

Исследование выбросов алюминия, фтора и углерода Кандалакшского алюминиевого завода после модернизации производства

Шпанько В. И. , Ткаченко Е. А. , Немченко Т. Н. 

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва, shpanko@geokhi.ru

Аннотация. В работе изучено влияние выбросов алюминия, фтора и углерода на окружающую среду в районе Кандалакшского алюминиевого завода (КАЗ) до и после модернизации. Проведен анализ аэрогенных выбросов, в частности CO_2 , соединений алюминия и фтора, в зоне воздействия КАЗа. Приведено сравнение объема выбросов в атмосферу, выпадения в почву и содержания в подстилке фтора и алюминия до и после модернизации завода. После запуска газоочистных сооружений выявлено значительное уменьшение загрязнения фтором объектов ландшафта КАЗа и улучшение их состояния. Однако, длительное поступление загрязняющих веществ вызвало глубокие трансформации свойств почв, прилегающих непосредственно к предприятию, и их биологических комплексов. Модернизация не способствовала уменьшению количества выбросов алюминия и его негативное влияние отразилось на компонентах окружающей среды, в том числе и малых озерах территории воздействия завода. Установка газоочистной системы не оказала влияние на уменьшение объема выбросов CO_2 , над чем в данный момент работает завод.

Ключевые слова: выбросы, загрязнение, алюминий, фтор, углерод, модернизация, Кандалакшский алюминиевый завод

A Study of Aluminum, Fluorine, and Carbon Emissions from the Kandalaksha Aluminum Plant after Production Modernization

Shpanko V. I. , Tkachenko E. A. , Nemchenko T. N. 

V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS), Moscow, shpanko@geokhi.ru

Abstract. This paper examines the environmental impact of aluminum, fluorine, and carbon emissions near the Kandalaksha Aluminum Plant (KAP) before and after modernization. Airborne emissions, specifically CO_2 , aluminum, and fluorine compounds, were analyzed within the KAP footprint. A comparison was made of atmospheric emissions, soil deposition, and litter content of fluorine and aluminum before and after the plant's modernization. After the launch of gas treatment facilities, a significant reduction in fluorine pollution of KAP landscape features and an improvement in their condition were observed. However, the long-term influx of pollutants caused profound changes in the properties of soils adjacent to the plant and their biological systems. The modernization did not reduce aluminum emissions, and its negative impact was felt on environmental components, including small lakes within the plant's vicinity. The installation of a gas treatment system did not reduce CO_2 emissions, which the plant is currently working on.

Keywords: emissions, pollution, aluminum, fluorine, carbon, modernization, Kandalaksha Aluminum Plant

Введение

Алюминиевая отрасль широко востребована во всем мире благодаря незаменимым качествам алюминия для промышленного использования. Объемы его производства растут с каждым годом. Россия, Китай и Индия являются лидерами в данной отрасли. При этом актуальной проблемой остается образование значительного количества выбросов, содержащих специфические примеси с токсичными свойствами: фтористые соединения, полициклические ароматические углеводороды, техногенная пыль, диоксид серы, оксиды углерода (Пономарева, Богородская, 2022). Оксид углерода составляет значительную часть выбросов алюминиевых производств. При получении 1 т алюминия в атмосферу выбрасывается до $4000 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$. Выбросы парниковых газов являются острой проблемой во всем мире. В 2015 г., в рамках деятельности Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИКООН), было заключено Парижское соглашение, которое

обязывает страны принимать меры по сокращению выбросов парниковых газов. В частности, Китай уменьшил объемы производства алюминия для сокращения выбросов оксида углерода (Xiaoquan Chen, 2026).

Алюминий производят в несколько этапов: добыча руды (бокситов), которую в дальнейшем перерабатывают в глинозем (Al_2O_3), затем из глинозема в расплаве криолита (Na_3AlF_6) в результате электролиза при температуре около $950\text{ }^\circ\text{C}$ получают жидкий алюминий. Реакция протекает с выделением значительного объема CO_2 , образующегося при сгорании анода. Часть CO_2 восстанавливается до CO в результате взаимодействия растворенного в электролите металла с CO_2 , после чего CO частично сгорает в электролизере, но та часть, которая не успевает окислиться, выносится в атмосферу. Для улучшения качества алюминия в его состав добавляют различные элементы, например: железо, свинец, медь, никель и другие.

Россия является одним из мировых лидеров по производству алюминия. В стране насчитывается около 45 алюминиевых заводов (Красноярский, Братский, Иркутский, Уральский, Хакаский и др.), а также единственный в мире завод, расположенный за Полярным кругом – Кандалакшский алюминиевый завод (КАЗ) (Портнов, 2020). Большая часть получаемого алюминия экспортируется. Приоритетными загрязняющими веществами в аэрогенных выбросах алюминиевого производства, являются соединения фтора и алюминия. Фтора выбрасывается в гораздо меньших количествах, чем алюминия, но его соединения отнесены к высоко опасным веществам и представляет большую угрозу для окружающей среды. Выбросы алюминиевых предприятий загрязняют атмосферу, почву и воды. Водоёмы становятся коллекторами загрязняющих веществ, чутко реагирующими на антропогенную деятельность человека. Токсичные вещества воздействуют на растения и живые организмы, включая здоровье людей. Физиологический вред от фтора проявляется, например, флюорозом зубов, дисфункцией щитовидной железы, поражением костной ткани, нервной системы, сердечно-сосудистой системы и др. (Горностаева, Фукс, 2017). Алюминий способен накапливаться в различных системах организма и вызывать негативные последствия: деменцию, нарушения в костной ткани, алюминоз легких, проблемы в репродуктивной системе и др. (Кутай, Цыганков, 2021).

Проблема экологической безопасности производства алюминия актуальна во всем мире. С целью сохранения окружающей среды на КАЗе в 2005 г. провели последний этап установки газоочистного оборудования. Объемы выбросов фтористого водорода, нерастворимых фторидов, смолистых веществ и неорганической пыли значительно снизились. Основное внимание исследователей было направлено на загрязняющий элемент фтор, т. к. до модернизации производства увеличение его концентрации происходило во всех объектах ландшафта, прилегающих к заводу.

Настоящая работа основана на анализе литературных источников, содержащих научные данные о состоянии окружающей среды в зоне воздействия выбросов КАЗа до и после модернизации. Для комплексной оценки загрязнения ландшафта использовались результаты лабораторных исследований вод малых озер, прилегающих к заводу.

Цель работы – оценить влияние выбросов алюминия, фтора и углерода на окружающую среду в зоне воздействия КАЗа, проследить динамику изменения экосистемы до и после модернизации предприятия за 20-летний период.

Методы и объекты

Характеристика территории исследования. Кандалакшский алюминиевый завод расположен на территории Кольского полуострова, на берегу Кандалакшского залива Белого моря в городе Кандалакша. Единственное промышленное предприятие Кандалакшского района, на которое приходится основной объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Суровый климат с продолжительной зимой (7–8 месяцев) и преобладанием северных ветров создает неблагоприятные условия для жизни наземных экосистем, что замедляет восстановление нарушенных биогеоценозов. Почвы кислые с рН около 4.00–4.9 с тонким гумусовым слоем (3–5 см), представленные подзолами на песчаных отложениях (Евдокимова и др., 2013).

В настоящее время КАЗ производит около 65 тыс. т алюминия ежегодно. Для получения алюминия используют привозной глинозем. Основным источником вредных выбросов являются реагенты и продукты электролиза глинозема с использованием самообжигающихся анодов. В 1994 г. приоритетными загрязняющими веществами предприятия являлись: фтор (HF) – 700 т, алюминий (Al_2O_3) – 5000 т, смолистые вещества – 800 т, нафталин – 12 т, органические соединения (бенз(а)пирен) – 2 т (Евдокимова и др., 2007). Распространение загрязняющих элементов зависит от фазового состояния их соединений. Элементы твердого компонента аэрогенных выбросов, такие как Al, Fe, P, Si, большей частью выпадают поблизости от предприятия, в пределах зоны 5 км. Элементы F, Mg, Ca, K находятся в виде водорастворимых соединений и распространяются на значительно большие расстояния (Евдокимова и др., 2013). После установки современных газоочистных сооружений в 2005 г., объем выбросов значительно снизился. Так, до модернизации КАЗа аэрогенные выбросы составляли в 2003 г. – 19.1 тыс. т, в 2004 г. – 21.9 тыс. т, после модернизации их значение сократилось приблизительно в 2 раза. В 2006 г. объем выбросов составил 10.5 тыс. т, а в 2007 г. – 11.8 тыс. т. Как следствие, уменьшение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду способствовало улучшению экологической ситуации в зоне воздействия предприятия. Сейчас КАЗ активно работает над сокращением выбросов парниковых газов («Московский комсомолец», 2026).

В результате массообмена атмосферы с водоемами, загрязняющие вещества завода поступают в воду озер. Поэтому малые озера, расположенные недалеко от КАЗа, целесообразно рассматривать как объекты загрязнения выбросами, ярко демонстрирующие изменение состава атмосферы. Исследовались озера с площадью водного зеркала от 0.4 до 20 км² в разных направлениях от завода.

База данных и аналитическая программа. Для поиска и анализа научных публикаций использовались такие поисковые системы как: Российская государственная библиотека (РГБ), КиберЛенинка, Академия Google, eLibrary, ResearchGate, ScienceDirect, а также документированный систематизированный свод аналитической информации «Ежегодные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области». Для анализа данных в динамике рассматривался десятилетний период до и после модернизации КАЗа (1995–2015 гг.). Исследовалась территория в северном направлении от загрязнителя (по розе ветров).

В 1995 г., до модернизации КАЗа, были исследованы 7 близлежащих малых озер, обследование которых в дальнейшем повторялось раз в 4–5 лет (2000, 2005, 2009 гг.). Взятие образцов воды осуществлялось в осенний период, чтобы снизить влияние сезонных изменений. Отбор проб воды из озера проводился в полиэтиленовые несорбирующие бутылки, затем бутылки с водой помещались в специальные контейнеры и отправлялись на анализ в лабораторию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН). Химический состав вод определялся по стандартизированным методикам (StandardMethods, 1992; ICP-Water report, 2001). Показатель кислотности pH определяли потенциометрическим методом, концентрацию Al_{tot} (общая концентрация) – атомно-абсорбционным методом (GFAAS, model Perkin-Elmer – 5000, Corp., Norwalk, USA) с непламенной атомизацией (HGA-400). Для статистической обработки собранных данных использовалась компьютерная программа «Статистика 10».

Результаты

Влияние выбросов фтора на окружающую среду. В результате модернизации производства в 2005 г. произошло уменьшение поступления загрязняющих веществ на поверхность почвы. Так, в 2001 и 2011 гг. общее их поступление на поверхность почвы в непосредственной близости от завода соответственно составляло: пыль – 900–700 кг/га, Al – 400–300 кг/га, F – 45–30 кг/га, Fe – 8–7.9 кг/га (Евдокимова и др., 2013). Экологическая обстановка на загрязненной территории заметно улучшилась по наиболее опасному элементу – фтору, что привело к сужению зон загрязнения: максимального загрязнения почв фторидами с 2.5 до 1.5 км, сильного и умеренного загрязнения – на 5 км. До модернизации в зоне максимального загрязнения (до 2.5 км) содержание F в подстилке превышало в 6–25 раз фоновое, 200 мг/кг по Виноградову и Даниловой (Евдокимова и др., 2007). После модернизации КАЗа выбросы соединений F сократились до 99 %. Это подтверждают

исследования снеговой воды в зоне максимального воздействия в 2001 и 2011 гг., которые показали уменьшение концентрации Al и F в выпадениях. Вследствие уменьшения выпадений загрязняющих элементов в этой зоне валовое содержание фтора в почве снизилось почти в 10 раз, уменьшилось содержание наиболее опасных для живых организмов водорастворимых форм фтора с 10 % до 4 % от валового содержания. Анализ химического состава подстилки на всех исследуемых участках показал значительное уменьшение концентрации фтора. Снижение количества выбросов соединений фтора и уменьшение его концентрации в почве подтверждает состояние мхов, способных к аккумуляции фтора в надземных органах, и пластинчатых грибов, у которых фоновые концентрации фтора превышены только в непосредственной близости от КАЗа (Евдокимова и др., 2015). С уменьшением объема выбросов соединений данного элемента выявлена положительная динамика изменения ландшафтов импактной зоны КАЗа за период с 1987 по 2015 гг. Улучшились показатели индикаторов: состояние древостоя, подлеска и подроста, живого напочвенного покрова, мохового покрова, лишенофлоры, лесной подстилки, верхних горизонтов почв (Нестерова, 2019). Это согласуется с исследованиями других авторов (Евдокимова и др., 2015), где прослеживается улучшение состояния объектов окружающей среды и сокращение границ зон деградации.

Между тем, многолетнее поступление загрязняющих веществ в почву в непосредственной близости от КАЗа привело к изменению химического состава подстилки: увеличилась зольность с 10 % фонового показателя до 60 %, снизилась кислотность подстилки с pH равного 4.27 фонового участка до 6.00. В других импактных зонах, на расстоянии 12.5 и 5 км, также выявлено повышение pH (Евдокимова и др., 2015). Такие трансформации параметров окружающей среды существенно влияют на живые организмы. Например, в воронике (*Empetrum hermaphroditum Hager*), известной своей устойчивостью к промышленным выбросам, в 2011 г. по сравнению с 2001 г. произошло увеличение накопления фтора в надземных частях растения, в которых был превышен фоновый уровень по фтору (< 20 мг/кг) на всех исследуемых площадках (Евдокимова и др., 2015).

Влияние выбросов алюминия на окружающую среду. Снижение выбросов фтора значительно улучшило общее состояние объектов прилегающей территории КАЗа. Однако, анализ химического состава подстилок по элементу Al, проведенный в 2011 г., показал повышение его содержания по сравнению с 2001 г., особенно заметное в зонах 5–20 км. Так, концентрация алюминия в зоне 2 км понизилась с 94.3 до 60.6×10^3 мг/кг, выше фона более чем в 7 раз, в то время как в буферной зоне его содержание увеличилось с 8 до 21.8×10^3 мг/кг, выше фона более 2 раз (табл. 1) (Евдокимова и др., 2013). Повышение концентрации приоритетного загрязняющего элемента Al оказывает негативное влияние на компоненты окружающей среды, что наряду с долговременными выбросами фтора увеличивает нагрузку на экосистемы.

За десятилетний период не поменялась тенденция в изменении исследованных параметров основных групп микроорганизмов в почве стационарных участков, расположенных по градиенту загрязнения выбросами КАЗа. Наряду с накоплением поллютантов это свидетельствует о продолжении негативного воздействия выбросов с приоритетным загрязнителем алюминием на биоту почвы и подтверждается данными о содержании копий рибосомальных генов микроорганизмов в почве прилегающей территории завода. На участках 8 и 20 км, где значительно увеличилась концентрация Al в подстилке (табл. 1), было обнаружено изменение количества копий генов архей, бактерий и грибов (Корнейкова и др., 2015; Корнейкова, Никитин, 2021). Негативное воздействие выбросов отразилось в видовой структуре микромицетов, где значения индексов разнообразия Шеннона, выравниваемости Пиелу и доминирования Симпсона ухудшились в 2011 г. по сравнению с 2001 г. Установлена структура доминирования с меньшим видовым разнообразием микромицетов по сравнению с фоновой территорией (Евдокимова и др., 2007). При изучении растительного покрова ландшафтов показатели – масштабное распространение сухих веток до высоты 5 м и отсутствие эпифитных лишайников во всех зонах наблюдения не улучшили свои параметры, что скорее всего связано с негативным влиянием Al в аэрогенном загрязнении КАЗа (Нестерова, 2019). Лишайники служат индикаторами состава атмосферного воздуха, а усыхание ветвей деревьев свидетельствует о снижении жизнеспособности.

Таблица 1. Показатели выпадения на почву, содержания в подстилке и фоновые значения по Al и F на прилегающей территории КАЗа

Table 1. Indicators of precipitation on the soil, content in the litter and background values for Al and F in the adjacent territory

Показатели		F	Al
Выпадение на почву в зоне максимального загрязнения КАЗа, 103 кг/км ²	До модернизации (2001 г.)	45	400
	После модернизации (2011 г.)	30	300
Содержание в подстилке в 2 и 20 км от КАЗа, 103 мг/кг	До модернизации, в 2 км (2001 г.)	1.3	94.3
	После модернизации, в 2 км (2011 г.)	0.6	60.6
	До модернизации, в 20 км (2001 г.)	0.2	8
	После модернизации, в 20 км (2011 г.)	0.1	21.8
Фон почвы, 103 мг/кг		0.2	8

Оксид углерода в выбросах КАЗа. Газоочистная установка КАЗа не предназначена для улавливания оксида углерода, поэтому данный парниковый газ в значительных объемах продолжает поступать в атмосферу. Так, до модернизации в 2003 г. объем выброса CO₂ составлял 7.1 тыс. т (Ежегодные доклады...), после модернизации в 2006 г. – 6.6 тыс. т (Безуглая и др., 2009). В эти же годы индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) был равен 2.16 и 2.0 соответственно. Уменьшение значений данных показателей после установки газоочистного оборудования скорее всего связано с сокращением объема производства алюминия в 2006 г., так как ИЗА в г. Кандалакше до модернизации находился в тех же пределах, что и после модернизации (рис. 1). В 2008 г. наибольшая повторяемость превышения ПДК в атмосферном воздухе приходилась именно на оксид углерода (Ежегодные доклады...). Поэтому предприятие сейчас работает над сокращением выбросов CO₂ («Московский

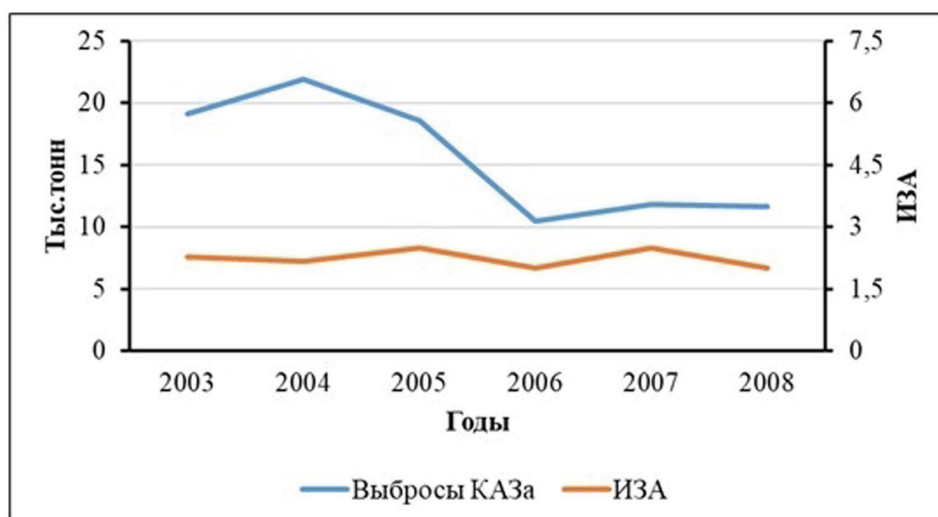


Рис. 1. Объемы выбросов загрязняющих веществ КАЗа (тыс. т) и индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) за 2003–2008 гг.

Fig. 1. Emissions of pollutants by KAZ (thousands of tons) and the Atmospheric Pollution Index (API) for 2003–2008

комсомолец», 2026).

Алюминий в воде малых озер. В отобранных нами образцах воды на содержание общего алюминия (Al_{tot}) в 2005 и 2009 гг. обнаружены превышения ПДК (0.2 мг/л – СанПиН 1.2.3685-2. № 2. 2021) в четырех озерах из семи, расположенных вблизи КАЗа (табл. 2). В озере северо-восточного направления на расстоянии до 15 км от загрязнителя выявлено существенное увеличение концентрации общего алюминия – с 81 мкг/л (2000 г.) до 354 мкг/л (2009 г.), что выше ПДК в 1.8 раза.

В 2009 г. в водоемах северо-западного направления также было выявлено значительное увеличение концентрации алюминия, которая повысилась по сравнению с 1995 г. в 5.1 и 6 раз. Во всех изученных озерах выявлен рост концентрации алюминия, что ведет за собой увеличение кислотности водной среды. Снижение водородного показателя меняет химические, биологические и технические свойства воды малых озер. Так, при закислении водоемов увеличивается концентрация ионов Al^{3+} , токсично действующего на водные организмы. Эти изменения свидетельствуют о воздействии выбросов алюминиевого производства на водные объекты. Таким образом, модернизация производства не повлияла на сокращение объема выбросов алюминия, который продолжает накапливаться в объектах окружающей среды. В субарктических условиях Кольского полуострова даже незначительное превышение ПДК воды значительно сказывается на живых организмах водоемов.

Таблица 2. Концентрация Al_{tot} и pH воды близлежащих озер КАЗа за период 1995–2009 гг.
Table 2. Al_{tot} concentration and pH of the water of the nearby KAZa lakes for the period 1995–2009

Озёра	Расстояние, км/направление от КАЗа	Al_{tot} , мкг/л (pH)			
		1995	2000	2005	2009
Озеро б/н	15</CB	–	81.0 (6.85)	202.0 (5.58)	354.0 (5.39)
Оз. Федосеевское	15–30/СЗ	40.0 (8.47)	36.0 (7.6)	61.5 (7.22)	204.0 (6.95)
Озеро	15–30/СЗ	36.0 (7.36)	45.0 (7.28)	116.0 (6.7)	215.0 (6.7)
Оз. Н. Лувеньгское	15–30/ЮВ	80.0 (7.13)	64.0 (7.3)	62.7 (6.91)	91.0 (7.11)
Оз. Колвицкое	30–50/ЮВ	18.0 (7.18)	33.0 (7.25)	42.8 (6.88)	85.0 (6.98)
Оз. В. Верман	50–70/ЮЗ	33.0 (7.17)	32.0 (7.16)	56.8 (6.66)	70.0 (6.86)
Оз. Каменное	50–70/ЮЗ	38.0 (7.04)	38.0 (7.06)	59.7 (6.55)	118.0 (6.7)

Сокращение объема выбросов соединений фтора заметно улучшило состояние прилегающих ландшафтов КАЗа. Однако, наряду с многолетним поступлением и накоплением соединений фтора в почве, объекты окружающей среды продолжают испытывать антропогенную нагрузку из-за продолжения воздействия аэрогенных выбросов завода. Большая часть выбросов приходится на приоритетный загрязнитель алюминий, который аккумулируется в неживой среде и негативно воздействует на живые организмы. Антропогенное обогащение вод близлежащих озер данным поллютантом достоверно доказывает загрязнение окружающей среды выбросами завода.

Заключение

В результате сокращения выбросов КАЗа уменьшилось поступление фторсодержащих загрязняющих веществ в окружающую среду. Это привело к улучшению состояния многих объектов ландшафта и сужению зон загрязнения. За период 1987–2015 гг. выявлена общая восстановительная динамика растительного покрова территории воздействия завода. В 2011 г. в подстилке и снеговой воде в зоне максимального загрязнения значительно снизилась концентрация соединений F. В почве уменьшилось содержание валовых и водорастворимых его форм, что положительно отразилось на биоте. Однако, многолетнее поступление загрязняющих веществ, особенно в зоне максимального загрязнения, привело к существенным преобразованиям свойств почв, почвенных микроорганизмов и негативно отразилось на растительности.

Газоочистная установка не повлияла на снижение выбросов оксида углерода, поэтому завод сейчас разрабатывает методы улавливания данного парникового газа.

В результате выбросов загрязняющих веществ после модернизации производства повысилась концентрация алюминия в объектах ландшафта КАЗа. Возрастание его содержания в почве привело к структурно-функциональной перестройке микроорганизмов, а также угнетению жизненных функций растений и лишайников. Установлено увеличение загрязнения природных вод элементом алюминием и повышение их кислотности. Что приводит к росту концентрации ионов Al^{3+} , токсично для биоты. Для экосистем, особенно в зонах с суровым климатом, такое негативное воздействие предприятия более чувствительно.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН).

Литература

1. 75 лет за Полярным кругом: Кандалакшский алюминиевый отмечает юбилей исторической плавкой. От первой плавки до производства, которое опоясывает планету. 29.01.2026. «Московский комсомолец».
2. Горностаева Е. А., Фукс С. Л. Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 14–24.
3. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2024 году // Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. <https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/okhrana-okrzhayushchey-sredy/00.condition/>.
4. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газовоздушных выбросов алюминиевого завода // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 64–68.
5. Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Мозгова Н. П. Изменения свойств почв и почвенной биоты в зоне воздействия азротехногенных выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1274–1280. DOI: 10.7868/S0032180X13100031.
6. Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Лебедева Е. В. Сообщества микромицетов в почвах в зоне воздействия алюминиевого завода // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41, № 1. С. 20–28.
7. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2007 год / Э. Ю. Безуглая, Е. К. Завадская, Т. П. Ивлева, И. В. Смирнова, И. А. Воробьева, Л. А. Волокитина, Т. В. Пузанова, В. А. Сурнин, А. И. Шилина, Л. П. Патракеева. Санкт-Петербург. 2009. 196 С. ГУ «ГТО», Отдел мониторинга загрязнения атмосферы. http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2009/Ezegodnik_2007.pdf.
8. Ежегодные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области. Available at: <https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/okhrana-okrzhayushchey-sredy/00.condition/>
9. Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В., Чапоргина А. А. Комплексы микромицетов в воздухе антропогенно-загрязненных территорий Кольского полуострова // Микология и фитопатология. 2015. Т. 49, № 4. С. 218–225.
10. Корнейкова, М. В., Никитин Д. А. Качественные и количественные характеристики почвенного микробиома в зоне воздействия выбросов Кандалакшского алюминиевого завод // Почвоведение. 2021. № 6. С. 725–734. DOI 10.31857/S0032180X21060083.
11. Кутай В. Е., Цыганков В. Ю. Физико-химические свойства и распространение алюминия в окружающей среде, влияние на живые организмы, снижение его токсического действия // Медицинский академический журнал. 2021. Т. 21, № 2. С. 25–36. <https://doi.org/10.17816/MAJ.212>.
12. Нестерова Н. Б. Динамика северотаежных ландшафтов в импактной зоне Кандалакшского алюминиевого завода // Проблемы региональной экологии. 2019. № 2. С. 48–52. DOI 10.24411/1728-323X-2019-12048.
13. Отчёт об устойчивом развитии. Трансформироваться, не теряя сути. 2024. 149 с. РУСАЛ https://rspp.ru/upload/uf/9ee/w0h1auwho7fovmtvwdbf03310j8jn3j8/UC_RUSAL_SR_2024_RU.pdf.
14. Пономарева Т. В., Богородская А. В. Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода // Экосистемы. 2022. № 32. С. 90–105.
15. Портнов А. М. Алюминий везде...где? // Природа. 2020. № 7. ФГБУ Изд-во: Наука. С. 57–65. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20070078>.
16. СанПиН 1.2.3685-21 — санитарные правила и нормы, утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021. № 2.
17. Arnold E. Greenberg et al. Standard methods for the examination of water and wastewater – 18-th Edition. 1992. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.2120.1992.html>.
18. BeritKvaeven et al. ICP Waters — an International Programme for Surface Water Monitoring // Water Air and Soil Pollution. 2001. V. 130, No. 1. P. 775–780.
19. Xiaoyuan Chen, Zhiying Zhang, Yingying Xu, Qiang Li, Qinghe Yu, Qinghua Zhao, Shirong Gong, Boyang Shen, Lin FU. Multi-scenario analysis on clean energy transition to reduce air pollutant emissions in China's aluminium industry // Energy Conversion and management. 2026. V. 29. P. 101472. DOI: 10.1016/j.ectmx.2025.101472.