

УДК 630\*114,7:630\*114,351:504.5 (470,22)

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭМИССИЙ КОСТОМУКШСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА НА ЛЕСНЫЕ ПОДСТИЛКИ СОСНЯКОВ В СЕВЕРОТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЕ КАРЕЛИИ**

**Н. Г. Федорец, А. Н. Солодовников**

*Институт леса Карельского научного центра РАН*

Изучено состояние лесных подстилок в сосновых лесах на различном удалении от Костомукшского горно-обогатительного комбината. Выявлено воздействие аэро-поллютантов на показатели кислотности, зольности и накопление тяжелых металлов в лесных почвах на расстоянии до 25 км от источника загрязнения за 27-летний период работы комбината.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** аэротехногенное загрязнение, лесные подстилки, подзолы, сосновые леса, горно-обогатительный комбинат, кислотность, зольность, тяжелые металлы.

### **N. G. Fedorets, A. N. Solodovnikov. IMPACT OF THE KOSTOMUKSHA MINING AND PROCESSING PLANT EMISSIONS ON THE FOREST LITTERS IN PINE FORESTS OF THE NORTHERN TAIGA SUBZONE OF KARELIA**

The condition of forest litters at various distances from the Kostomuksha ore-dressing mill was studied. The effects of air-borne pollutants on the soil acidity, ash content and heavy metal accumulation through the 27-year period of the mill operation were revealed. The condition of the litters in the area of 25 km around the mill were assessed.

**K e y w o r d s:** air pollution, forest litters, podzols, pine stands, mining and ore-dressing complex, acidity, ash content, heavy metals.

---

### **Введение**

Охрана окружающей среды от загрязнения стала насущной задачей общества, прежде всего в странах с высокоразвитой индустрией. Состояние почвенного покрова является важнейшим показателем глубины происходящих изменений в окружающей среде. Под влиянием растущего загрязнения почва деградирует, а это значит, что ее естественная структура распадается и почва частично или полностью утрачивает устойчивость к внешнему воздействию. В почвах меняется общее содержание загрязняющих веществ и

соотношение их соединений [Мотузова, 2009]. Источниками загрязнения атмосферы являются теплоэнергетические установки, промышленность, транспортные средства, коммунальное, сельское и лесное хозяйство. Факторы, определяющие техногенное накопление тяжелых металлов в почвах, – это пыль и атмосферные осадки. Аэрозоли – твердые частицы размером до 0,01 мкм и менее, взвешенные в воздухе и конденсирующие пары воды, – являются носителями основной массы ТМ в атмосфере. Частицы крупнее 10 мкм, попавшие в атмосферу, быстро осаждаются. До 80–90 % химических элементов,

содержащихся в аэрозолях, связано с частицами размером около 1 мкм. Частицы переносятся на различное расстояние и выпадают из атмосферы неравномерно и на различном расстоянии от источника их выбросов в атмосферу в зависимости от размера и массы самих частиц, а также в зависимости от рельефа, типа растительности, движения приземных воздушных масс [Алексеевко, Алексеевко, 1996].

Среди многочисленных загрязнителей одним из наиболее опасных считаются тяжелые металлы. Они переносятся в атмосфере на большие расстояния от источника выбросов и, осажаясь, оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Тяжелые металлы, как особая группа элементов, в химии почвы выделяются из-за токсичного действия, оказываемого на растения при высокой их концентрации. Однако о степени опасности в почвах того или иного тяжелого элемента единого мнения нет [Водяницкий, 2012]. Министерство природных ресурсов и экологии РФ контролирует валовое содержание в почвах девяти тяжелых металлов: Mn, V, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Co, Cr [Государственный доклад..., 2008].

Повышенные и высокие концентрации тяжелых металлов в почве вызывают резко негативные функционально-экологические изменения в компонентах природной среды, снижение биоразнообразия природных экосистем, включая негативные последствия для древесной растительности, уменьшение видового разнообразия и численности почвенных животных и микроорганизмов. Накопление поллютантов в почве при долговременном техногенном воздействии может привести к значительным нарушениям минерального питания растений и функционирования лесных экосистем [Лесные экосистемы..., 1990].

В нашей стране и за рубежом изучению воздействия аэротехногенных выбросов крупных промышленных предприятий на лесные биогеоценозы, в т. ч. на лесные почвы бореальной зоны, посвящено значительное число работ [Jones, 1990; Tikkanen, Niemela, 1995; Лукина, Никонов, 1996; Adriano, 1996; Лумме и др., 1997; Ruhling, 1998; Кашулина, 2002; Черненко, 2002; Кашулина, Салтан, 2008]. Как следует из литературных источников и проведенных нами исследований [Федорец, Шильцова, 2001; Федорец, Бахмет, 2003], индикаторными показателями деградации лесных подстилок под воздействием аэротехногенных выбросов промышленных предприятий являются, в первую очередь, кислотно-основные показатели и зольность.

Большое внимание исследователи уделяют выявлению интенсивности накопления тяжелых металлов в почвах разного генезиса, фракционному составу их соединений, миграции и трансформации в пределах почвенного профиля. В ряде работ [Никонов и др., 1994; Переверзев и др., 2002; Fedorets, 2003; Федорец и др., 2004] показано, что автоморфные почвы наследуют валовое количество тяжелых металлов от породы, на которой они сформировались, затем в процессе почвообразования происходит их перемещение в почвенном профиле, связанное с биогенной аккумуляцией (преимущественно металлов-биофилов) в лесной подстилке. Как показали исследования [Никонов и др., 1994], в органогенных горизонтах подзолов сосредоточена основная масса тяжелых металлов, аккумулируемых почвой при загрязнении.

В то же время установлено, что лесные подстилки являются геохимическим барьером на пути продвижения аэротехногенных загрязнителей в более глубокие слои почвы, а следовательно, и в грунтовые воды. Наибольшую нагрузку испытывает самый верхний слой органогенного горизонта, в котором в зоне интенсивного выпадения аэрополлютантов накапливаются тяжелые металлы и происходят основные процессы трансформации. Верхний слой органогенного горизонта служит геохимическим барьером на пути миграции тяжелых металлов по профилю почвы.

Одним из наиболее крупных источников загрязнения атмосферы и почв в Карелии является Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ОАО «Карельский окатыш»), действующий с 1982 года. В состав его аэротехногенных поллютантов входят тяжелые металлы, составляющие 38 % объема их выбросов по республике в целом. Согласно данным «Государственных докладов о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия» [1997, 2000], приоритетными загрязнителями являются Fe, Ni, Cr, соединения серы, а также кальция и магния, которые оказывают различное влияние на свойства почв. При этом если соединения серы способны оказывать подкисление лесных почв, то щелочноземельные металлы (Ca, Mg), напротив, вызывают их подщелачивание.

Целью настоящих исследований явилось изучение временной динамики показателей почвенной кислотности, зольности и концентрации тяжелых металлов в лесных подстилках сосновых лесов в районе действия Костомукшского горно-обогатительного комбината.

## Объекты и методы

Район исследований расположен в западной части северо-таежной подзоны Карелии. Климат района обусловлен его географическим положением, преобладанием западного переноса в циркуляции атмосферы и воздействием местных факторов: сильной расчлененностью рельефа, наличием озер и болот. Преобладающим типом растительности являются хвойные леса: сосновые (78,3 %) и еловые (19,7 %), в основном зеленомошной группы типов леса [Волков, 2008]. На фоне естественных условий происходит преобразование природной среды под влиянием техногенеза. Объектом исследования явились органогенные горизонты подзолов иллювиально-гумусово-железистых связнопесчаных, сформировавшихся на морене в сосняках воронично-черничных 70–110-летнего возраста. Пробные площади расположены по градиенту к юго-западу от комбината на различном удалении (табл. 1). Исследования проводили на одних и тех же пробных площадях через 5, 8, 15 и 27 лет с начала функционирования комбината, а именно: в 1987, 1990, 1997, 2009 годах. При работе на ограниченном количестве объектов, расположенных по градиенту загрязнения, важное значение приобретает выбор пробных площадей, аналогичных по всем факторам, особенно по генезису почв и почвообразующих пород. Морфометрическими параметрами почв и данными гранулометрического состава доказана идентичность почв анализируемой выборки.

Таблица 1. Расположение и характеристика пробных площадей локального экологического мониторинга в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК)

№ пробной площади, координаты	Направление от ГОК, расстояние, км	Мощность лесной подстилки, см
1. N 64.64098°, E 030.72582°	ЮЗ – 0,5	0–6
2. N 64.63002°, E 030.71502°	ЮЗ – 2	0–7
3. N 64.61256°, E 030.64384°	ЮЗ – 5	0–5
4. N 64.58339°, E 030.58776°	ЮЗ – 10	0–3
5. N 64.57132°, E 030.54157°	ЮЗ – 15	0–4
6. N 64.55004°, E 030.32500° (контроль)	ЮЗ – 25	0–6
7. контроль N 64.50030°, E 030.32450°	Ю-ЮЗ – 50	0–6

В образцах лесных подстилок, отобранных по общепринятой методике [Методические ре-

комендации..., 1981], определяли кислотнo-щелочные показатели, зольность подстилок и валовое содержание тяжелых металлов [Агрoхимические методы..., 1975].

Полученные данные сравнивали с показателями для почв условно чистой территории участка фонового экологического мониторинга на территории заповедника «Костомукшский», расположенного на расстоянии 50 км от комбината. Определение валового содержания тяжелых металлов в лесных подстилках провели методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Интенсивность техногенной геохимической аномалии определяли по степени накопления элемента-загрязнителя по сравнению с фоном ( $K_c = C_i / C_f$ ). Известно, что техногенные аномалии чаще всего имеют полиэлементный характер, поэтому рассчитали суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами (СПЗ) по формуле Саета:

$$СПЗ = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1),$$

где  $n$  – число учитываемых элементов [Саеt и др., 1990].

## Результаты и обсуждение

Подзолы иллювиально-гумусово-железистые связнопесчаные формируются в мезоморфных условиях и приурочены к моренным холмам и грядам. Почвообразующими породами могут быть как валунные грубозернистые пески, так и супеси. На них произрастают сосняки черничные и воронично-черничные. Морфологическое строение почв: А0-А2-Bhf-Bf-B2-BC-C. Лесная подстилка (3–7 см) грубогумусная, подзолистый горизонт (18–24 см) ярко-белесого цвета. Иллювиальный горизонт Bhf тускло-охристого цвета, в верхней части с коричневатым оттенком. Почвы развиты на кислых почвообразующих породах, содержание кремнезема в них более 70 %. Распределение оксидов Al и Fe имеет четко выраженный элювиально-иллювиальный профиль, характерный для подзолов. Почвы, образовавшиеся на моренных отложениях в грядовом ландшафте, содержат больше Ca, Mg, Fe и Al, чем возникшие на флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложениях и содержащие значительно больше кремнезема. Почвы кислые, повышенную кислотность имеют лесные подстилки и подзолистые горизонты. Степень их насыщенности основаниями часто бывает менее 50 %. В составе обменных оснований лесных подстилок преобладает водород, а в минеральных – кальций и магний. Основная масса органического вещества сосредоточена в лесной

подстилке и иллювиальном горизонте. Распределение гумуса по профилю имеет элювиально-иллювиальный характер. Богатство элементами минерального питания зависит от характера почвообразующей породы [Морозова, 1991].

**Кислотность подстилок.** Лесные подстилки почв в сосняках воронично-черничных северо-таежной подзоны характеризуются высокими показателями обменной кислотности – рН 2,7–2,9 (рис. 1). В районе воздействия аэротехногенных поллютантов, в состав которых входит сера, по данным И. П. Лазаревой с соавторами [1992], предполагалось увеличение почвенной кислотности, однако этого не происходит.

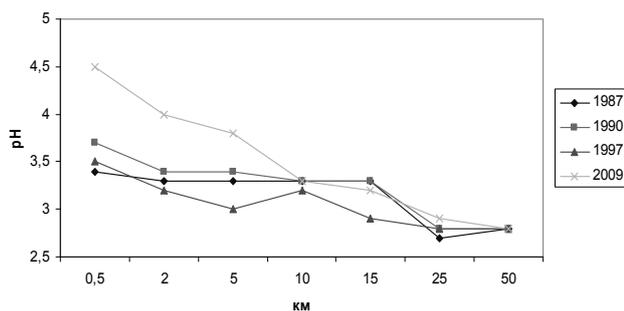


Рис. 1. Временная и пространственная изменчивость показателя рН лесных подстилок в районе Костомукшского ГОК

Ряд исследователей показывают, что выпадающие в техногенных зонах атмосферные осадки богаты серой и тяжелыми металлами, и это приводит к повышению почвенной кислотности [Аржанова, Елпатьевский, 1990; Никонов и др., 1994; Лукина, Никонов, 1996]. Изменение кислотно-основных условий способствует ухудшению гумусного состояния, а также физико-химических свойств. В зависимости от состава аэротехногенных промышленных выбросов эти изменения могут быть разными. Так, например, при загрязнении почв фторидом натрия создается избыточная щелочность [Гапонюк, 1983].

По результатам исследований, проведенных сотрудниками Института леса [Лазарева и др., 1992] через 5 и 8 лет с начала работы Костомукшского горно-обогатительного комбината, на расстоянии 0,5–2 км были снижены все виды почвенной кислотности лесных подстилок. Здесь выражен нейтрализующий эффект оксидов металлов, поступающих с пылевыми выпадениями.

Проведенные нами многолетние исследования позволили установить временные тренды показателей почвенной кислотности. Изменения кислотно-щелочных показателей почв по сравнению с почвами на территории фонового мониторинга выявлены на всех пробных площадях в радиусе до 15 км от комбината. На-

меньшая величина обменной кислотности лесных подстилок через 27 лет с начала работы комбината, составляющая по показателю рН 4–4,5, определена на расстоянии 0,5–2 км от источника загрязнения. Вместо ожидаемого подкисления подстилок мы обнаруживаем снижение почвенной кислотности. Прогрессирующее во времени уменьшение кислотности лесных подстилок исследуемых почв выявлено на расстоянии до 5 км от источника загрязнения. На расстоянии 10–15 км сохраняются стабильные значения рН, установившиеся через 5 лет с начала функционирования Костомукшского горно-обогатительного комбината.

**Зольность подстилок** является показателем степени их минерализации. По этому показателю можно судить об уровне техногенного запыления поверхности почвенного покрова. Первые результаты, полученные через 5 лет с начала работы комбината, показали, что вокруг него сформировалась зона запыления поверхности почвы, простирающаяся до 5 км (в юго-западном направлении) от источника. По прошествии еще трех лет протяженность зоны загрязнения не изменяется, однако возрастает интенсивность накопления пыли. Предположительно, в ближайшие 10–15 лет не произойдет трансформации лесных подстилок в органоминеральный субстрат даже в зоне максимального запыления.

Исследования, проведенные спустя 15 лет с начала работы ГОК, позволили установить возрастание зольности лесных подстилок к юго-западу от комбината на расстоянии 2 км. Наибольшие значения выявлены для почв на расстоянии 0,5 км, которые в 1,5–2 раза превышали фоновые показатели (рис. 2). Прогрессирующее повышение зольности выявили обследования, проведенные спустя 27 лет с начала работы источника эмиссий. На расстоянии 0,5 км зольность превышает контроль (фон) уже почти в 4 раза, а на расстоянии до 10 км – в 2–2,5 раза. Таким образом, по сравнению с предыдущим туром обследования степень запыления подстилок увеличилась в 2–2,5 раза.

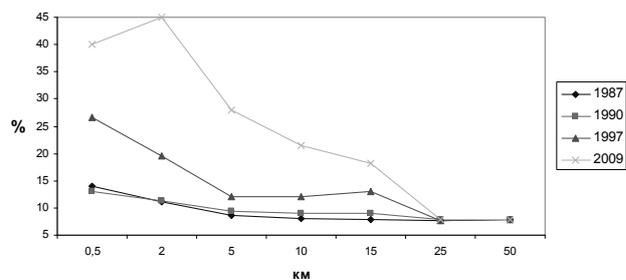


Рис. 2. Временная и пространственная изменчивость зольности лесных подстилок

Спустя 27 лет с начала функционирования ГОК отчетливо прослеживается пространственная изменчивость величины зольности лесных подстилок исследуемых почв в зависимости от расстояния до комбината (рис. 3). Наибольшее накопление пыли отмечено на расстоянии 2 км от источника загрязнения, затем происходит постепенное снижение этого показателя.

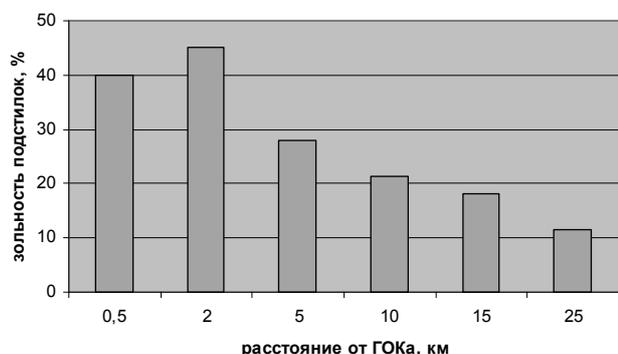


Рис. 3. Пространственная изменчивость зольности лесных подстилок в районе влияния аэротехногенных выбросов Костомукшского комбината (2009 г.)

**Тяжелые металлы.** Основным источником металлов – загрязнителей почв в районе Костомукшского железорудного комплекса является техногенная пыль. Наши исследования показали, что в атмосферной пыли содержание железа составляет 10–17,5 мг и преобладает над остальными металлами. По сравнению с почвой атмосферная пыль техногенного происхождения на порядок больше обогащена тяжелыми металлами. Попадая в атмосферу в виде макро-, микрочастиц, аэрозолей, тяжелые металлы рассеиваются вокруг источника, образуя техногеомы, аналогичные по структуре естественным геохимическим полям рассеивания [Саэт и др., 1990].

Содержание микроэлементов в почвах, как было сказано выше, зависит от количества их в почвообразующих породах, а в последних, представленных рыхлыми отложениями, – от исходных магматических пород. В исследуемом районе северотаежной подзоны Карелии значительное влияние на почвообразование оказывают коренные магматические горные породы: граниты и гранодиориты.

Горные почвообразующие породы здесь представлены элюво-делювием кислых пород, а также верхними слоями четвертичных отложений, а именно – грубообломочным материалом различного гранулометрического состава. Сравнивая содержание микроэлементов в горных породах с кларком, отмечаем, что содержание меди, цинка, марганца, кобальта, молибде-

на, никеля и бора в кислых горных породах Карелии ниже, чем кларк, выше кларка накопление хрома (табл. 2). Количество микроэлементов в песках и песчаной морене, являющихся почвообразующими породами в районе проведенных нами исследований, близко между собой и при этом по большинству показателей ниже кларка. Перераспределение микроэлементов в процессе выветривания и почвообразования происходит в основном на уровне концентраций, которыми характеризуются породы.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в почвообразующих породах Карелии, мг/кг

Почвообразующая порода	Cu	Zn	Mn	Co	Mo	B	Cr	Ni	Fe
Кислые горные породы	20	50	458	3	1,5	5	30	14	25000
Морена песчаная	7,4	8,2	362	3,5	0,9	6,0	60	16	17000
Кларк	30	60	600	5	1,9	15	25	80	50000

Примечание. Данные по [Тойкка и др., 1973].

Песчаные подзолы северотаежной подзоны характеризуются низким содержанием всех металлов [Федорец и др., 2008]. На первом этапе исследований (через 5 и 9 лет с начала функционирования комбината) выделена импактная зона загрязнения почв металлами в радиусе 6–8 км. Приоритетными загрязнителями по интенсивности накопления в лесных подстилках являлись железо, никель и хром [Лазарева и др., 1992]. Определение содержания тяжелых металлов в лесных подстилках подзолов через 15 лет с начала работы Костомукшского ГОК позволило выявить особенности накопления каждого из них (рис. 4). Вокруг комбината на расстоянии 0,5 км в лесных подстилках накапливаются кадмий, медь, никель и железо, до расстояния 2 км накапливается свинец, а железо – до 10 км. При дальнейшем удалении от комбината содержание большинства металлов снижается и приближается к фоновым значениям. Однако концентрация ни одного из указанных элементов не превысила предельно допустимой [Рэуце, Кырстя, 1986].

Аналогичные исследования провели через 27 лет с начала работы комбината (через 12 лет после предыдущего тура обследования). На расстоянии 0,5 км от объекта повышенных значений достигали концентрации железа, кобальта и никеля, превышая фон примерно в 6–8 раз. На расстоянии 2 км выше фоновых были значения концентраций следующих металлов: кадмия (в 2 раза), меди (в 4), марганца (в 3), хрома и железа (в 5–6 раз). Количество свинца превышало фон в

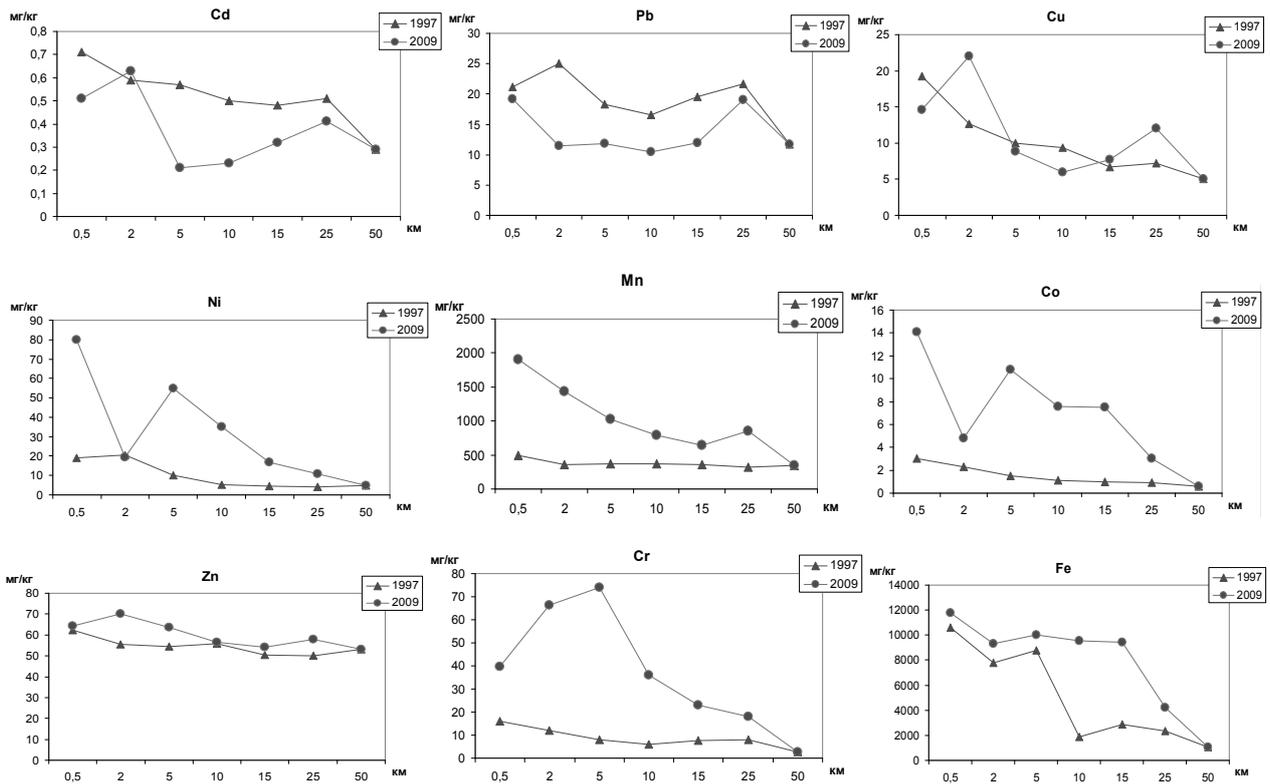


Рис. 4. Содержание тяжелых металлов в лесных подстилках на различном удалении от комбината, мг/кг

1,7 раза на расстоянии 0,5 км, а при удалении от комбината на 2 км было близко к фоновым показателям. Для различных металлов максимальные показатели накопления в подстилках выявлены на разном расстоянии от комбината, что связано с особенностями их распространения в окружающей среде. Если такие металлы, как кадмий, медь, никель, марганец, хром и цинк, в основной своей массе накапливаются достаточно близко от источника выбросов (0,5 км), то свинец, кобальт и железо распространяются на большие расстояния.

Проблема, касающаяся особенностей рассеяния и накопления в почвах соединений тяжелых металлов в зависимости от свойств самих почв, в настоящее время весьма актуальна и требует дальнейших исследований.

Таким образом, определение содержания тяжелых металлов в лесных подстилках, проведенное 12 лет спустя после предыдущего тура обследования, т. е. через 27 лет с начала функционирования комбината, показало, что продолжается загрязнение лесных почв тяжелыми металлами.

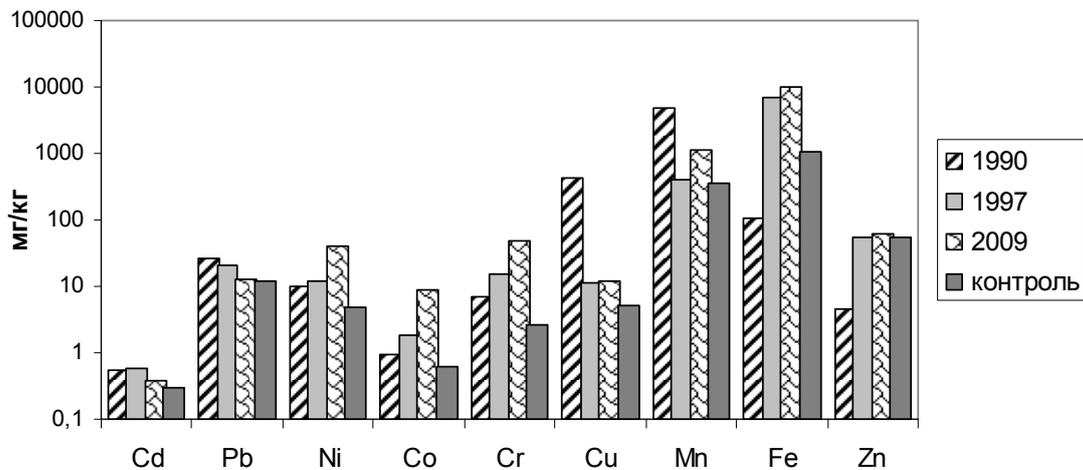


Рис. 5. Временная изменчивость содержания металлов в лесных подстилках в 15-километровой зоне в районе Костомукшского ГОК

Таблица 3. Коэффициенты концентрации (Кс) тяжелых металлов в лесных подстилках пробных площадей на различном удалении от эмитента (Костомукшского ГОК)

№ п. п.	Направление, расст. от ГОК, км	Cd	Pb	Ni	Co	Zn	Cr	Cu	Mn	Fe
Через 15 лет с начала работы комбината, 1997 г.										
1	ЮЗ – 0,5	2,5	1,8	4,1	4,9	1,2	6,2	3,8	1,4	10,2
2	ЮЗ – 2	2,0	2,1	4,3	3,8	1,0	4,6	2,5	1,0	7,5
3	ЮЗ – 5	2,0	1,6	2,1	2,5	1,0	3,1	2,0	1,1	8,5
4	ЮЗ – 10	1,7	1,4	1,1	1,8	1,1	2,3	1,9	1,1	1,8
5	ЮЗ – 15	1,7	1,7	1,0	1,6	1,0	2,9	1,3	1,0	2,8
6	ЮЗ – 25	1,8	1,9	1,0	1,5	1,0	3,0	1,4	1,0	2,3
Через 27 лет с начала работы комбината, 2009 г.										
1	ЮЗ – 0,5	1,8	1,6	17,0	23,1	1,2	15,3	3,0	5,5	11,4
2	ЮЗ – 2	2,2	1,0	4,1	7,9	1,3	25,5	4,4	4,1	11,4
3	ЮЗ – 5	1,0	1,0	11,6	17,7	1,2	28,5	1,8	3,0	9,6
4	ЮЗ – 10	1,0	1,0	7,5	12,5	1,0	13,8	1,2	2,3	9,2
5	ЮЗ – 15	1,1	1,0	3,6	12,3	1,0	8,9	1,5	1,9	9,1
6	ЮЗ – 25	1,4	1,6	2,3	4,9	1,1	6,9	2,4	2,4	4,0
Фон, мг/кг <sup>-1</sup>	Ю-ЮЗ – 50	0,29	11,7	4,7	0,61	53,2	2,6	5,0	348	1038

По сравнению с предыдущим туром обследования на всех пробных площадях, расположенных на различном удалении от эмитента, значительно увеличилось содержание в лесных подстилках почти всех металлов, в первую очередь никеля, кобальта, железа и хрома, в то же время отмечено снижение накопления кадмия, свинца и в некоторой степени цинка. При этом превышение ПДК выявлено лишь для никеля и составило 1,6 ПДК. Следует отметить, что продолжается накопление в лесных подстилках умеренно- и слабоопасных загрязнителей (Co, Ni, Cu, Cr, Mn) и в то же время снижается накопление Cd, Pb и Zn, относящихся к сильноопасным. Относительно железа класс опасности не установлен [Водяницкий, 2012]. Таким образом, почвы в районе Костомукшского ГОК накапливают в основном умеренноопасные элементы.

Изучение временной изменчивости содержания металлов в лесных подстилках сосняков по усредненным показателям в зоне 15 км по градиенту (рис. 5) свидетельствует о прогрессирующем загрязнении следующими металлами: никелем, кобальтом, хромом, железом, т. е. они являются приоритетными металлами-загрязнителями.

Оценку степени изменения содержания тяжелых металлов в лесных подстилках в районе действия комбината провели по показателю Кс

(коэффициент концентрирования) для каждого элемента (табл. 3). Кс иллюстрирует изменение параметра по отношению к фону. При анализе массива Кс выявлена общая тенденция увеличения содержания металлов в лесных подстилках в зоне запыления. Это свидетельствует, что техногенная пыль – основной источник металлов. Исследования 1997 и 2009 годов показали различную степень концентрирования одних и тех же металлов в различные периоды наблюдений, т. е. изменился ряд приоритетных загрязнителей. Если в 1997 г. концентрирование кадмия, свинца и железа отмечается в подстилках всего градиента, то в 2009 г. по всему градиенту концентрируются никель, кобальт, хром и железо. Эти металлы были выявлены как приоритетные загрязнители и в первых турах обследований [Лазарева и др., 1992]. В последние годы накопления свинца практически не происходит, а кадмий концентрируется на расстоянии около 2 км от источника аэротехногенного загрязнения почвы. Следует отметить, что цинк в настоящее время занимает последнее место по интенсивности накопления, т. е. практически исключается из числа загрязнителей.

Многими исследователями выявлено, что в зонах локального загрязнения общее содержание микроэлементов может повыситься на несколько порядков. Так, по данным С. И. Решет-

никова [1990], в окрестностях Среднеуральского медеплавильного завода содержание меди возросло в 19 раз по сравнению с незагрязненной почвой. В районе Дальнегорского завода цветной металлургии в течение 25 лет в почвах общее содержание свинца увеличилось почти в 100 раз, цинка – в 10 раз [Елпатьевский, Луценко, 1982]. В районах аэротехногенных воздействий комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» содержание в почвах никеля и меди возросло на несколько порядков [Переврзев и др., 2002].

На основании проведенных исследований в разных районах лесной зоны и после обработки литературных данных была предложена шкала интенсивности загрязнения тяжелыми металлами гумусового горизонта почвы [Добровольский, 1999]. Шкала построена с учетом возможности использования результатов определения металлов в почве как методом атомно-абсорбционной спектроскопии, так и другими (эмиссионная спектроскопия, нейтронно-активационный метод). Мерой интенсивности загрязнения служит коэффициент аномальности (или коэффициент концентрирования), равный отношению среднего значения концентрации металла в загрязненной почве к природной норме, т. е. геохимическому фону. При значении Кс от 5 до 10 загрязнение слабое, от 10,1 до 30 – умеренное, а при значении Кс более 30 – сильное. Таким образом, руководствуясь градациями загрязнения, предложенными Г. В. Добровольским [1999], выявили, что через 27 лет от начала функционирования Костомукшского горно-обогатительного комбината сформировалась зона умеренного загрязнения лесных подстилок никелем и железом – до 5 км, а хромом – до 10 км от источника поллютантов.

Почвы являются депонирующими средами, накапливающими многолетние загрязнения. Оценка состояния данных сред производилась нами и по значениям суммарных показателей загрязнения (СПЗ). Как было сказано выше, техногенные аномалии чаще всего имеют полиэлементный характер, в этой связи рассчитали суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами лесных подстилок. Для урбанизированных территорий разработаны градации уровня загрязнения в зависимости от коэффициента СПЗ. Они учитывают показатели состояния здоровья населения, проживающего на территории с различным уровнем загрязнения. Если величина СПЗ не превышает 16, то уровень загрязнения считается минимальным, если составляет от 17 до 32, то уровень загрязнения средний, при показателях от 33 до 128 – высокий, а более 128 – максималь-

ный [Методические указания..., 1987]. Полученные нами суммарные показатели загрязнения почв тяжелыми металлами четко показывают снижение этого показателя по мере удаления от комбината (табл. 4).

Таблица 4. Показатели суммарного загрязнения лесных подстилок в районе комбината.

№ п.п.	1	2	3	4	5	6
Расст. от ГОК, км	0,5	2	5	10	15	25
1997 г.	28,1	20,8	15,9	6,2	7,0	6,9
2009 г.	71,9	52,9	67,4	41,5	32,4	19,0

В работе М. А. Хованской [2012] приводятся данные по соответствию показателя СПЗ геохимическим баллам, разработанным автором для почв горнодобывающих районов (табл. 5).

Таблица 5. Показатели СПЗ и геохимические баллы

Геохимический балл	СПЗ					
	N = 0	0 < N < 1	1 ≤ N < 2	2 ≤ N < 3	3 ≤ N < 4	N = 4
СПЗ	< 8	8–16	16–32	32–64	64–128	> 128

Примечание. Данные по [Хованская, 2012].

Все показатели СПЗ, рассчитанные для лесных подстилок в районе действия Костомукшского комбината в 1997 году, были значительно ниже, чем полученные в 2009, т. е. подтверждается вывод о прогрессирующем с течением времени загрязнении лесных подстилок. Последний тур обследований (2009 г.) показал, что на расстоянии около 10 км от комбината суммарное загрязнение соответствует 2–3 эколого-геохимическим баллам, а на расстоянии 15–25 км загрязнение соответствует 1–2 баллам. Однако следует отметить, что проблема оценки уровня техногенного загрязнения почв в районах промышленных воздействий в настоящее время недостаточно разработана и на ней следует в дальнейшем сконцентрировать внимание почвоведов и экологов.

## Заключение

Выявлена пространственная и временная динамика изменения некоторых химических показателей и свойств лесных подстилок в сосняках воронично-черничных в районе действия Костомукшского горно-обогатительного комбината за 27-летний период его функционирования.

Наименьшие показатели обменной кислотности лесных подстилок (рН 4,0–4,5) установлены на расстоянии 0,5–2 км от источника загрязнения. При удалении на 10–15 км сохраняются значения рН, установившиеся с начала функционирования ГОК.

Выявлено прогрессирующее во времени повышение зольности подстилок: на расстоянии 0,5 км зольность превышает контроль (фон) в 4 раза, на расстоянии до 10 км – в 2–2,5 раза. По сравнению с предыдущим туром обследования уровень зольности подстилок увеличился в 2–2,5 раза.

Продолжается концентрирование в лесных подстилках тяжелых металлов, относящихся к умеренно- и слабоопасным загрязнителям (Co, Ni, Cu, Cr, Mn, Fe).

К числу приоритетных загрязнителей отнесены железо, никель и хром, которые опережают другие металлы по интенсивности накопления.

Абсолютные показатели концентрации металлов в почвах ниже ПДК (кроме Ni), и на данном этапе они не представляют опасности ни для растений, ни для почвенной биоты.

По величине коэффициента концентрирования (Kс) уровень загрязнения подстилок на расстоянии 5–10 км можно считать умеренным по никелю, хрому и железу.

Показатели СПЗ, рассчитанные для лесных подстилок на различном удалении от эмитента, подтверждают вывод о прогрессирующем с течением времени загрязнении лесных подстилок.

## Литература

- Агрохимические методы исследования почв* / Ред. А. В. Соколов. М.: Наука, 1975. 488 с.
- Алексеевко В. А., Алексеевко Л. П.* Аэрозольный перенос и концентрация тяжелых металлов в почвах // Тяжелые металлы в окружающей среде: тез. докл. межд. симпоз. Пущино. 1996. С. 59–60.
- Аржанова В. С., Елпатьевский П. В.* Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 194 с.
- Волков А. Д.* Типы леса Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 180 с.
- Водяницкий Ю. Н.* Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение, 2012. № 3. С. 368–375.
- Гапонюк Э. И.* Степень и экологические последствия фторидного загрязнения // Гидрометеорология. Сер. «Контроль загрязнения природной среды»: обзор. инф. Обнинск: ВНИИГМИ МЦД, 1983. Вып. 1. С. 5–226.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1996 году.* Петрозаводск: РИО Комиздата РК, 1997. 176 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1999 году.* Петрозаводск: ГУ Редакционно-издательский отдел, 2000. 213 с.
- Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2007 году.* М.: Минприроды РФ, 2008. 503 с.
- Добровольский Г. В.* Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // Почвоведение. 1999. № 5. С. 639–645.
- Елпатьевский П. В., Луценко Т. Н.* Распределение и формы нахождения тяжелых металлов в горных буроземах Сихотэ-Алиня как индикатор химического ореола рассеяния // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М: Наука, 1982. 387 с.
- Кашулина Г. М.* Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с.; ч. 2. 234 с.
- Кашулина Г. М., Салтан Н. В.* Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». Апатиты: КНЦ РАН, 2008. 235 с.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение* / Ред. В. А. Алексеев. Л.: Наука, 1990. 198 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; ч. 2. 192 с.
- Лумме И., Архипов В., Федорец Н., Мялкенен Э.* Состояние сосняков в районах Карельского перешейка – юго-восточной Финляндии и Костомукши – Кайнуу // Бюллетень научно-исследовательского института леса Финляндии. Научный центр Вантаа. 1997. Вып. 665. 75 с.
- Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В. и др.* Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов северной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 51 с.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами* / Ред. Н. Г. Зырин, С. Г. Малахов. М.: Гидрометеоиздат, 1981. 108 с.
- Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами.* М.: Минздрав СССР, 1987. 25 с.
- Морозова Р. М.* Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 183 с.
- Мотузова Г. В.* Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 168 с.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Дером Д., Петрова Н. В., Горяинова В. П.* Миграция и аккумуляция соединений никеля и меди в Al-Fe-гумусовых подзолистых почвах сосновых лесов (зона воздействия комбината «Североникель») // Почвоведение. 1994. № 11. С. 31–41.
- Переверзев В. Н., Свейструп Т. Е., Стрелкова М. С.* Аккумуляция никеля и меди в лесных подзолах в результате выбросов предприятий цветной металлургии // Почвоведение. 2002. № 3. С. 364–367.
- Решетников С. И.* Формы соединений меди в загрязненных и фоновых дерново-подзолистых почвах // Биологические науки. 1990. № 4. С. 114–123.
- Рэуце К., Кырстя С.* Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 222 с.
- Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Тайка М. А., Перевозчикова Е. М., Левкина Т. И., Заварзин В. М., Михкиев А. И., Изергина М. М.* Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.

Федорец Н. Г., Шильцова Г. В. Фоновое и локальное загрязнение территории Республики Карелия тяжелыми металлами и серой // Международный форум по проблемам науки, техники и образования. М.: 2001. С. 69–70.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 239 с.

Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Бахмет О. Н. Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. Выпуск 6. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2004. С. 69–89.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.

Хованская М. А. Методика оценки комфортности жизнедеятельности в горнодобывающих районах в местах распространения вечномерзлотных пород: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2012. 24 с.

Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.

Adriano D. C. Trace elements in the terrestrial environment. New York: Springer Verlag, 1996. 533 p.

Fedorets N. G. The effect of industrial emission on soils near the Kostomuksha ore-dressing plant // Soil in the Environment. Krakov. Poland 26 Congress of the Polish Soil Science Society. Poland, Krakov: Jagiellonian University, 2003. 415 p.

Jones K. T. Thalium // Heavy metals in soils / Ed. J. B. Alloway N. Y.: John Wiley & Sons. 1990. P. 304–309.

Ruhling A., Steiness E. (eds.) Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995–1996. Nord, 1998. Vol. 15. 66 p.

Tikkanen E., Niemela I. Kola Peninsula pollutants and forest Ecosystems in Lapland / Finland's Ministry of Agriculture and Forestry. The Finnish Forest Research Institute. Oy-Juvaskula Gummarus Kirjapaino, 1995. 82 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Федорец Наталия Глебовна**

зав. лаб. лесного почвоведения и микробиологии,  
д. с.-х. н., проф.

Институт леса Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910

эл. почта: fedorets@krc.karelia.ru  
тел.: 89212281189

### **Солодовников Антон Николаевич**

ведущий почвовед лаб. лесного почвоведения  
и микробиологии

Институт леса Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910

эл. почта: solod@krc.karelia.ru  
тел.: 89535295866

### **Fedorets, Natalia**

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences

11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia

e-mail: fedorets@krc.karelia.ru  
tel.: 89212281189

### **Solodovnikov, Anton**

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences

11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia

e-mail: solod@krc.karelia.ru  
tel.: 89535295866