

Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газовоздушных выбросов алюминиевого завода

© 2015. Г. А. Евдокимова, д.б.н., зав. лабораторией, Н. П. Мозгова, с.н.с.,
Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
e-mail: galina@inep.ksc.ru,

Выявлена корреляционная связь на высоком уровне достоверности ($r=0,976$, $p<0,001$) между содержанием фтора в органомном горизонте почвы, растениях (вороника, мхи) и грибах в зоне воздействия аэротехногенных выбросов Кандалакшского алюминиевого завода. Повышенный уровень фтора в почвах приводит к существенному его накоплению в тканях растений. Особенно интенсивно накапливали фтор мхи. Выполнен сравнительный анализ изменений содержания в почве фтора, произошедших за последние 10–13 лет. Концентрация соединений приоритетного загрязнителя фтора в органомном горизонте почвы в зоне воздействия завода в 2011-2013 гг. достоверно снизилась относительно 2001 г. Вблизи завода, на расстоянии до 2 км, произошло снижение кислотности подстилок почти на 2 единицы pH. В связи с уменьшением объёма загрязняющих веществ в выбросах завода зона максимального загрязнения почвы сократилась с 2,5 км до 1,5 км от источника выбросов, протяжённость зон сильного и умеренного загрязнений уменьшилась на 5 км.

High correlation ($r = 0,976$, $p < 0,001$) between the fluorine concentrations in soil organic horizon and vegetables (crowberry, mushrooms, mosses) was found out in the impact zone by the airborne emissions Kandalakshsky aluminum plant. Higher levels of fluorine content in soil results to its accumulation in plant tissues. Mosses accumulate fluorine most intensively. It has been performed comparative analysis of changes in the content of fluorine in the soil that had occurred over the last 10–13 years. The concentration of priority pollutant fluorine compounds in atmospheric precipitation and in the soil organic horizons was a significantly lower in 2011-2013 years compared to 2001 year in the impact plant zone. There was decreased acidity of litter almost 2 pH units near the plant at a distance of 2 km. The zone of maximum contamination was decreased from 2,5 km to 1,5 km from the emission source. Zones of high and moderate pollution were decreased by 5 as result of reduction the amount of pollutantin the emission of the plant.

Ключевые слова: алюминиевый завод, воздушные выбросы, фтор, загрязнение почв и растений

Keywords: aluminium plant, air emissions, fluorine, pollution soil and vegetables

Введение

Кандалакшский алюминиевый завод (КАЗ), входящий в Объединённую компанию «РУСАЛ», является единственным в мире заводом по производству алюминия, расположенным за Полярным кругом. Известно, что полярные экосистемы более чем южные подвержены отрицательному воздействию техногенных факторов и труднее восстанавливаются. Применяемая на заводе технология электролитического разложения глинозёма Содерберга является источником экологических рисков. Данное производство сопряжено также с высоким потреблением энергии. В воздушных выбросах завода содержится значительное количество загрязняющих веществ: фтористый водород, плохо растворимые фториды, смолистые вещества, полициклические ароматические углеводороды, пыль неорганическая.

Говоря о приоритетных загрязнителях в аэротехногенных выбросах завода, особо сле-

дует отметить, что фтористые соединения отнесены к высоко опасным веществам и представляют большую опасность для живых организмов, в том числе для человека, чем соединения алюминия, также в большом количестве содержащиеся в выбросах КАЗ [1 – 4].

За время работы завода (с 1951 г.) производительность и технология переработки минерального сырья изменялись, что не могло не отразиться на состоянии окружающей природной среды. В начале текущего столетия (2001 г.) нами были проведены исследования свойств почв, почвенной биоты и процессов трансформации органического вещества в почвах, находящихся в зоне воздействия КАЗ [5 – 7]. Именно в эти годы на заводе было завершено строительство газоочистных сооружений электролизного производства, что позволило значительно сократить выбросы вредных соединений в атмосферу.

Цель данного исследования – провести оценку загрязнения почв и растений фтором

в зоне воздействия газозадушных выбросов алюминиевого завода и оценить экологическую эффективность мероприятий по модернизации производства.

Объекты и методы исследований

Наблюдения проводили на стационарных площадках, расположенных по градиенту (трансекте) загрязнения воздушными выбросами КАЗ на расстоянии 0,5, 2, 5, 10, 20 и 50 км от завода в северном направлении (по розе ветров). Последний участок являлся фоновым. Площадь каждого участка составляла 100 м². В 2011–2013 гг. почвенные пробы брали по градиенту загрязнения с шагом от 0,5 до 2,5 км.

Район исследований представляет собой южную часть Имандровской депрессии, отделяющей Кольский полуостров от западной материковой Фенноскандии (60°09'N, 32°24'E). На всех стационарных площадках почвы представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами на моренных, сильно завалуненных песчаных отложениях. Мощность органогенного горизонта (подстилки) составляла примерно 3–5 см. Как правило, этот горизонт тёмно-бурый, со слабо-разложившимися растительными остатками, густо пронизанными корнями. Для него характерна высокая кислотность (рН_{Н₂O} 4,0–4,9) и бедность основаниями (15–20 мг-экв/100 г почвы). Тип гумуса в основном фульватно-гуматный. Все исследуемые экосистемы относятся к сенокосам с кустарничково-зеленомошными или кустарничково-лишайниковыми ассоциациями в напочвенном покрове.

Растительными объектами служили вороника (*Empetrum hermaphroditum*. Nager), известная своей устойчивостью к промышленным выбросам [8, 9], зелёные листостебельные мхи – *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt на всех стационарных площадках, за исключением площадки, находящейся на расстоянии 0,5 км от завода, где этот вид не был обнаружен. С этой площадки взят мох *Niphotrichum canescens* (Hedw.) Bednarch-Ochуга et Ochуга. Содержание фтора определяли также в съедобных грибах: подосиновик (*Leccinum*) и волнушка розовая (*Lactarius torminosus* Schaeff). На каждой стационарной площадке брали образцы подстилок в 3-5-кратной повторности и надземные части анализируемых растений. Образцы подстилок, мхов и вороники высушивали на воздухе при комнатной температуре, измельчали в мельнице и растирали в ступке до пудры. Растительные пробы, включая образ-

цы грибов, отбирали в сентябре. Грибы измельчали (шляпки и ножки вместе), высушивали при температуре 50 °С и растирали в ступке до пудры. Анализировали смешанный образец.

Валовое содержание фтора определяли ионоселективным методом на рН/иономере Мультитест ИПЛ-112. Подстилки для определения в них валового фтора просеивали через сито, растирали до пудры и сплавливали с бурой при 950 °С в течение 20 мин [10]. Для определения фтора в растительном материале пробы обрабатывали хлорной кислотой при 50 °С [11]. Статистическую обработку осуществляли по программе Excel-2003.

Результаты и обсуждение

Содержание фтора в органогенном горизонте почв. Общее поступление веществ на поверхность почвы аэрогенным путём в зоне максимального загрязнения оценено следующими данными: пыль – 900–700 кг/га, Al – 400–300 кг/га, F – 45–30 кг/га и Fe – 8–7,9 кг/га [7]. Первая цифра характеризует выпадения в 2001 г., вторая – в 2011 г. Приоритетным элементом, входящим в состав аэрозолей, выпадающих на почву в зоне влияния алюминиевого завода, является фтор. Выявлено существенное накопление фтора в подстилке: в зоне максимального загрязнения (до 2 км от завода) – выше ПДК в 5 раз, в зоне умеренного загрязнения (5–10 км) – выше ПДК до 2 раз. Предельно допустимая концентрация фтора в почвах определена в размере 330 мг/кг [12].

Фоновое содержание, которое [13] для подзолистых почв составляет 200 мг/кг, количество фтора в подстилках достигает в 20 км от завода.

Валовое содержание F в почве в 2011 г. достоверно снизилось ($t=4,00-9,51$ при $t_{0,05}=3,18$) по сравнению с 2001 г. Кривая, характеризующая распределение валового фтора в подстилках, представляет собой отрицательную экспоненту при высокой значимости (рис. 1). Наиболее резкое падение содержания валового фтора наблюдается на протяжении первых 1,5–2 км от источника загрязнения.

Особенно значительное снижение отмечено в 2011 г. для водорастворимых соединений фтора. В 2001 г. водорастворимые формы составляли в среднем 10% от валового содержания фтора, а 2011 г – 4%, т. е. содержание наиболее токсичных для биоты соединений фтора снизилось.

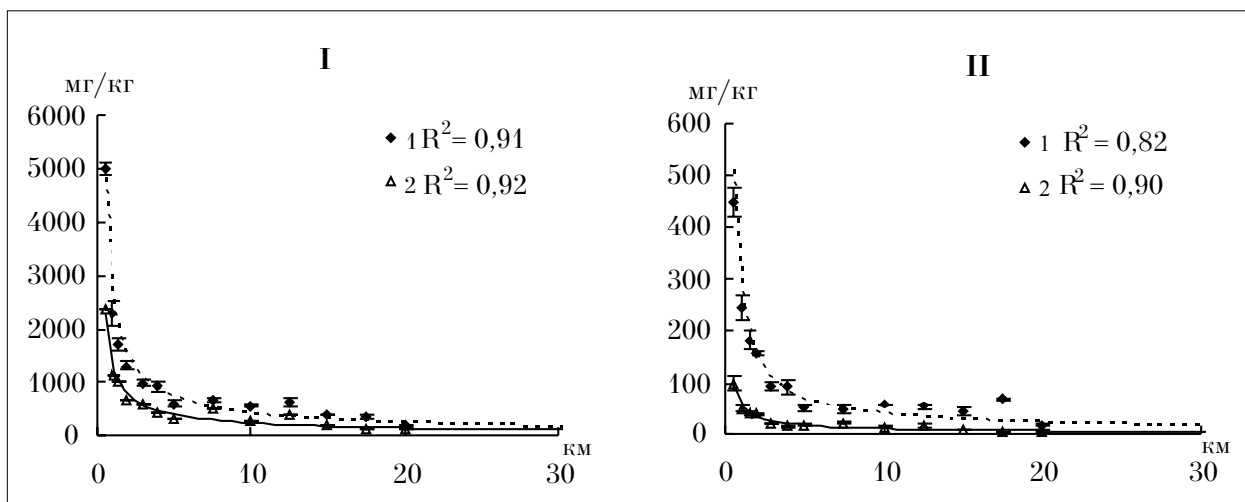


Рис. 1. Содержание фтора в подстилке (мг/кг) по градиенту загрязнения в (1) 2001 и (2) 2011 гг. I – валовой; II – водорастворимый

Таблица 1.

Зоны загрязнения подстилок фтором в 2001 и 2011–2013 гг.

Загрязнение	2001 г.		2011–2013 гг.	
	Расстояние от КАЗ, км	Содержание F, мг/кг	Расстояние от КАЗ, км	Содержание F, мг/кг
Максимальное	0–2,5	>1200	0–1,5	> 1000
Сильное	2,5–13	1200–400	1,5–8,0	1000–400
Умеренное	13–19	400–200	8,0–15	400–200
Отсутствует	20	<200	>15	<200

Под воздействием воздушного загрязнения изменились свойства почвы. Подстилки исследуемых почв в естественном состоянии характеризуются повышенной кислотностью [14]. Однако их кислотность в зоне максимального загрязнения значительно ниже показателя на фоновой площадке (рН 6,00 против 4,27). Атмосферные осадки, выпадающие вблизи источника загрязнения, отличаются невысокой кислотностью, т. к. содержат основания, обладающие некоторой подвижностью. Кроме того, поступающий с выбросами приоритетный загрязнитель фтор способен связывать подвижные соединения алюминия – одного из источников актуальной и обменной кислотности. Ранее было показано, что значительная часть выпадений поступает на почву в виде пыли [6]. Зольность загрязнённой подстилки достигает 60% при фоновом показателе, равном 10%. Твёрдым выпадениям принадлежит, вероятно, основная нейтрализующая роль, поскольку снижение кислотности подстилки наблюдается только на площадке, примыкающей к заводу, на расстоянии до 2 км, где выпадения минеральных веществ в виде пыли максимальные.

В связи со снижением объёма загрязняющих веществ в выбросах завода и уменьшением степени загрязнения почв изменилось зонирование территории, выполненное нами в 2001 г. Протяжённость зоны максимального загрязнения сократилась с 2,5 км до 1,5 км от источника выбросов, сильного и умеренного – на 5 км (табл. 1).

Модернизация производства – введение в эксплуатацию установки сухой очистки газов от электролизного цеха и поочерёдное введение газоочистных сооружений (в 2002 и 2005 гг.) способствовало улучшению экологической обстановки в зоне воздействия алюминиевого завода.

Содержание фтора в растениях. В процессе своего роста растения избирательно поглощают элементы из почвы. Тем не менее повышенное содержание в почве какого-либо элемента обычно вызывает более интенсивное потребление его растениями и накопление в растительных тканях. Различия в содержании фтора в подстилках, обусловленные разным уровнем аэротехногенного воздействия выбросов алюминиевого завода, в полной мере отразились на накоплении этого элемента в надземных частях вороники. С возрастан-

ем содержания фтора в подстилках увеличивалось его содержание и в растениях, причём эти величины четко коррелировали между собой при высоком уровне достоверности ($r=0,976$, $p<0,001$) (рис. 2).

Таким образом, повышенный фон содержания фтора в почвах приводит к существенному накоплению его в тканях высших растений. Такая зависимость выявлена также другими исследователями. Показано, что фтор влияет на метаболизм растений, ингибирует их респираторную деятельность и активность ферментов, уменьшает содержание хлорофилла [15 – 18].

Высокое накопление валового фтора в наземной части исследованных растений характерно для зелёных листовых мхов.

Минимальное поглощение этого элемента из почвы в процессе своего роста отмечено для грибов (табл. 2). Так, подосиновики в 5,5 раза содержат меньше в своих тканях фтора, чем мхи, а волнушка розовая – в 3,1 раза. Можно сделать предварительный вывод о более интенсивном накоплении фтора пластинчатыми грибами по сравнению с трубчатыми. Эта особенность от-

мечена также при исследовании накопления тяжёлых металлов в съедобных грибах в зоне воздействия комбината «Североникель» [19, 20].

На всех загрязняемых площадках (до 20 км от завода) содержание фтора в воронике превышало фоновый уровень (<20 мг/кг) [21]. Для мхов и пластинчатых грибов фоновый уровень был превышен только в зоне максимального загрязнения.

Заключение

Выявлена на высоком уровне достоверности ($r=0,976$, $p<0,001$) тесная корреляционная связь между содержанием фтора в лесных подстилках, растениях (вороника, мхи) и грибах в зоне воздействия аэротехногенными выбросами Кандалакшского алюминиевого завода. Повышенный уровень фтора в почвах приводит к существенному его накоплению в тканях растений. Особенно интенсивно накапливали фтор зелёные листовые мхи. Съедобные грибы содержали в своих тканях в 3–5 раз меньше соединений фтора, чем мхи. По сравнению

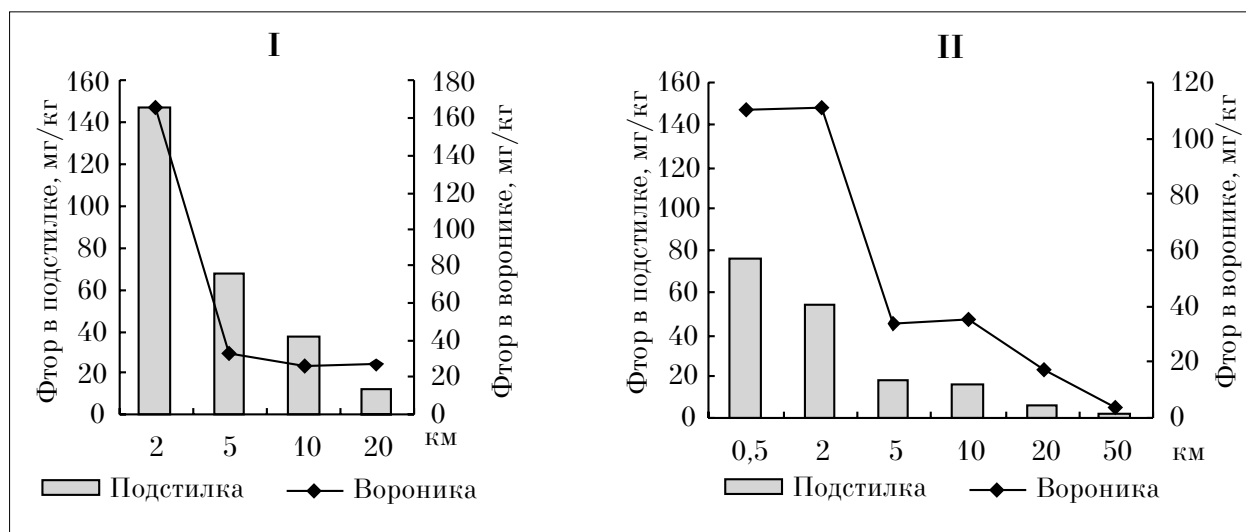


Рис. 2. Содержание водорастворимого фтора в подстилке и воронике по градиенту от источника выбросов, I – 2001 г.; II – 2013 г.

Таблица 2

Содержание валового фтора в подстилке и растительном материале, мг/кг абс. сух. пробы, 2013 г.

Расстояние, км	Подстилка	<i>Empetrum hermaphroditum</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>	Подосиновики р. <i>Leccinum</i>	<i>Lactarius torminosus</i>
0,5	2595±222	110	160	29	52
2	1795±106	111	147	29	62
5	562±52	34	22	5	5
10	371±17	36	14	4	8
20	145±19	17	11	3	–
50	78±9	4	2	1	2

Примечание. На площадке 0,5 км мох *Niphotrichum canescens*. Прочерк – грибы не найдены.

с трубчатыми грибами пластинчатые грибы более интенсивно накапливали фтор. Химический состав растений более консервативен в отношении воздействия на него техногенного загрязнения, чем подстилка, интенсивно аккумулирующая химические элементы. Это связано с относительной избирательностью растений при потреблении ими элементов питания.

Выполнен сравнительный анализ изменений некоторых свойств почвы, произошедших за последние 10–13 лет по градиенту загрязнения воздушными выбросами Кандалакшского алюминиевого завода. Концентрация соединений приоритетного загрязнителя фтора, имеющего высокую степень токсичности для живых организмов, в 2011–2013 гг. достоверно снизилась относительно 2001 г. в органогенном горизонте почвы в зоне воздействия завода.

В связи со снижением объёма загрязняющих веществ в выбросах завода и уменьшением степени загрязнения почв протяжённость зоны максимального загрязнения сократилась с 2,5 км до 1,5 км от источника выбросов, зоны сильного и умеренного загрязнений – на 5 км. Модернизация производства – введение в эксплуатацию газоочистных сооружений (2002 и 2005 гг.) способствовало улучшению экологической обстановки в зоне воздействия Кандалакшского алюминиевого завода.

Благодарности

Авторы благодарны А. Ю. Лихачеву за определение видов мхов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, номер проекта 12-04-00547а.

Литература

1. Профессиональные заболевания / Ред.: Летавет А.А., Молоканов К.П., Дрогичина Э.А. и др. Москва: Медицина, 1973. 3 изд. 369 с.
2. Kongerud J. Hydrogen fluoride and health effects // In Environmental Health and Safety Aspects Related to Production of Aluminium: Proc. of 3rd Intern. Conf., Loen, 10-13 September 2007. Norway: Loen, 2007. P. 44–45.
3. Thomassen Y., Weinbruch S., Benker N., Ellingsen D., Per A. Drablos. Hydroscopicity of pot room particles and possible deep lung penetration of HF and SO₂ // In Environmental Health and Safety Aspects Related to Production of Aluminium: Proc. of 3rd Intern. Conf., Loen, 10-13 September 2007. Norway: Loen, 2007. P. 37.
4. Sjaheim T. Characterisation of pot room asthma // In Environmental Health and Safety Aspects Related to

Production of Aluminium: Proc. of 3rd Intern. Conf., Loen, 10-13 September 2007. Norway: Loen, 2007. P. 43.

5. Evdokimova G.A. Fluorine in the soils of the White Sea Basin and bioindication of pollution // Chemosphere. 2001. 42. P. 35–43.

6. Евдокимова Г.А., Переверзев В.Н. Влияние выбросов алюминиевой промышленности на химический состав подстилок и водяники (*Empetrum hermaphroditum* Hager.) в сосновых лесах Кольского полуострова // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1141–1146.

7. Евдокимова Г.А., Зенкова И.В., Мозгова Н.П., Переверзев В.Н. Почва и почвенная биота в условиях загрязнения фтором. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2005. 155 с.

8. Евдокимова Г.А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1995. 272 с.

9. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Штина Э.А. Загрязнение почв фтором и оценка состояния микробного компонента в зоне воздействия алюминиевого завода // Почвоведение. 1997. № 7. С. 898–905.

10. Методика определения фтора в объектах внешней среды // Временные рекомендации по контролю загрязнения почв / Под ред. С.Г. Малахова. М. Гидрометеоздат, Ин-т экспериментальной метеорологии, 1983. С. 122–127.

11. Хаземова Л.А., Радовская Т.Л., Круглова Н.В., Качалкова Т.К. Определение фтора в растительном материале // Агрохимия. 1983. № 6. С. 66–70.

12. Сергиенко Г.А. Гигиеническое регламентирование валового и усвояемого фтора в почве // Гигиена и санитария. 1985. № 11. С. 78–80.

13. Виноградов А.П., Данилова В.А. Фтор в почвах СССР // ДАН СССР. 1948. № 7. С. 1150–1152.

14. Кислотные осадки и лесные почвы / Под ред. В. В. Никонов, Г.Н. Копчик. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1999. 320 с.

15. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва – растение / Под ред. В.Г. Минеева. Красноярск. 2012. 2-е изд. 146 с.

16. Presence of fluoro-organic compounds in higher plants / Eds.: J.A. Miller et al. Fluoride. 1973. № 6. P. 203.

17. Власюк П.А., Мицко В.Н. Фтор в сельском хозяйстве // Микроэлементы в сельском хозяйстве и медицине. Киев. 1967. Вып. 3. С. 48.

18. Рожков А.С., Михайлова Т.А. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. Новосибирск, 1989. 130 с.

19. Исаева Л.Г., Химич Ю.Р. Содержание элементов в съедобных грибах бореальных лесов Мурманской области // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Сб. матер. VII Межд. конф. Пермь, 7-13 сентября 2009 г. Пермь: Перм. гос. пед. ун-т. 2009. С. 68–71.

20. Исаева Л.Г. Содержание тяжёлых металлов в съедобных грибах в зоне воздействия комбината «Североникель» // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Матер. V-й Всерос. науч. конф. с межд. участием. Апатиты: КНЦ РАН. 2014. Ч. 1. С. 55–59.

21. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. 200 с.