15,6). Суммарный индекс – 247,6.

В опубликованной статистике ОГКУЗ «Медицинский информационно-аналитический центр Иркутской области» также приводятся данные о негативном воздействии токсикантов на жителей города и района. В 2021 г. из каждого 100 тыс. чел. 54 351 имел заболевания органов дыхания, в районе – 45 885. Заболевания системы кровообращения диагностированы у 23 156 горожан и у 21 923 жителей района. У сотрудников литьевого производства, по данным специальной оценки условий труда, установлены вредные условия труда 1 степени (класс 3.1) по химическому фактору.

Для снижения негативного воздействия алюминиевого производства на окружающую среду и человека авторы предлагают контролировать содержание веществ в атмосфере. Понимая, что мониторинг всех химических соединений невозможен по технико-экономическим причинам, они приводят приоритетный список. Последовательность составлена на основе сравнения требуемого потребления воздуха (ТПВ) и реального потребления воздуха (РПВ) – объемов, необходимых для снижения содержания веществ до ПДК и районной концентрации соответственно [23–24].

### Исходные данные:

1. Оксид углерода – объем выбросов, М (тыс. т/год) = 60,473; ПДК<sub>cc</sub> (мг/м<sup>3</sup>) = 3; ПДК<sub>mp</sub> (мг/м<sup>3</sup>) = 5; q<sub>cp</sub> (мг/м<sup>3</sup>) = 3; q<sub>mp</sub> (мг/м<sup>3</sup>) = 10.
2. Плохо растворимые фториды – объем выбросов = 1,426; ПДК<sub>cc</sub> = 0,03; ПДК<sub>mp</sub> = 0,2; q<sub>cp</sub> = 0,39; q<sub>mp</sub> = 0,56.
3. Фторид водорода – объем выбросов = 0,978; ПДК<sub>cc</sub> = 0,005; ПДК<sub>mp</sub> = 0,02; q<sub>cp</sub> = 0,005; q<sub>mp</sub> = 0,056.
4. Пыль неорганическая – объем выбросов = 2,95; ПДК<sub>cc</sub> = 0,3; ПДК<sub>mp</sub> = 0,5; q<sub>cp</sub> = 0,3; q<sub>mp</sub> = 1,5.
5. Диоксид серы – объем выбросов = 6,973; ПДК<sub>cc</sub> = 0,05; ПДК<sub>mp</sub> = 0,5; q<sub>cp</sub> = 0,05; q<sub>mp</sub> = 0,6.

При вычислении среднесуточных и максимально разовых параметров воспользовались формулами [25]: ТПВ<sub>cc</sub> = M / ПДК<sub>cc</sub>; ТПВ<sub>mp</sub> = M / ПДК<sub>mp</sub>; РПВ<sub>cc</sub> = M / q<sub>cp</sub>; РПВ<sub>mp</sub> = M / q<sub>mp</sub>.

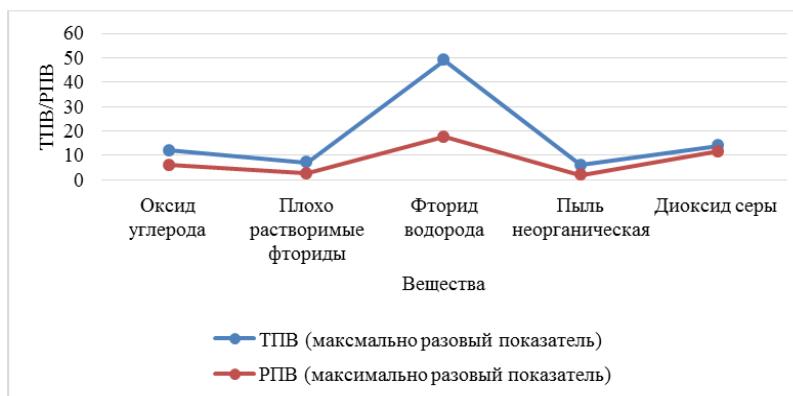
Результаты отражены на графике (рис. 2), что позволяет оценить, как отличаются требуемое и реальное потребление воздуха.



**Рис. 2. Требуемое и реальное потребление воздуха в районе алюминиевого производства (средний показатель)**

По графику видно, что ТПВ и РПВ у четырех из пяти потенциально опасных веществ совпадают. Значительная разница наблюдается у плохо растворимых фторидов – ТПВ составляет 47,6, тогда как РПВ – 3,66. Можно сделать вывод о том, что все химические соединения, выбрасываемые алюминиевым заводом в атмосферу, подлежат контролю. Приоритетный список от большего к меньшему выглядит так: фторид водорода, диоксид серы, плохо растворимые фториды, оксид углерода, пыль неорганическая.

Ниже показано, как соотносятся ТПВ и РПВ, для расчета которых важна максимальная разовая концентрация и ПДК веществ (рис. 3).



**Рис. 3. Требуемое и реальное потребление воздуха в районе алюминиевого производства (максимально разовый показатель)**

Согласно максимальным разовым концентрациям и ПДК веществ, подлежащих контролю, приоритетный список такой: фторид водорода, диоксид серы, оксид углерода, плохо растворимые фториды, пыль неорганическая.

Для определения источников и объемов выбросов химических соединений необходимо установить системы автоматического контроля. К такому решению обязывает наличие факторов, обозначенных в постановлении Правительства Российской Федерации от 22 января 2024 г. № 39 «Об особенностях создания и эксплуатации систем автоматического контроля, указанных в Федеральном законе «Об охране окружающей среды» (Постановление), на квотируемых объектах в части контроля выбросов приоритетных загрязняющих веществ». Источники выбросов на заводе стационарные и организованные, газообразные отходы образуются при выполнении технологических операций и эксплуатации сооружений. Загрязняющие вещества согласно Приложению 1 Постановления являются приоритетными для мониторинга.

Требования к автоматизированным системам измерения и учета представлены в Приложении 2 Постановления. Перерывы в работе не должны превышать 28 календарных дней в году, что контролируется Росприроднадзором. Превышения ПДК фиксируются в годовых отчетах предприятий и Минприроды. Срок хранения информации – не менее года.

Путем комплексного подхода к оценке загрязненности атмосферы удастся определить источники с максимальными выбросами и разработать меры по их снижению.

Согласно приказу Минтруда № 776н при повышенной концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны предприятие обеспечивает сотрудников средствами индивидуальной защиты. Для минимизации загрязненности предусмотрено снижение выбросов на 5,6 т (17,2 % от города) к 2026 г. путем замены электролизеров. Программа модернизации входит в план мероприятий федерального проекта «Чистый воздух».

## Заключение

Расчетными методами авторы установили, что глиноземсодержащее сырье, образуемое в объеме 400 т ежегодно, представляет угрозу для почв и подземных вод Иркутской обл. В отходах содержатся тяжелые металлы, которые мигрируют при определенных погодно-климатических условиях и нарушении гидротехнических сооружений. В результате компоненты окружающей среды теряют свое хозяйствственно-бытовое назначение. Индекс опасности почв достигает 23,2 (умеренно опасные), подземных вод – 29,5 (чрезвычайно грязные).

При длительном хранении твердые промышленные отходы алюминиевого производства выбрасывают в атмосферу загрязняющие вещества, снижая ее качество. Для работников заводов показатель опасности составляет 9,95 за год, для жителей района – 247,6 за 15 лет. Это проявляется в заболеваниях органов дыхания и системы кровообращения.

В статье предложены меры по защите окружающей среды от антропогенного воздействия. По мнению авторов, алгоритм действия должен включать зонирование площадей размещения отходов, контроль содержания в них загрязняющих веществ, своевременную переработку глиноземсодержащих отходов. В настоящий момент данное условие не соблюдается: примеси железа и кремния превышают 0,2 и 0,3 % соответственно. Именно поэтому следующий этап исследования – разработка новых схем переработки данного типа сырья.

В случае повторного вовлечения глиноземсодержащего сырья в производство сократятся площади, подвергаемые загрязнению. После дополнительной очистки грунт можно использовать в хозяйственных целях в зависимости от остаточного содержания в нем тяжелых металлов. Это способствует поддержанию качества подземных вод на уровне, допускающем их применение для нужд предприятия. В то же время будут минимизированы выбросы в атмосферу, что улучшит условия проживания, работы и отдыха людей. Ожидается снижение

заболеваемости и обращений за медпомощью с нарушениями в работе органов дыхания, системы кровообращения, а также положительная динамика в продолжительности жизни населения районов алюминиевой промышленности.

### Список источников

1. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Ч. 1. Традиционные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 2. С. 36–41. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.04.
2. Сизяков В.М., Поляков П.В., Бажин В.Ю. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 16–23.
3. Gang Liu, Daniel B. Müller. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments // Journal of Cleaner Production. 2012. Vol. 35. P. 108–117. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.030.
4. Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK / J. Malinauskaitė [et al.] // Energy. 2019. Vol. 172. P. 255–269. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.130.
5. Кузнецова А.Р., Кузнецов А.И. Тенденции выбросов парниковых газов в Российской Федерации // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2024. № 1 (34). С. 104–132. DOI: 10.24412/2949-4052-2024-1-104-132.
6. Логинов О.Н., Немчинова Н.В. Криолитовое отношение – важный технологический параметр работы алюминиевых электролизеров // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12. № 2. С. 423–429.
7. Боркова Е.А., Голубятникова М.В., Григорьян А.Н. Мультиплексор и инвестиции в современной России в контексте стимулирования экономического развития в условиях санкций // Экономика и управление. 2024. Т. 30. № 6. С. 677–685. DOI: 10.35854/1998-1627-2024-6-677-685.
8. Шпаков А.С., Бурдонов А.Е. Основные проблемы на пути внедрения экологического менеджмента в Российской Федерации // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер.: Экономика и экологический менеджмент. 2019. № 1. С. 154–162. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-154-162.
9. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия / А.Е. Бурдонов [и др.] // Цветные металлы. 2018. № 3. С. 32–38. DOI: 10.17580/tsm.2018.03.05.
10. Переработка глиноземсодержащего смета для использования в производстве первичного алюминия / А.Е. Бурдонов [и др.] // Цветные металлы. 2022. № 8. С. 15–22. DOI: 10.17580/tsm.2022.08.02.
11. ESG-трансформации в сфере переработки техногенного минерального сырья / И.В. Шадрунова [и др.] // Горная промышленность. 2023. № 1. С. 71–78. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-71-78.
12. The use of carbon-containing wastes of aluminum production in ferrous metallurgy / M.P. Kuz'min [et al.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. Т. 63. № 10. С. 836–841. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-836-841.
13. Waste as substrates for agricultural biogas plants: A case study from Poland / W. Czekała [et al.] // J. Water Land Dev. 2023. № 56. P. 1–6.
14. Wojciech Czekała. Modern Technologies for Waste Management: A Review // Appl. Sci. 2023. № 13 (15). P. 8847. DOI: 10.3390/app13158847/.
15. Термодинамика выщелачивания фтора из отходов алюминиевого производства / Е.Б. Тимкина [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12. С. 190–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-182-192.

16. Получение портландцементного клинкера с использованием добавки на основе синтетического флюорита и графитированного углерода / Б.П. Куликов [и др.] // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 10. С. 42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-10-42-47.
17. Эксперимент по использованию техногенных отходов Братского алюминиевого завода в качестве восстановителя при выплавке чугуна / Н.В. Немчинова [и др.] // Металлург. 2018. № 2. С. 56–60.
18. Белых Л.И., Тимофеева С.С. Мониторинг безопасности: практические работы и методические указания по их выполнению. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 137 с.
19. Иванков С.И., Троицкий А.В. Проблемы переработки и утилизации многотоннажных отходов алюминиевой промышленности и пути их решения (обзор) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 3. С. 2–26.
20. Белых Л.И., Тимофеева С.С. Мониторинг безопасности: практические работы и методические указания по их выполнению. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 137 с.
21. Ultrafine particulate matter impairs mitochondrial redox homeostasis and activates phosphatidylinositol 3-kinase mediated DNA damage responses in lymphocytes Environ / A. Bhargava [et al.] // Pollut. 2018. № 234. P. 406–419.
22. Combustion-and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts / L. Calderón-Garcidueñas [et al.] // Environ. Res. 2019. № 176. Article 108567.
23. Shahjadi Hisan Farjana, Nazmul Huda, M.A. Parvez Mahmud Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 663. P. 958–970.
24. Дампилон Ж.В. Влияние производства алюминия в России на окружающую среду // Вестник Чувашского университета. 2008. № 3. С. 349–354.
25. Тимофеева С.С. Методы и технологии оценки производственных рисков: практикум. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2014. 180 с.

## References

1. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Elektroliticheskoe proizvodstvo alyuminiya. Obzor. Ch. 1. Tradicionnye napravleniya razvitiya // Cvetnye metally. 2020. № 2. S. 36–41. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.04.
2. Sizyakov V.M., Polyakov P.V., Bazhin V.Yu. Sovremennye tendencii i strategicheskie zadachi v oblasti proizvodstva alyuminiya i ego splavov v Rossii // Cvetnye metally. 2022. № 7. S. 16–23.
3. Gang Liu, Daniel B. Müller. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments // Journal of Cleaner Production. 2012. Vol. 35. P. 108–117. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.030.
4. Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK / J. Malinauskaitė [et al.] // Energy. 2019. Vol. 172. P. 255–269. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.130.
5. Kuznecova A.R., Kuznecov A.I. Tendencii vybrosov parnikovyh gazov v Rossijskoj Federacii // Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnnyh resursov. 2024. № 1 (34). S. 104–132. DOI: 10.24412/2949-4052-2024-1-104-132.
6. Loginov O.N., Nemchinova N.V. Kriolitovoe otnoshenie – vazhnyj tekhnologicheskij parametr raboty alyuminievyh elektrolizerov // Molodezhnyj vestnik IrGTU. 2022. Т. 12. № 2. S. 423–429.
7. Borkova E.A., Golubyatnikova M.V., Grigor'yan A.N. Mul'tiplikator i investicii v sovremennoj Rossii v kontekste stimulirovaniya ekonomicheskogo razvitiya v usloviyah sankcij // Ekonomika i upravlenie. 2024. Т. 30. № 6. S. 677–685. DOI: 10.35854/1998-1627-2024-6-677-685.
8. Shpakov A.S., Burdonov A.E. Osnovnye problemy na puti vnedreniya ekologicheskogo menedzhmenta v Rossijskoj Federacii // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Ser.: Ekonomika i ekologicheskij menedzhment. 2019. № 1. S. 154–162. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-154-162.

9. Izuchenie veshchestvennogo sostava glinozem-soderzhashchego materiala alyuminievyyh elektrolizerov dlya ispol'zovaniya v tekhnologii pervichnogo alyuminiya / A.E. Burdonov [i dr.] // Cvetnye metally. 2018. № 3. S. 32–38. DOI: 10.17580/tsm.2018.03.05.
10. Pererabotka glinozem-soderzhashchego smeta dlya ispol'zovaniya v proizvodstve pervichnogo alyuminiya / A.E. Burdonov [i dr.] // Cvetnye metally. 2022. № 8. S. 15–22. DOI: 10.17580/tsm.2022.08.02.
11. ESG-transformacii v sfere pererabotki tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya / I.V. Shadrunova [i dr.] // Gornaya promyshlennost'. 2023. № 1. S. 71–78. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-71-78.
12. The use of carbon-containing wastes of aluminum production in ferrous metallurgy / M.P. Kuz'min [et al.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. T. 63. № 10. S. 836–841. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-836-841.
13. Waste as substrates for agricultural biogas plants: A case study from Poland / W. CzeKała [et al.] // J. Water Land Dev. 2023. № 56. P. 1–6.
14. Wojciech CzeKała. Modern Technologies for Waste Management: A Review // Appl. Sci. 2023. № 13 (15). P. 8847. DOI: 10.3390/app13158847/.
15. Termodinamika vyshchelachivaniya ftora iz othodov alyuminievogo proizvodstva / E.V. Timkina [i dr.] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. T. 20. № 12. S. 190–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-182-192.
16. Poluchenie portlandcementnogo klinkera s ispol'zovaniem dobavki na osnove sinteticheskogo flyuorita i grafitirovannogo ugleroda / B.P. Kulikov [i dr.] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2023. T. 27. № 10. S. 42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-10-42-47.
17. Ivankov S.I., Troickij A.V. Problemy pererabotki i utilizacii mnogotonnazzhnyh othodov alyuminievoj promyshlennosti i puti ih resheniya (obzor) // Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy. 2020. № 3. S. 2–26.
18. Eksperiment po ispol'zovaniyu tekhnogennyh othodov bratskogo alyuminievogo zavoda v kachestve vosstanovitelya pri vyplavke chuguna / N.V. Nemchinova [i dr.] // Metallurg. 2018. № 2. S. 56–60.
19. Belyh L.I., Timofeeva S.S. Monitoring bezopasnosti: prakticheskie raboty i metodicheskie ukazaniya po ih vypolneniyu. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2015. 137 s.
20. Ultrafine particulate matter impairs mitochondrial redox homeostasis and activates phosphatidylinositol 3-kinase mediated DNA damage responses in lymphocytes Environ / A. Bhargava [et al.] // Pollut. 2018. № 234. P. 406–419.
21. Ultrafine particulate matter impairs mitochondrial redox homeostasis and activates phosphatidylinositol 3-kinase mediated DNA damage responses in lymphocytes Environ / A. Bhargava [et al.] // Pollut. 2018. № 234. P. 406–419.
22. Combustion-and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts / L. Calderón-Garcidueñas [et al.] // Environ. Res. 2019. № 176. Article 108567.
23. Shahjadi Hisan Farjana, Nazmul Huda, M.A. Parvez Mahmud Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 663. P. 958–970.
24. Dampilon Zh.V. Obzor proizvodstva vliyayet v Rossii na okruzhayushchuyu sredu // Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2008. № 3. S. 349–354.
25. Timofeyeva S.S. Metody i tekhnologii otsenki proizvodstvennykh riskov: praktikum. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2014. 180 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 23.12.2024; одобрена после рецензирования: 10.02.2025;  
принята к публикации: 13.02.2025

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 23.12.2024; approved after review: 10.02.2025;  
accepted for publication: 13.02.2025

*Информация об авторах:*

**Гронь Элина Витальевна**, младший научный сотрудник Иркутского национального исследовательского технического университета (664073, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), e-mail: elinagron@yandex.ru

**Бурдонов Александр Евгеньевич**, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды Иркутского национального исследовательского технического университета (664073, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, доцент, e-mail: burdonovae@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5356-0349>, SPIN-код: 6676-0131

**Зелинская Елена Валентиновна**, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды Иркутского национального исследовательского технического университета (664073, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, профессор, e-mail: zelinskaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3411-8889>, SPIN-код: 4811-2620

*Information about the authors:*

**Gron Elina V.**, junior researcher of Irkutsk national research technical university (664073, Irkutsk, Lermontova, 83), e-mail: elinagron@yandex.ru

**Burdonov Alexander E.**, associate professor, associate professor of the department of mineral processing and environmental protection of Irkutsk national research technical university (664073, Irkutsk, Lermontova, 83), candidate of technical sciences, e-mail: burdonovae@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5356-0349>, SPIN: 6676-0131

**Zelinskaya Elena V.**, professor of the department of mineral processing and environmental protection of Irkutsk national research technical university (664073, Irkutsk, Lermontova, 83), doctor of science, professor, e-mail: zelinskaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3411-8889>, SPIN: 4811-2620