

Д18-2003-41

Э. Стейннес<sup>1</sup>, М. В. Фронтасьева,  
Т. Эйдхаммер-Сьебак<sup>1</sup>, П. Варског<sup>2</sup>

**ИЗУЧЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ  
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
В РАЙОНЕ СТАЛЕЛИТЕЙНОГО КОМПЛЕКСА  
В СЕВЕРНОЙ НОРВЕГИИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ  
ОРИЕНТАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Направлено в журнал «Экология», Екатеринбург

---

<sup>1</sup>Кафедра химии Норвежского университета науки и технологии,  
NO-7491 Трондхейм

<sup>2</sup>Технологический энергетический институт, NO-2027 Кьеллер,  
Норвегия

## ВВЕДЕНИЕ

Любое металлургическое производство, как правило, сопровождается выбросами металлосодержащей пыли в окружающую среду и тем самым существенно влияет на ее состояние и здоровье населения на прилегающих территориях. Классический подход в оценке степени такого загрязнения состоит в определении концентраций металлов в воздухе, основанном на анализе либо аэрозольных фильтров, либо образцов поверхностных почв. В последние годы доказано, что для контроля атмосферных выпадений вокруг источников загрязнения воздуха в качестве альтернативы общепринятой технике может применяться техника биомониторинга с помощью мхов. В частности, метод сбора образцов наземных мхов при изучении ситуации вокруг источников загрязнений оказался успешным для теплоэлектростанций (Folkesson, 1981) и медно-никелевых производств (Åugås и др., 1997). В настоящей работе демонстрируется применимость этой техники для мониторинга загрязнений металлами вблизи сталелитейного комплекса.

Несмотря на то, что, в основном, проблема атмосферных выпадений в Норвегии ассоциируется с дальним переносом из других стран Европы (Steinnes и др., 1989; Berg и др., 1995), несколько существующих местных производств являются источниками загрязнений.

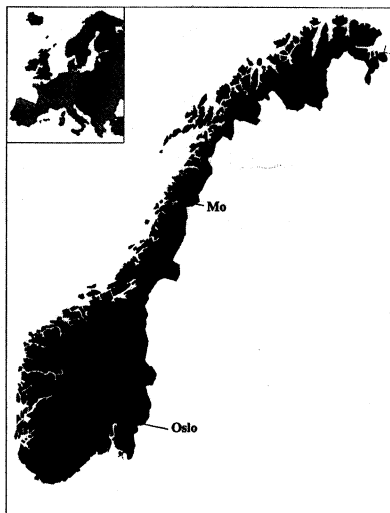


Рис. 1. Карта Норвегии с месторасположением города Му-и-Рана

Один из таких источников – завод, основанный в 1946 году в городе Му-и-Рана графства Нордленд (рис. 1) – действовал в течение четырех десятилетий как обычный сталелитейный комплекс. Исходя из финансовых и некоторых других соображений было принято решение о закрытии в 1989 году сталелитейного производства и использовании имеющегося оборудования для некоторых альтернативных отраслей, включая феррохромное производство.

Перед переориентацией производства в Му-и-Рана по заданию Норвежской государственной службы контроля загрязнений окружающей среды было проведено обследование, цель которого состояла в том, чтобы проследить, как изменится выпадение тяжелых металлов после переориентации производства. В 1989 году была разработана схема мониторинга, основанная на сборе образцов мха и поверхностных почв.

Для определения заданного набора элементов применялся метод атомной абсорбционной спектрометрии (ААС) (Steinnes и др., 1992).

В 1993 году был проведен повторный сбор образцов мха и в них был определен тот же самый набор элементов (Steinnes, 1995). Результаты показали, что для ряда элементов картина выпадений изменилась существенным образом.

В то же время были продемонстрированы возможности эпитеплового нейтронового активационного анализа (ЭНАА) для многоэлементного определения следовых элементов атмосферных выпадений во мхах-биомониторах (Frontasyeva и др., 1994). Поэтому было решено провести ЭНАА имеющихся образцов мха, собранных вблизи города Му-и-Рана в 1989 и 1993 годах. Применение ЭНАА позволило получить дополнительную информацию почти для 30 элементов в этих образцах ((Frontasyeva and Steinnes, 1995). Ранее опубликованные работы были, в основном, связаны с изучением выпадений следовых элементов в окрестностях производств цветной металлургии. Результаты настоящей работы представляют более общий интерес, чем частный случай отдельного производства, поскольку они включают в себя обсуждение всех полученных авторами данных, в частности, с точки зрения вклада различных источников в определяемые концентрации тяжелых металлов. На примере обсуждения результатов загрязнения тяжелыми металлами окрестностей Му-и-Рана дается оценка пространственных и временных трендов, связанных с перепрофилированием металлургического производства.

## **БИОМОНИТОРИНГ ВЫПАДЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА МХА**

Мхи не имеют корневой системы, поэтому их элементный состав определяется питательными и прочими химическими веществами, поступающими не из почвы, а из других источников, главным из которых являются атмосферные выпадения. Мхи, к тому же, обладают большой способностью удерживать мельчайшие минеральные частицы, благодаря своей шероховатой поверхности. Они уже давно используются для мониторинга атмосферных выпадений тяжелых металлов на больших территориях (Rühling и Tyler, 1973). Метод мхов-биомониторов позволяет определять относительный уровень выпадений в данный период времени, обычно за последние 2–3 года. С помощью этого метода в европейских странах каждые пять лет проводится изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов (Rühling, 1994; Rühling и Steinnes, 1998).

Однако применение этого метода в окрестностях источников выбросов в ряде случаев ограничено, поскольку мхи гибнут под воздействием высоких концентраций некоторых металлов (Bengtsson и др., 1982; Tyler, 1990). Авторам этой работы удалось собрать образцы мха лишь на расстоянии в несколько сотен метров от источника выбросов.

В настоящей работе использовался мох *Hylocomium splendens* с выраженными годовыми сегментами прироста, позволяющими однозначно определить период экспозиции. В данном случае использовались сегменты, соответствующие приросту за последние три года. С другой стороны, анализ поверхностных почв позволяет определять интегральное накопление привносимых из атмосферы компонентов, которые химически прочно связаны в

поверхностном слое почвы толщиной в несколько см. Временные тренды при этом могут изучаться лишь при сборе образцов, соответствующих определенным временным интервалам, а парциальное содержание элементов рассчитываться как разность концентраций.

## СБОР ОБРАЗЦОВ И АНАЛИЗ

Город Му-и-Рана, с населением порядка 20000 жителей, расположен на  $66^{\circ} 20'$  северной широты и  $14^{\circ} 10'$  восточной долготы, в конце восточной части фьорда Рана на расстоянии примерно 60 км от Норвежского моря. Как видно из топографической карты на рис. 2, фьорд Рана и долина Рана, простирающиеся от Му на восток, защищены высокой горной грядой (высотой 700–1400 м) в северном и южном направлениях. Следовательно, в этой местности превалирует либо западное, либо восточное направление ветра.

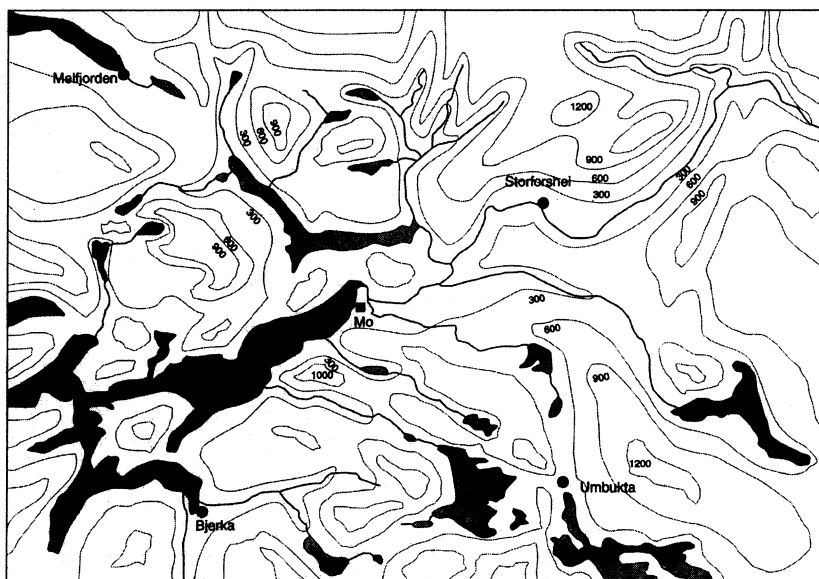


Рис. 2. Карта, на которой показаны основные топографические особенности окрестностей города Му-и-Рана

Металлургические производства находятся в черте города, приблизительно в 1 км от центра, как показано на рис. 3.

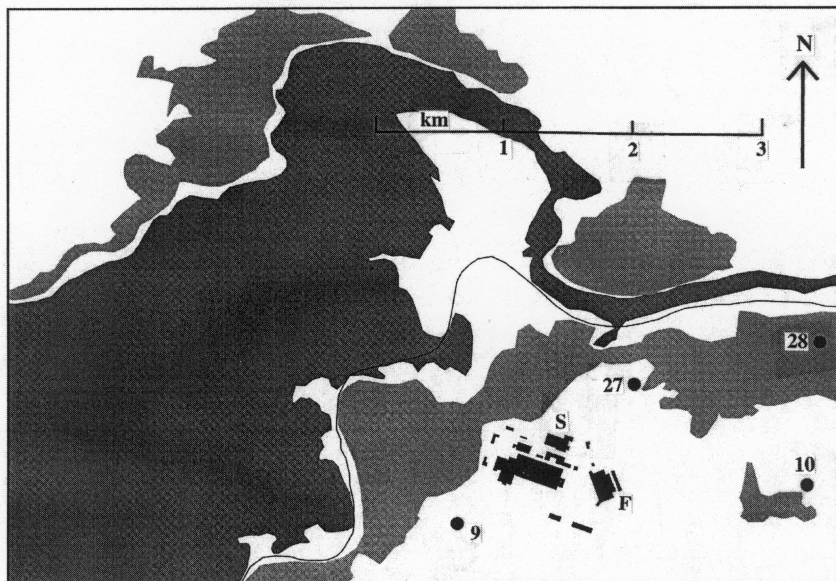


Рис. 3. Карта города Му-и-Рана, показывающая местонахождение промышленной зоны и ее основных объектов после 1990 года. Серый цвет: основная городская часть. Темный цвет: река Рана и внутренняя часть фьорда Рана. S - сталелитейный завод, F - завод по производству феррохрома. 9, 10, 27, 28 - точки пробоотбора, соответствующие рис. 4

Образцы пушистого мха *Hylocomium splendens* и поверхностных почв были собраны в 1989 году с 39 площадок пробоотбора на расстоянии 1–42 км от металлургических производств в Му. При планировании сети пробоотбора особое внимание обращалось на довольно сложную топографию местности вокруг Му. Сеть пробоотбора показана на рис. 4.

Почвенные образцы отбирались на глубине 2–5 см гумусного горизонта. Пять параллельных образцов, собранных с площадки 10 м × 10 м, смешивались в один образец. После сушки и просеивания (2 мм) 2 грамма почвы растворялись в азотной кислоте (Steinnes и др., 1989). С помощью пламенной атомной спектроскопии (ААС) определялись Cr, Fe, Cu, Zn, и Pb. Cd определялся ААС с графитовой кюветой, а As, Sb, Hg – с помощью гидридной приставки.

Образцы мха собирались и готовились для анализа в соответствии со стандартной процедурой, описанной в ряде работ (Steinnes и др., 1992). По результатам анализа поверхностных почв были выбраны для анализа образцы мха с 25 площадок пробоотбора из 39 возможных. С этих же 25 площадок пробоотбора собирался мох в 1993 году.

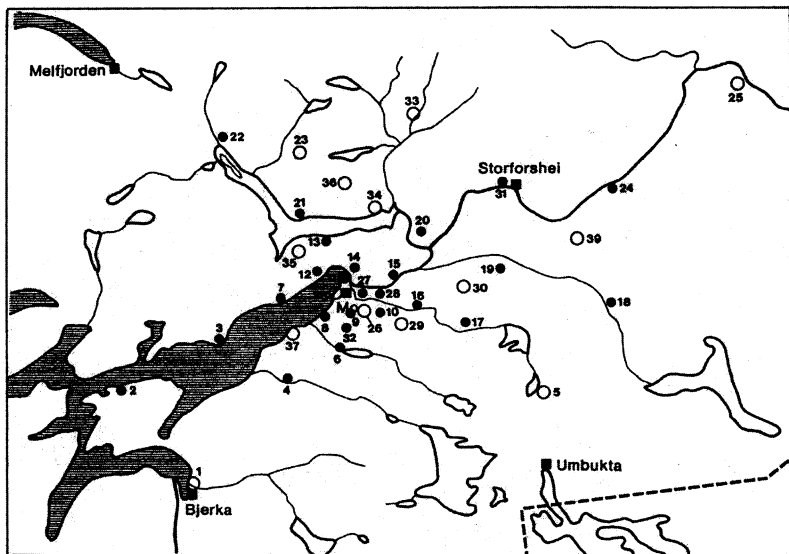


Рис. 4. Схема пробоотбора данной работы. Темные точки: сбор образцов почв (1989) и образцов мха (1989 и 1993). Светлые точки: только образцы почв

В образцах мха коллекций 1989 и 1993 гг. методом эпитеплового нейтронного активационного анализа (ЭНАА) были определены 35 элементов (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Sb, I, Cs, Ba, La, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U), и три элемента методом ААС (Ni, Cu, Zn) (табл. 1). ЭНАА проводился на импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 в Дубне в соответствии с методикой, описанной в работах (Frontasyeva и др., 1994; Frontasyeva и Steinnes, 1995). Для контроля качества анализов использовались международные эталоны сравнения, облучаемые вместе с исследуемыми образцами.

Для установления зависимостей между химическими параметрами для образцов мха применялся факторный анализ. Анализ проводился отдельно для двух наборов данных 1989 и 1993 гг. с использованием выделения главных компонентов, собственного значения факторного выделения и VARIMAX-ротации выделенных факторов. Переменные с факторной нагрузкой выше чем 0,6 (табл. 2) считались вносящими значительный вклад в данный фактор. Аналогичным образом факторный анализ применялся к данным для почв (см. табл. 3).

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных для 38 элементов в 25 образцах мха, собранных в окрестностях сталелитейного комплекса в городе Му-и-Рана

Элемент	1993		1989	
	Среднее (ppm)	Min- max (ppm)	Среднее (ppm)	Min- max (ppm)
Na	310	127-732	294	93-635
Mg	2015	781-6520	1861	556-4230
Al	1186	293-4460	1244	243-3100
Cl	201	88-375	294	50-1110
K	3470	1640-4770	3845	1930-7160
Ca	1903	995-4830	2871	1450-6740
Sc	0.20	0.03-0.70	0.41	0.06-1.41
V	4.10	0.79-19.0	5.72	1.05-31.0
Cr	390	4.3-3900	11.7	0.5-50
Mn	325	61-917	384	89-1460
Fe	2440	300-8700	12280	700-72100
Co	0.68	0.07-3.0	0.61	0.06-2.2
Ni	2.84	<0.5-15.6	1.69	<0.5-6.96
Cu	8.23	3.5-20.3	12.3	2..9-29.0
Zn	88	16-542	99	31-397
As	0.37	0.06-1.56	0.62	0.06-2.20
Se	0.31	0.16-0.75	0.47	0.21-1.17
Br	6.36	3.5-11.4	6.94	3.6-12.2
Rb	12.5	3.3-26.4	17.2	6.7-46.2
Sr	8.9	<4-52	19.9	<4-50
Zr	3.0	<2-24	11.0	<2-46
Mo	0.16	<0.08-0.76	0.87	<0.08-3.85
Ag	0.057	<0.03-0.18	0.059	<0.03-0.16
Sb	0.166	<0.03-0.69	0.250	<0.05-0.76
I	1.82	<1.0-3.3	2.26	<1.0-4.3
Cs	0.28	0.05-0.89	0.37	<0.05-1.03
Ba	26.7	15-57	33.1	12-83
La	0.45	<0.10-1.38	0.69	<0.10-2.87
Sm	0.139	0.04-0.45	0.33	0.05-1.34
Eu	0.016	<0.01-0.13	0.031	<0.01-0.12
Tb	0.020	<0.005-0.096	0.019	<0.005-0.067
Yb	0.032	<0.010-0.120	0.069	<0.010-0.230
Hf	0.097	<0.04-0.36	0.179	<0.04-0.71
Ta	0.011	<0.003-0.038	0.043	<0.003-0.180
W	1.68	<0.6-9.4	1.71	<0.6-6.4
Au	0.0042	0.0006-0.037	0.0002	<0.0001-0.010
Th	0.114	0.02-0.47	0.267	0.04-1.10
U	0.035	0.03-0.22	0.143	<0.03-0.51

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы, собранные вблизи города Му, обогащены большинством элементов, из определяемого набора, что свидетельствует о локальных источниках их происхождения. Из всех элементов, определенных в образцах мха, только Cl, K, Ca, Se, Rb, I и Cs кажутся независимыми от промышленной и другой активности в пределах урбанизированного региона. Все другие элементы, очевидно, тем или иным путем подвержены влиянию этих активностей и показывают более высокие концентрации в пределах города Му, чем в окружающем регионе.

Таблица 2. Факторные нагрузки анализа главных компонент данных по мхам коллекций 1989 и 1993 г. Приводятся только значения > 0.6

Элемент	Факторы 1989				Факторы 1993			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Na				0.80		0.87		
Mg		0.63			0.78			
Al	0.81						0.60	
Cl			0.80					
K			0.82					0.67
Sc	0.89				0.66	0.67		
V		0.74			0.88			
Cr	0.88				0.95			
Mn	0.70						0.71	
Fe	0.62	0.71			0.72			
Co	0.93				0.88			
Ni	0.85				0.91			
Cu							0.79	
Zn	0.87				0.71			
As		0.75			0.80			
Se	0.85				0.61	0.63		
Br								
Rb								0.86
Sr	0.81							
Mo	0.74				0.77			
Sb	0.77					0.78		
I				0.86				
Cs								0.80
Sm	0.96					0.80		
Yb	0.90					0.85		
Hf	0.95					0.67		
Ta	0.90					0.80		
U	0.96				0.67	0.67		



Таблица 3. Факторные нагрузки анализа главных компонент данных по поверхностным почвам

Элемент	Факторы	
	1	2
As	0.94	-0.03
Cd	0.02	0.54
Cu	0.88	0.38
Cr	0.90	0.14
Fe	0.96	0.06
Pb	0.46	0.80
Sb	0.06	0.83
Zn	0.78	0.50

При более внимательном рассмотрении видно, что вблизи промышленных объектов наблюдаются самые большие выпадения одних элементов в точках 9 и 10 к югу, и других элементов в точках 27 и 28 в северо-восточном направлении. Однако изменение ареалов выпадений для большинства элементов в 1993 году по сравнению с 1989 годом означает, что характер источников выбросов и распределение самих выбросов существенно изменились. На рис. 5–9 относительные ареалы выпадений десяти выбранных элементов показаны изоплетами их концентраций в образцах мха, собранных в 1989 и 1993 годах.

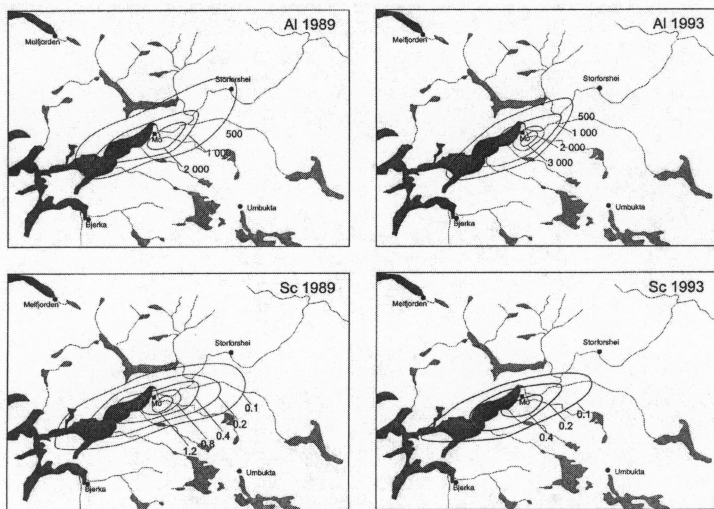


Рис. 5. Контуры ареалов относительных выпадений Al и Sc в окрестностях промышленных предприятий города Му, построенные на основании результатов анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг.

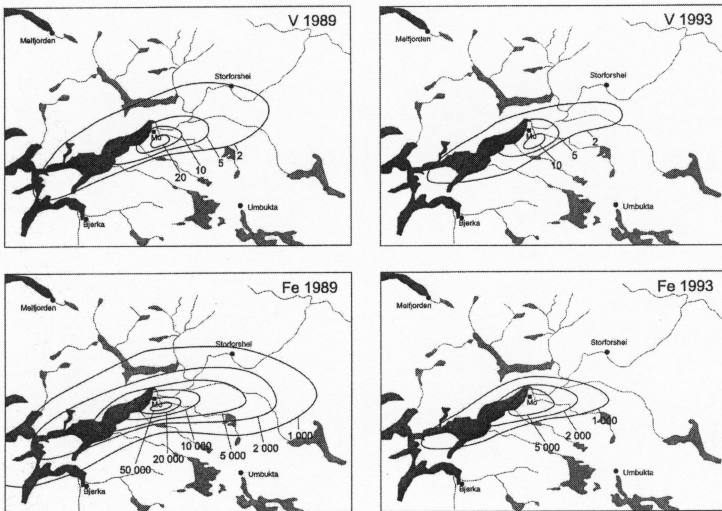


Рис. 6. Контуры ареалов относительных выпадений V и Fe в окрестностях промышленных предприятий города Му, построенные на основании результатов анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг.

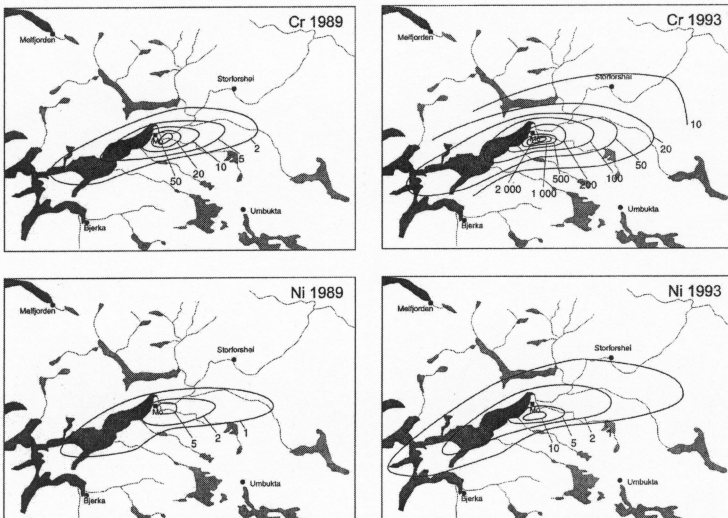


Рис. 7. Контуры ареалов относительных выпадений Cr и Ni в окрестностях промышленных предприятий города Му, построенные на основании результатов анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг.

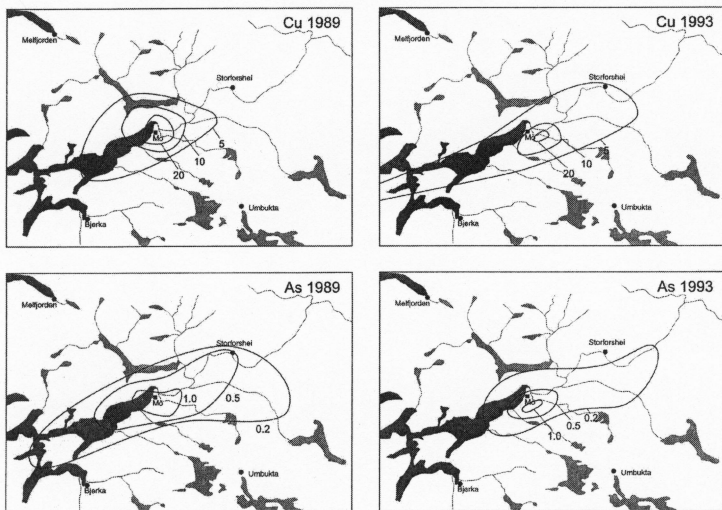


Рис.8. Контуры ареалов относительных выпадений Cu и As в окрестностях промышленных предприятий города Му, построенные на основании результатов анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг.

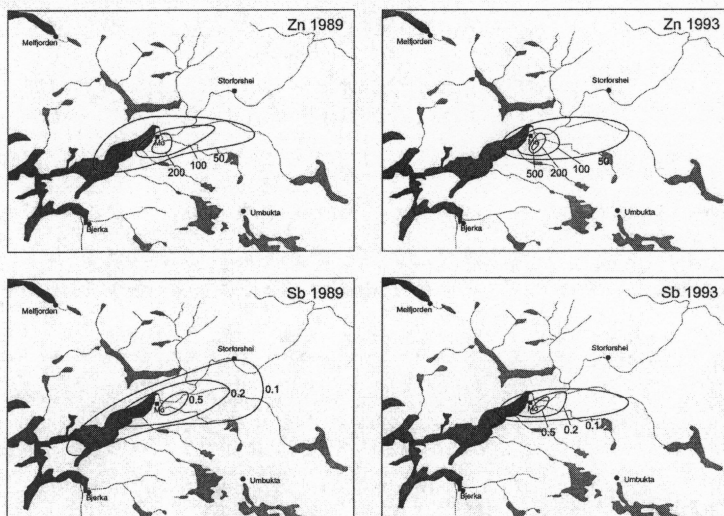


Рис. 9. Контуры ареалов относительных выпадений Zn и Sb в окрестностях промышленных предприятий города Му, построенные на основании результатов анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг.

Географическое распределение всех элементов сильно зависит от топографических особенностей региона, обуславливающих перемещение загрязненных воздушных масс только в восточном и западном направлениях и ни в каких других. Ниже кратко обсуждается каждый из этих элементов, а также элементы, которые имеют схожие с ними тренды.

Al: Очевидным источником алюминия в воздухе является минеральная пыль, образующаяся при различных технологических процессах в пределах и за пределами промышленной зоны. Как следует из рис. 5, при сходном среднем уровне концентраций во мхе в 1989 и 1993 гг., пиковый уровень в 1993 году выше, а расстояние переноса меньше, что свидетельствует об увеличении размера частиц пыли.

Sc: Подобно алюминию, скандий является типичным элементом земной коры. Географически ареалы его выпадений (рис. 5) весьма сходны, но уровни выпадений в 1993 году в три раза меньше тех, которые имели место в 1989 году. Подобные временные и пространственные тренды наблюдаются и для других типичных элементов земной коры, таких, как лантаноиды, Ta, Th и U.

V: Ареалы выпадений ванадия в 1989 и 1993 годах (рис. 6) очень похожи, но уровень выпадений в 1993 году уменьшился в два раза. Таковую же тенденцию имеет и молибден.

Cr: Как видно из рис. 7, выпадение хрома возросло в 1993 году в 50 раз, что естественным образом связано с производством феррохрома. Более тщательный анализ данных указывает на незначительный сдвиг основного источника выбросов к югу. Обсуждение возможного воздействия существенно возросших выбросов хрома на окружающую среду и здоровье местного населения не входит в задачу настоящей статьи.

Fe: Выпадение железа (рис. 6) в районе Му в 1993 году уменьшилось в 10 раз по сравнению с 1989 годом, главным образом, из-за закрытия сталелитейного производства.

Ni: Как видно из рис. 7, выпадение никеля возросло в два раза, а основной источник, как и в случае хрома, сместился в южном направлении. Ареалы выпадений Co и Ag очень сходны с ареалом для никеля.

Cu: В целом уровень выпадений меди (рис. 8) не изменился, в отличие от ареала ее выпадений. В 1989 году источник выбросов находился где-то к северо-западу от центра города в отдалении от промышленной зоны, в то время как в 1993 году выбросы связаны только с промышленной зоной.

Zn: Относительно незначительные изменения очевидны, но выбросы в 1993 году в большей степени связаны с промышленной зоной (рис. 9).

As: Для этого элемента (рис. 8) более высокие уровни выпадений на большей территории в 1989 году связаны, по-видимому, с более рассеянным источником выбросов, чем в 1993, когда все выбросы приходились, главным образом, на промышленную зону города Му.

Sb: Рис. 9 свидетельствует о том, что источник выбросов сурьмы находится на северо-востоке от промышленной зоны. Выпадения более выражены в 1993 году, чем в 1989.

Результаты факторного анализа данных по коллекциям мха 1989 и 1993 гг., соответственно, представлены в табл. 2, а распределения для двух наиболее значащих факторов для каждой коллекции показаны на рис. 10. Для мха 1989 года факторный анализ выделяет два четких компонента. Фактор 1 отражает высокую

нагрузку для элементов, характерных для земной коры (Al, Sc, Co, Sr, Sm, Yb, Hf, Ta, U), а также для элементов, часто наблюдаемых в загрязнении аэрозолей (Cr, Ni, Zn, Se, Sb). Для этого фактора наибольшим вкладом обладает точка 27 (см. рис. 4), а затем следуют по убывающей точки 9 и 10. Все это может расцениваться как общий пылевой компонент, связанный с активностью в пределах промышленной зоны. Фактор 2 с высокими нагрузками для Fe, V и As в большей степени отражает точки 9 и 10 и характеризует выбросы сталелитейного завода. Факторы 3–5 интерпретировать довольно сложно.

Фактор 1 с очень высокими нагрузками для Cr, Ni, V и Co для 1993 года очевидным образом ассоциируется с производством феррохрома. Большой вклад точек 8, 9 и 10 подтверждает это заключение. Фактор 2, скорее всего, пылевой фактор с наиболее высокими нагрузками в точках к северо-востоку от промышленной зоны в 1993 году такой же, как и в 1989 году.

Сравнение уровней содержания элементов во мхах коллекций 1989 и 1993 гг. (табл. 1) позволяет сделать однозначный вывод, что выпадения в Му и его окрестностях были существенно выше в 1989 году. Это относится к таким элементам, как Ca, Sc, Fe, Cu, As, Se, Sr, Zr, Mo, редкие земли (лантаноиды), Hf, Ta, Th и U, которые, в основном, являются элементами, ассоциируемыми со сталелитейным производством и отражают, главным образом, пылевую фракцию.

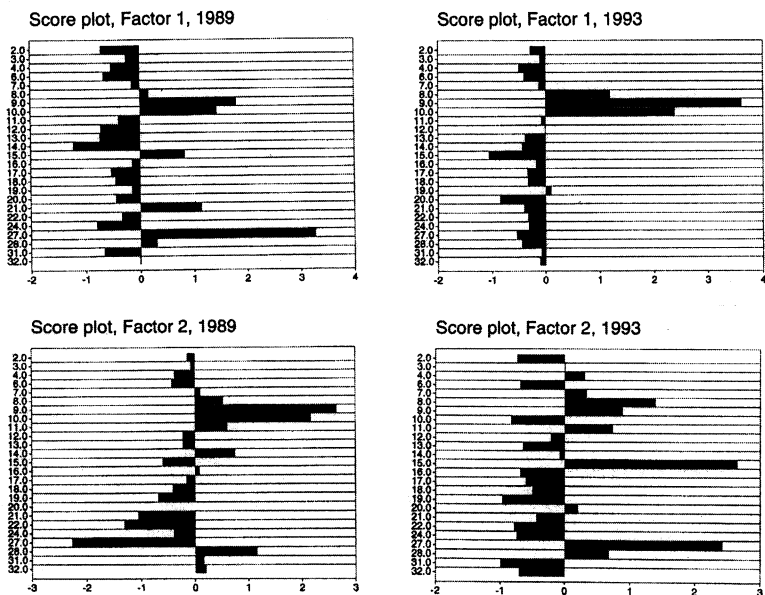


Рис. 10. Графическое представление нагрузок факторов 1 и 2 факторного анализа образцов мха коллекций 1989 и 1993 гг. Ось у - номера площадок пробоотбора

Наиболее явные высокие уровни выпадений в 1993 году наблюдались для Cr, Ni и Au. Для остальных элементов (Na, Mg, Cl, K, V, Mn, Co, Br, Rb, Ag, Sb, I, Cs, Ba, W) изменения были незначительны. Это говорит о том, что выбросы первоначального и нового источника сходны, или, что присутствие этих элементов во мхах не имеет четкой связи с активностью промышленной зоны города Му.

Концентрации Cr, Fe, Cu, Zn, As, Cd, Sb и Pb в некультивированных поверхностных почвах (эти данные приведены в работе Steinnes и др., 1992) в самом городе Му или его окрестностях были обычно выше, чем в более удаленных местах, а значит, загрязнения этими элементами вызваны промышленными или другими источниками, типичными для урбанизированных областей. Эти загрязнения были особенно выражены в случае Fe, средняя концентрация которого вблизи промышленной зоны (точки 9, 10 и 26) в 51 раз превышала фоновые значения (точки 1, 5 и 22), что является несомненным следствием длительного периода работы сталелитейного комплекса. Подобное соотношение для таких элементов, как As - 14; Cr - 5.0; Cu - 3.2; Zn - 3.2 также может быть связано с выбросами сталелитейного комплекса. Ареал выпадений и уровни концентраций Sb, Cd и Pb отражают обычный тип городского загрязнения, без какого-либо доминирующего вклада отдельного источника, и поэтому в образцах мха эти элементы методом атомной абсорбции впоследствии не определялись.

Факторный анализ почвенных данных указывает на два четких фактора с высокими нагрузками для Cr, Fe, Cu, Zn, As и Pb, Sb, Cd соответственно (табл. 3). Рис. 11 позволяет оценить корреляцию концентраций Cr, Fe, Cu и Zn в почвах и мхах в одних и тех же точках пробоотбора.

Как видно из рисунка, корреляция очень сильная, что является еще одним подтверждением загрязнения поверхностных почв вблизи города Му теми же самыми элементами из атмосферных выпадений.

На содержание Hg было проанализировано только десять образцов почв. Полученные значения концентраций ртути 0.07-0.12 мг/кг лежат в пределах нормы для гумусового горизонта исследуемого региона (Steinnes and Andersson, 1991).

## **ВЫВОДЫ**

В настоящей работе показан пример успешного применения техники мхов-биоиндикаторов и метода ЭНАА для изучения состава и ареалов атмосферных выпадений тяжелых металлов в промышленной области Му-и-Рана (северная Норвегия) при разных типах активности местной промышленности, связанных с переориентацией ее производства.

Исследование временных трендов атмосферных выпадений показало, что, несмотря на общее снижение уровня выпадений тяжелых металлов, с развитием нового типа производства значительно увеличилось выпадение Cr и в меньшей степени Ni. Продемонстрированы хорошие возможности инструментального нейтронного активационного анализа для проведения аналитических исследований такого рода. Выбор достаточно плотной сети пробоотбора и

применение факторного анализа для интерпретации полученных аналитических данных позволили выявить и четко характеризовать источники загрязнений.

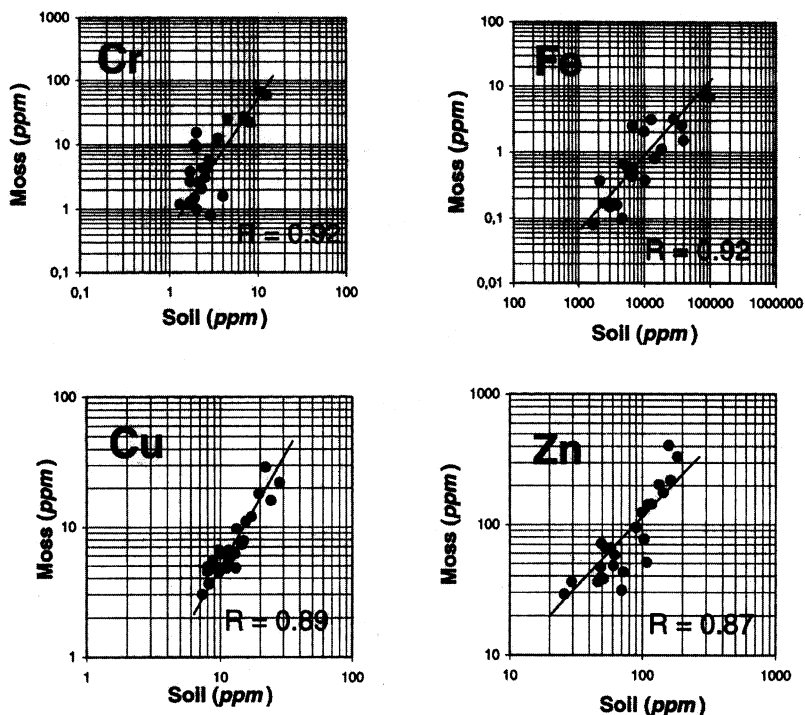


Рис. 11. Сопоставление концентраций Cr, Fe, Cu и Zn в поверхностных почвах с соответствующими концентрациями в образцах мха коллекции 1989 года, собранных в одних и тех же точках пробоотбора

Опыт настоящей работы может с успехом использоваться для построения карт загрязнений тяжелыми металлами некоторых промышленных регионов России, в частности, там, где располагаются сталелитейные заводы. Такая попытка была уже сделана в районе Магнитогорского металлургического комбината на Южном Урале (Frontasyeva и др., 2000).

## ЛИТЕРАТУРА

- ÄYRÄS M., NISKAVAARA H., BOGATYREV I., CHEKUSKIN V., PAVLOV V., DE CARITAT P., HALLERAKER J.H., FINNE T.E., KASHULINA G., REIMANN C. Regional patterns of heavy metals (Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur in terrestrial moss samples as indication of airborne pollution in a 188,000 km<sup>2</sup> area in northern Finland, Norway and Russia. *J. Geochem. Exploration.*, 1997, vol. 58, p. 269-281.
- BENGTSSON C., FOLKESON L., GÖRANSSON A. Growth reduction and branching frequency in *Hylocomium splendens* near a foundry emitting copper and zinc. *Lindbergia*, 1982, vol. 8, p. 129-138.
- BERG T., RØYSET O., STEINNES E., VADSET M. Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples. *Environ. Pollut.*, 1995, vol. 88, p. 67-77.
- FOLKESON L. Heavy-metal accumulation in the moss *Pleurozium schreberi* in the surroundings of two peat-fired power plants in Finland. *Ann Bot Fennici*, 1981, vol. 18, p. 245-253.
- FRONTASYEVA M.V., STEINNES E. Epithermal neutron activation analysis of mosses used to monitor heavy metal deposition around a metal smelter complex. *The Analyst* 1995, vol. 120, p. 1437-1440.
- FRONTASYEVA M.V., NAZAROV V.M., STEINNES E. Moss as monitor of atmospheric heavy metal deposition: Comparison of different multi-element analytical techniques. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1994, vol. 181, p. 363-371.
- FRONTASYEVA M.V., STEINNES E., LYAPUNOV S.M., CHERCHINTSEV V.D., SMIRNOV L.I. Biomonitoring of heavy metal deposition in the South Ural region: Some preliminary results obtained by nuclear and related techniques. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2000, vol. 245, p. 415-420.
- RÜHLING Å. (ed). Atmospheric heavy metal deposition in Europe – estimation based on moss analysis. Report NORD1994:9, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- RÜHLING Å., TYLER G. Heavy metal deposition in Scandinavia. *Water Air Soil Pollut.*, 1973: vol. 2, p. 443-455.
- RÜHLING Å., STEINNES E. (eds). Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995-1996. Report Nird 1998:15, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- STEINNES E., ANDERSSON E. Atmospheric deposition of mercury in Norway: Temporal and spatial trends. *Water Air Soil Pollut.*, 1991, vol. 56, p. 391-404.
- STEINNES E. Environmental monitoring in Rana. Changes in deposition of heavy metals during the period 1989-1993, studied by moss analysis. Report 614/95, State Pollution Control Authority, Oslo 1995, 15 pp (In Norwegian).
- STEINNES E., SOLBERG W., PETERSEN H.M., WREN C.D. Heavy metal pollution by long range atmospheric transport in natural soils of southern Norway. *Water, Air, Soil Pollut.*, 1989, vol. 45, p. 207-218.
- STEINNES E., RAMBÆK J.P., HANSEN J.E. Large scale multi-element survey using naturally growing moss as biomonitor. *Chemosphere* 1992, vol. 35, p. 735-752.
- STEINNES E., ANDERSSON E.M., SJØBAKK T.E. Environmental monitoring in Rana. Heavy metal contamination in the terrestrial environment. Report 495/92, State Pollution Control Authority, Oslo 1992, 18 pp (In Norwegian).
- STEINNES E., ALLEN R.O., PETERSEN H.M., RAMBÆK J.P., VARSKOG P. Evidence of large scale heavy-metal contamination of natural surface soils in Norway from long-range atmospheric transport. *Sci Total Environ.*, 1997, vol. 205, p. 255-266.
- TYLER G. Bryophytes and heavy metals: a literature review. *Bot. J. of the Linnean Society*, 1990, vol. 104, p. 231-253.



Стейннес Э. и др.

Д18-2003-41

Изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов в районе сталелитейного комплекса в северной Норвегии при различной ориентации производства

Для изучения атмосферных выпадений тяжелых металлов в окрестностях города Му-и-Рана в северной Норвегии до и после закрытия сталелитейного производства в 1989 г. и перехода на альтернативное ферросплавное производство применялся метод биомониторинга с помощью мхов-биомониторов. Образцы мха *Hylocomium splendens* собирались в одних и тех же точках пробоотбора в 1989 и 1993 г. Сочетание инструментального нейтронного активационного анализа (ИНАА) и метода атомной абсорбционной спектрометрии (ААС) позволило определить 38 элементов в собранных образцах мха. Для интерпретации аналитических результатов применялся факторный анализ. Выпадения Fe и других элементов, обычно ассоциируемых с земной корой, были выше в период работы завода в режиме сталелитейного производства. Существенно увеличилось выпадение Cr в связи с переориентацией завода на производство феррохрома. Также наблюдалось повышенное выпадение Ni и Au, в то время как выпадение Mn, Co, Ag, Sb и W осталось на прежнем уровне. Региональное распределение элементов-загрязнителей существенно зависело от топографии местности. Результаты анализа образцов природных поверхностных почв, собранных одновременно с первой серией мхов, явно свидетельствуют об их загрязнении многими металлами из атмосферных выпадений. ИНАА оказался мощным методом для подобного исследования. Описанный подход может с успехом применяться для изучения атмосферных выпадений тяжелых металлов вблизи сталелитейных заводов в России и других странах.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Steinnes E. et al.

D18-2003-41

Metal Pollution Around an Iron Smelter Complex in Northern Norway at Different Modes of Operation

The moss biomonitoring technique was employed to study the atmospheric deposition in and around the town of Mo i Rana, northern Norway, before and after closing an iron smelter and establishing alternative ferrous metal industries. Samples of *Hylocomium splendens* were collected from the same sites in 1989 and 1993. A combination of instrumental neutron activation analysis (INAA) and atomic absorption spectrometry was used to obtain data for 38 elements in these moss samples, and the analytical data were subjected to factor analysis. In general, the deposition was higher when the iron smelter was still in operation, in particular for Fe and for many elements normally associated with crustal matter. For Cr there was a substantially increased deposition due to the operation of a new ferrochrome smelter. Also for Ni and Au an increased deposition was observed, whereas for metals such as Mn, Co, Ag, Sb, and W there was no appreciable change. INAA proved to be a powerful tool for this kind of study. The regional distribution of pollutants was strongly dependent on the local topography. Samples of natural surface soils collected simultaneously with the first moss series showed clear signs of contamination with a number of metals from atmospheric deposition. The approach described in this work could be advantageously used to study atmospheric deposition of heavy metals around iron smelters in Russia and elsewhere.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

**Редактор *М. И. Зарубина***  
**Макет *Н. А. Киселевой***

Подписано в печать 25.03.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 225 экз. Заказ № 53828.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)