

М. Г. Опекунова, Е. Ю. Елсукова, В. А. Чекушин, О. В. Томилина, Р. Салминен¹,
К. Рейманн²

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМБИНАТА «СЕВЕРНИКЕЛЬ». II. МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ

В настоящее время основным источником антропогенного воздействия на природную среду Кольского полуострова остается комбинат «Североникель». Исследования кафедры геоэкологии и природопользования СПбГУ, проведенные в 2001–2002 гг., свидетельствуют о том, что, несмотря на существенное сокращение объема выбросов диоксида серы и тяжелых металлов, видимого восстановления природно-территориальных комплексов (ПТК) по Мончегорскому градиенту (в южном и северном направлениях от города) за истекшие 5–6 лет не наблюдается. Иссущение тайги в результате выпадения кислотных дождей и загрязнения Ni, Cu, Co и другими поллютантами приводит к частым пожарам, нарушению почвенного покрова и смыву плодородного слоя. В таких условиях самовосстановление северотаежных ПТК затруднено. Тяжелые металлы (ТМ) многократно вовлекаются в биологический круговорот, переходя из почв в растения и возвращаясь обратно с опадом биомассы.

Исследования, проведенные в зоне воздействия комбината «Североникель», свидетельствуют о значительном загрязнении компонентов ландшафта типоморфными для медно-никелевых руд элементами – Ni, Cu, Co [1–7] (табл. 1–4). К настоящему моменту накоплен обширный литературный материал, позволяющий оценить динамику уровня загрязнения в различные временные сроки.

Таблица 1. Валовое содержание ТМ в органогенном горизонте почв

Участки	n	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	S
Водосбор 2 (1994 г.) [5]	25	$\frac{0,52}{0,13-2,66}$	$\frac{82}{19-323}$	$\frac{1649}{252-8130}$	$\frac{15}{5-31}$	$\frac{497}{41-3600}$	$\frac{1651}{339-5980}$	$\frac{20}{7-63}$	$\frac{44}{14-193}$	$\frac{897}{303-2540}$
Водосбор 6 (1994 г.) [4]	11	$\frac{1,81}{0,79-3,86}$	$\frac{118}{39-254}$	$\frac{1645}{607-2988}$	$\frac{11}{3-15}$	$\frac{720}{79-4853}$	$\frac{3161}{1231-7167}$	$\frac{37}{24-55}$	$\frac{64}{34-121}$	$\frac{1231}{690-1960}$
Водосбор 4 (1994 г.) [5]	25	$\frac{0,28}{0,07-0,56}$	$\frac{11}{3-23}$	$\frac{158}{28-505}$	$\frac{5}{1-13}$	$\frac{218}{46-1590}$	$\frac{232}{58-583}$	$\frac{15}{8-25}$	$\frac{33}{7-185}$	$\frac{644}{156-1580}$
ОДК		0,5	–	33	–	–	20	32	55	–

Примечание. Числитель – среднее значение, знаменатель – минимальное–максимальное (то же для табл. 2, 4). Содержание Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, S – в мг/кг, Fe – г/кг (то же для табл. 3).

Основное внимание в опубликованных литературных источниках посвящено изучению миграции и аккумуляции главных индикаторных элементов рудной минерализации – *никеля и меди*.

¹ Геологическая служба Финляндии.

² Геологическая служба Норвегии.

© М. Г. Опекунова, Е. Ю. Елсукова, В. А. Чекушин, О. В. Томилина, Р. Салминен, К. Рейманн, 2006

Таблица 2. Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в органическом горизонте почв

Участки	n	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	S
Водосбор 2 (1994 г.) [5]	25	-	-	$\frac{0,39}{0,03-2,04}$	$\frac{11}{0,8-78}$	$\frac{394}{51-2720}$	$\frac{411}{37-1470}$	$\frac{107}{2-857}$	$\frac{208}{24-856}$	$\frac{5}{0,4-19}$	$\frac{13}{0,5-94}$	$\frac{82}{21-268}$
Водосбор 2 (2001 г.) [2]	1	3,80	3,20	0,67	10	506	209	12	218	12	16	-
Водосбор 6 (1999 г.) [4]	11	$\frac{3,9}{3,4-5,2}$	-	$\frac{1,26}{0,38-3,04}$	$\frac{8}{0,9-20}$	$\frac{305}{35-473}$	$\frac{338}{10-1740}$	$\frac{71}{2-244}$	$\frac{273}{51-660}$	$\frac{12}{6-22}$	$\frac{15}{2-35}$	$\frac{75}{47-109}$
Водосбор 6 (2001 г.) [2]	6	$\frac{4,3}{3,6-4,9}$	$\frac{3,4}{2,9-4,2}$	$\frac{0,45}{0,01-0,9}$	$\frac{4}{0,1-8}$	$\frac{111}{31-158}$	$\frac{173}{24-347}$	$\frac{11}{1-40}$	$\frac{136}{2-316}$	$\frac{6}{0,1-9}$	$\frac{6}{0,4-13}$	-
Водосбор 4 (1994 г.) [5]	25	-	-	$\frac{0,22}{0,05-0,53}$	$\frac{3}{0,6-5}$	$\frac{22}{0,2-98}$	$\frac{94}{2-496}$	$\frac{89}{6-284}$	$\frac{40}{6-85}$	$\frac{5}{1-9}$	$\frac{14}{2-112}$	$\frac{44}{12-101}$
Водосбор 4 (2001 г.) [2]	7	$\frac{3,4}{3,0-4,3}$	$\frac{2,5}{2,1-3,0}$	$\frac{0,69}{0,34-1,7}$	$\frac{10}{3-21}$	$\frac{22}{6-61}$	$\frac{12}{5-23}$	$\frac{148}{55-297}$	$\frac{74}{2-130}$	$\frac{6}{3-10}$	$\frac{17}{8-26}$	-
Условно фоновый участок (2001 г.) [2]	6	$\frac{3,4}{2,7-3,8}$	$\frac{2,3}{1,7-2,6}$	$\frac{0,43}{0,01-0,76}$	$\frac{5}{1-8}$	$\frac{4}{2-6}$	$\frac{60}{6-318}$	$\frac{69}{9-141}$	$\frac{24}{9-43}$	$\frac{3}{0,1-4}$	$\frac{18}{3-37}$	-
ПДК		-	-	-	5	3	-	80	4	6	23	-

Таблица 3. Валовое содержание ТМ в иллювиальных горизонтах почв

Участки	n	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	S
Водосбор 2 (1994 г.) [5]	1	0,08	12	43	–	193	69	1	34	500
Водосбор 6 (1999 г.) [3]*	2	0,05–0,17	6–12	27–74	15–17	81–128	38–86	1–2	2–52	289–486
Водосбор 4 (1994 г.) [5]	1	0,04	8	26	–	156	25	1	36	338
ОДК		0,5	–	33	–	–	20	32	55	–

* Приведены пределы – минимальное–максимальное значение.

Таблица 4. Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в иллювиальных горизонтах почв [2]

Участок и расстояние от Мончегорска	n	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Восток и юго-восток от комбината: гора Ньюдайвенч, телевизионная вершина 2–5 км (2002 г.)	11	$\frac{0,2}{0,1-1,0}$	$\frac{1,7}{0,2-7,3}$	$\frac{93}{13-289}$	$\frac{2,2}{0,2-11,5}$	$\frac{4,0}{0,4-10,8}$	$\frac{0,9}{0,1-1,6}$	$\frac{1,2}{0,4-4,9}$
6 км на север: озера Верхнее Молево и Кутыр (2002 г.)	5	< 0,2	$\frac{6,2}{0,7-3,6}$	$\frac{89}{14-189}$	$\frac{0,8}{0,2-2,7}$	$\frac{7,6}{3,3-11,4}$	$\frac{0,3}{0,1-1,4}$	$\frac{0,9}{0,6-1,1}$
6–7 км на юг: водосбор 2 (2001 г.)	23	$\frac{1,0}{0,1-2,9}$	$\frac{16,5}{0,5-75,0}$	$\frac{116}{27-423}$	$\frac{3,8}{0,4-10,0}$	$\frac{21,4}{2,6-107,0}$	$\frac{0,2}{0,1-1,4}$	$\frac{1,2}{0,3-2,8}$
10 км на север (2002 г.)	3	< 0,2	$\frac{0,9}{0,4-1,6}$	$\frac{97}{18-168}$	$\frac{0,5}{0,2-0,8}$	$\frac{2,4}{1,4-3,0}$	$\frac{0,3}{0,1-0,9}$	$\frac{0,6}{0,5-0,9}$
10–12 км на юг: водосбор 6 (2001 г.)	30	$\frac{0,4}{0,1-1,9}$	$\frac{7,9}{0,2-93,0}$	$\frac{97}{15-440}$	$\frac{2,5}{0,1-13,0}$	$\frac{7,0}{1,1-69,0}$	$\frac{0,6}{0,1-4,7}$	$\frac{1,0}{0,3-2,6}$
14–18 км на север, гора Лысая (2002 г.)	3	< 0,2	$\frac{0,7}{0,1-1,6}$	$\frac{93}{53-116}$	$\frac{0,6}{0,02-1,7}$	$\frac{0,5}{0,1-0,9}$	< 0,1	$\frac{0,7}{0,3-1,3}$
21–23 км на юг: водосбор 4 (2001 г.)	27	$\frac{0,2}{0,1-0,8}$	$\frac{0,9}{0,4-2,7}$	$\frac{174}{35-329}$	$\frac{3,5}{0,1-19,0}$	$\frac{2,0}{0,1-5,8}$	$\frac{0,1}{0,1-1,1}$	$\frac{1,2}{0,3-9,8}$
40–45 км на юг (условно фоновый участок) (2001 г.)	20	$\frac{0,1}{0,1-0,5}$	$\frac{0,26}{0,01-0,8}$	$\frac{107}{21-364}$	$\frac{1,4}{0,02-7,5}$	$\frac{0,2}{0,1-1,0}$	$\frac{0,2}{0,1-2,3}$	$\frac{0,6}{0,2-1,9}$
ПДК		5,0	3,0	–	80,0	4,0	6,0	23,0

Многолетние исследования по программе изучения Баренц-региона [8] показали, что среднее валовое содержание Ni в органомном горизонте почв составляет по Кольскому полуострову 14,4 мг/кг (1,69–2610 мг/кг), подвижного Ni (рН 4,5) – 1,3 мг/кг (0,25–352 мг/кг). По данным Л. В. Алещукина за 1964–1972 гг. [9–11], фоновые валовые концентрации Ni в основных типах почв Мурманского Заполярья не превышают 50–80 мг/кг в органомном горизонте. В отсутствие антропогенного загрязнения распределение его по почвенному профилю носит элювиальный характер [7]. Согласно данным В. В. Никонова [12], доля подвижных форм Ni в условно фоновых районах (приблизительно 60–110 км юго-западнее источника) – не более 5 мг/кг, составляет в среднем 5% от их валового количества, при этом в горизонте Bhfa она снижается до 1%. Как показали проведенные в 2001 г. исследования, на условно фоновом участке в районе оз. Чуозеро в 40–45 км к югу от комбината «Североникель» содержание подвижных форм Ni изменяется от 9 до 43 мг/кг. Средняя концентрация подвижных форм Ni в почвах составляет 24 мг/кг (табл. 2).

Ввод в действие комбината и нарастание мощностей постепенно привели к изменению химического состава всех компонентов ландшафта. В 1960-х годах в зоне аэротехногенного загрязнения в верхних органогенных горизонтах подзолистых Al-Fe-гумусовых почв Печенгских и Монче-тундр содержание Ni и Cu достигло 200 мг/кг [9, 10]. К середине 1980-х годов в зоне сильного разрушения экосистем максимальное среднее содержание валового Ni в подстилке ельников возросло до 2340 мг/кг [13]. А к концу XX в. в подзолах Кольского полуострова оно достигло 3340 мг/кг [12], превышая фоновые показатели в 40–70 раз. Характер распределения поллютанта по генетическим горизонтам с преимущественной аккумуляцией в поверхностном слое подтверждает его аэротехногенное поступление. Так, например, по данным В. В. Никонова [7], в условиях медно-никелевого загрязнения по Мончегорскому градиенту (юго-западное направление от комбината) по мере приближения к источнику загрязнения на расстоянии 48–10–8 км средняя концентрация Ni составила в горизонте A_0A_1 (O) 164–2025–1483 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 41–124–204 мг/кг, в горизонте B – 47–132–218 мг/кг. Как видно из данных рядов, коэффициент перехода A_0/B (отношение содержания металла в органогенном горизонте к содержанию его в иллювиальном горизонте) увеличивается от 3,5 на условно фоновой территории до 15,3 в зоне сильного загрязнения. Аналогичные показатели приведены В. Н. Переверзевым и др. [6] по химическому составу почв на участке, расположенном в 12 км к югу от г. Мончегорска: содержание валового Ni на глубине 0–5 см – 2632 мг/кг, на глубине 5–14 см – 490 мг/кг, на глубине 17–20 см – 90 мг/кг, коэффициент перехода A_0/B в этом случае увеличился до 29,2.

Антропогенное загрязнение почв сопровождалось резким увеличением доли подвижных форм ТМ в почвах (%) [4, 5]:

	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Водосбор 2 (1994 г.)	75	13	24	3	22	13	25	30
Водосбор 6 (1999 г.)	70	7	19	3	10	9	32	23
Водосбор 4 (1994 г.)	79	27	14	2	41	17	33	42

По данным В. В. Никонова [12], к 1990-м годам в Al-Fe-гумусовых подзолистых почвах сосновых лесов на пробных площадях, заложенных вдоль юго-западного градиента от комбината «Североникель», при приближении к источнику концентрация подвижного Ni доходила до 850 мг/кг, превышая фоновые значения в 170 раз. Доля подвижных форм составляла в ряде случаев 32% от их валового содержания. Вместе с тем гибель лишайников, смыл органогенного слоя и образование техногенной «пустоши» характеризовались резким уменьшением аккумуляции ТМ в верхних генетических горизонтах. Так, например, к середине 1990-х годов в почвах под сосновыми лесами концентрация подвижных форм Ni достигла на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) 24–348–83 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 3–17–11 мг/кг, в горизонте B – 3–7–10 мг/кг. В еловых лесах на расстоянии 20–7 км в горизонте A_0A_1 (O) она составила 461–703 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 17–55 мг/кг, в горизонте B – 17–35 мг/кг [14]. В то же время содержание доступных для растений соединений Ni в минеральных горизонтах почв ПТК с погибающим древостоем не превышало 10 мг/кг, а доля подвижных соединений в горизонте Bhfa, вблизи источника загрязнения, – 5–8% [12]. Об уменьшении концентрации подвижных форм Ni в почвах с глубиной на расстоянии 12 км к югу от комбината также свидетельствуют материалы В. Н. Переверзева [6]: на глубине 0–5 см она составляла 230 мг/кг, на глубине 5–14 см – 138 мг/кг, на глубине 17–20 см – 0,6 мг/кг. Количество подвижных форм от валового содержания на глубине 0–5 см – 9%, на глубине 14–17 см – 28%.

Проведенные в 2001 г. исследования показали, что в большинстве изученных почв сохраняется высокое содержание подвижных форм Ni, превышающее предельно допустимую

концентрацию (ПДК): максимальные концентрации наблюдаются в горизонте A_0A_1 в почвах на водосборе 6, расположенном в 10–12 км к югу от комбината, и достигают 316 мг/кг (79 ПДК) (см. табл. 2). Абсолютные значения валового содержания ТМ в целом близки к опубликованным данным [6, 7].

В иллювиальном горизонте почв самые большие превышения значений ПДК выявлены на расстоянии 6 км от комбината: в северном направлении – в 3 раза, в южном – в 27 раз. Уменьшение средних и максимальных концентраций подвижного Ni наблюдается начиная с расстояния 6–7 км на север и на юг от комбината (см. табл. 4; рис. 1). Средние значения содержания этого металла в иллювиальных горизонтах почв на данных территориях превышают ПДК в 2 и 5 раз соответственно. На расстоянии 21–23 км в южном направлении лишь максимальное содержание подвижного Ni в почвах (5,8 мг/кг) превышает ПДК в 1,5 раза. В почвах на вершинах сопок, прилегающих с юго-востока к городу, среднее содержание подвижного Ni достигает ПДК.

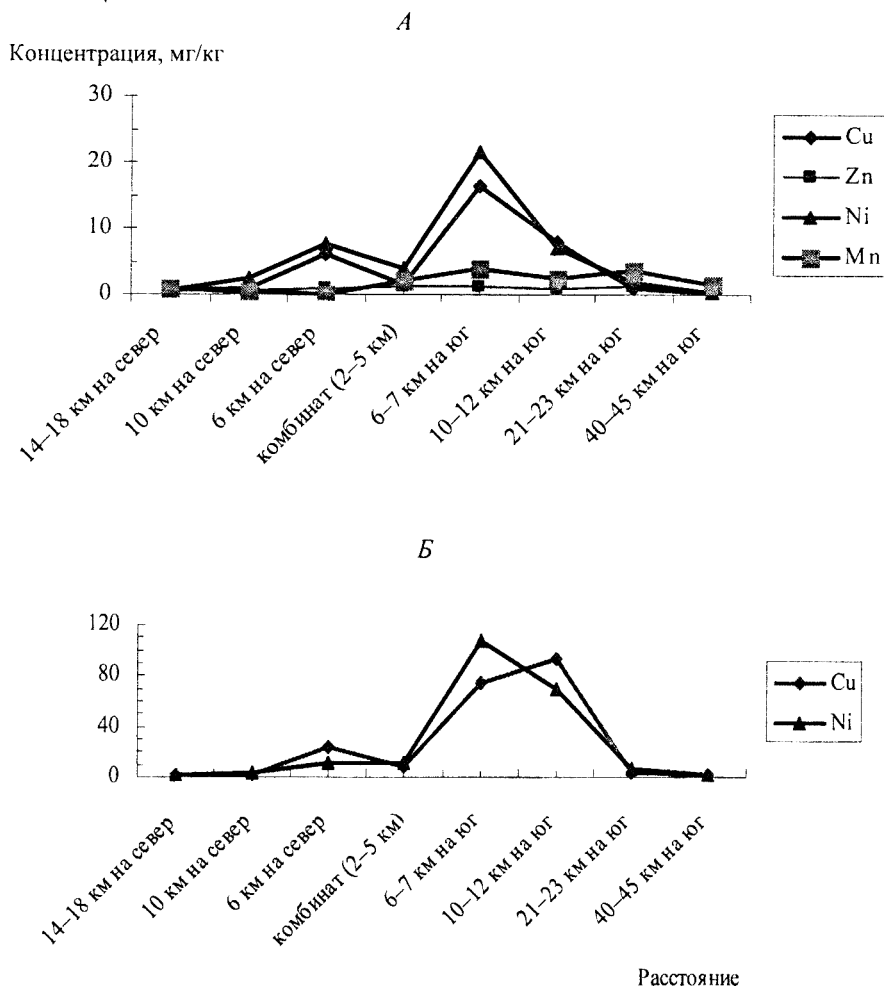


Рис. 1. Изменение средних (А) и максимальных (Б) концентраций подвижных форм ТМ в иллювиальном горизонте почв в зависимости от расстояния до комбината «Североникель».

Таким образом, установлено, что максимальные содержания подвижных форм Ni в подстилке несколько ниже данных, полученных в 1990-х годах, в том числе в рамках международного проекта «Kola Ecogeochemistry» и Н. В. Лукиной и др. [14]. В то же время в иллювиальных горизонтах почв они превышают показатели, полученные 10–15 лет назад, в частности В. В. Никоновым [12], Н. В. Лукиной [14] и В. Н. Переверзевым [6]. На основании сравнительного анализа содержаний Ni в различных генетических горизонтах, а также их динамики во времени за последние 10–15 лет можно сделать вывод об уменьшении его абсолютных концентраций в верхнем генетическом горизонте, выносе в более глубокие слои и увеличении в иллювиальном горизонте. В целом можно сказать, что в результате разрушения и смыва верхних органогенных горизонтов почв происходит перемещение ТМ вглубь почвенного профиля.

Фоновые содержания *меди* в почвах Мурманского Заполярья, по оценкам разных авторов, существенно различаются. Многолетние исследования по программе изучения Баренц-региона [8] свидетельствуют, что валовое содержание Cu в органогенном горизонте почв составляет по Кольскому полуострову 12,8 мг/кг (2,59–1950 мг/кг). По данным Л. В. Алещукина [9–11], в органогенных горизонтах оно не превышает 60–100 мг/кг. Содержание подвижных форм Cu в почвах условно фоновых районов (приблизительно 60–110 км юго-западнее источника), по данным В. В. Никонова [12], достигает 2 мг/кг, при этом доля доступной для растений Cu составляет в среднем 1–2 % от валового количества. По нашим данным, на условно фоновой территории в районе Чуна-озеро средняя концентрация подвижных форм Cu выше ПДК и равна 4 мг/кг (см. табл. 2). В зависимости от типа почв и положения ПТК в пределах мезорельефа она изменяется в пределах 2–6 мг/кг.

В районе воздействия комбината «Североникель» отмечается значительное загрязнение почв Cu. Уже в 1980-х годах, согласно Г. М. Кашулиной [13], в зоне сильного разрушения экосистем среднее содержание валовой Cu в подстилке ельников составило 1323 мг/кг. К началу 1990-х годов, по данным В. В. Никонова [12], вдоль юго-западного градиента от комбината «Североникель» по мере приближения к источнику загрязнения в горизонте A_0 оно увеличивалось от 30–60 до 1500 мг/кг. В 1994 г. в почвах ПТК водосбора 2 были отмечены концентрации Cu до 8130 мг/кг, превышающие фоновые значения в сотни раз (см. табл. 1). Аэротехногенное загрязнение привело прежде всего к существенному загрязнению почвенной подстилки. Так, например, по В. Н. Переверзеву [6], содержание валовой Cu на пробной площади в 12 км южнее г. Мончегорска на глубине 0–5 см достигло 1683 мг/кг, на глубине 5–14 см – 105 мг/кг, на глубине 17–20 см – 62 мг/кг. По данным В. В. Никонова [7], в подзолах Кольского полуострова по Мончегорскому градиенту оно составило на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) 65–1050–975 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 27–50–95 мг/кг, в горизонте B – 29–59–75 мг/кг.

Техногенное воздействие привело к значительному увеличению подвижности соединений Cu. Так, в 1990-х годах большая часть Cu аккумулировалась в органогенном горизонте [6]. При этом содержание подвижных форм Cu в почвах на глубине 0–5 см достигало 518 мг/кг (173 ПДК), на глубине 5–20 см – 6–7 мг/кг (2 ПДК). Количество подвижной Cu от валового содержания составляло до 31%.

Исследования показали, что концентрация подвижных форм Cu в почвах существенно зависит от состояния и видового состава растительного покрова. В еловых лесах Cu более подвижна, чем в сосновых. В 1990-х годах, как указывает Н. В. Лукина [14], в почвах сосновых лесов содержание подвижных форм Cu на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) составляло 9–301–280 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 1–17–47 мг/кг, в горизонте B – 1–12–11 мг/кг. В еловых лесах ее максимум наблюдался на расстоянии 20 км от источника загрязнения и достигал в горизонте A_0A_1 (O) 1226 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 36 мг/кг, в горизонте B – 25 мг/кг. На пробной площади с погибшим древостоем доля подвижных форм Cu

могла составлять до 70% от валового содержания [12]. В то же время количество доступной для растений Cu в минеральных горизонтах почв экосистем с погибающим древостоем было невелико и не превышало 2–3 мг/кг. На долю подвижных соединений Cu в горизонте B_{hfa} приходилось 5–8% от ее валового содержания.

По результатам исследований в 2001–2002 гг. максимальная концентрация подвижных форм Cu в почвах зафиксирована на расстоянии 6 км от источника загрязнения (рис. 1, А, табл. 2, 4). Об аэротехногенном загрязнении говорит характер распределения подвижных форм Cu в почвенном профиле. Они накапливаются в органогенном горизонте, где их среднее содержание в среднем составляет 67 мг/кг, а максимальное достигает 506 мг/кг (см. табл. 2). Значение ПДК Cu в иллювиальных горизонтах почв максимально превышено на участках, расположенных от комбината на расстоянии до 6 км на север и до 10–12 км на юг (табл. 4): соответственно в 8 (23,6 мг/кг) и в 30 раз (93 мг/кг) (рис. 1, Б).

Сравнительный анализ полученных результатов с литературными данными, характеризующими уровень загрязнения почв района в 1990-х годах, свидетельствует о том, что за истекшие 10 лет также произошло перераспределение Cu по генетическим горизонтам почвенного профиля. Содержание подвижных форм Cu в иллювиальных горизонтах почв стало значительно выше, а в подстилке – ниже.

Почвы изученного района обогащены *кобальтом*, типоморфным элементом медно-никелевых руд. Фоновое валовое содержание его в органогенном горизонте почв составляет по Кольскому полуострову 2,27 мг/кг (0,23–73,6 мг/кг), концентрация подвижного Co – 0,25 мг/кг (0,25–21,4 мг/кг) [8].

В зоне аэротехногенного загрязнения в 1980-х годах, по данным Г. М. Кашулиной [13], среднее содержание валового Co в подстилке ельников достигало 65 мг/кг. В 1990-х годах в подзолах Кольского полуострова по Мончегорскому градиенту на расстоянии 48–8 км оно составило в горизонте A_0A_1 (O) 6–120 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 3–31 мг/кг, в горизонте B – 6–32 мг/кг [7].

По полученным в 2001–2002 гг. данным количество подвижных форм Co в подстилке выше, чем в иллювиальных горизонтах (см. табл. 2, 4). Средняя концентрация его в поверхностном горизонте – 6,6 мг/кг, при этом разброс значений довольно высок – в почвах некоторых ПТК зафиксировано четырехкратное превышение ПДК. Максимальные концентрации Co (до 21 мг/кг) обнаружены в органогенных горизонтах почв на водосборе 4. Наряду с этим можно отметить относительно низкое количество подвижных форм Co в иллювиальном горизонте, которое снижается при удалении от комбината (см. табл. 4). Максимальное содержание подвижного Co в иллювиальном горизонте (2,9 мг/кг) наблюдается в 6 км к югу от источника загрязнения.

Почвы изученных территорий характеризуются повышенным содержанием *цинка* (см. табл. 1–4). Как показывает анализ пространственного его распределения, это также обусловлено аэротехногенным загрязнением. По данным В. В. Никонова и др. [7], средняя концентрация валового Zn в подзолах Кольского полуострова по Мончегорскому градиенту в начале 1990-х годов составила на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) 75–90–70 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 22–71–70 мг/кг, в горизонте B – 39–86–79 мг/кг.

Подвижность Zn в почвах таежно-лесной зоны достаточно высока (см. табл. 2, 4). В большинстве почвенных разрезов распределение Zn носит элювиально-иллювиальный характер, что хорошо согласуется с литературными материалами. По данным Н. В. Лукиной [14], в 1990-х годах концентрация подвижных форм Zn в почвах сосновых лесов достигала на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) 22–17–3 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 1 мг/кг, в горизонте B – 0,6–1,7–1 мг/кг. За последние 10–15 лет произошло уменьшение содержания подвижных форм Zn в почвах изученных водосборов. Проведенный в 2001 г. анализ показал, что большая часть Zn аккумулируется в горизонте A_0 , где его среднее содержание

составляет 14 мг/кг, причем максимальное значение превышает ПДК в 1,5 раза. Вместе с тем обращает на себя внимание значительное снижение уровня максимальных концентраций за истекший 15-летний период. В начале 1990-х годов в почвах водосборов 2 и 4 они превышали ПДК в 4–5 раз (см. табл. 4).

Валовое содержание *свинца* в органогенном горизонте почв Кольского полуострова составляет в среднем 15,4 мг/кг, изменяясь в широких пределах от 3,09 до 101 мг/кг [8]. В исследованных почвах количество его подвижных форм увеличивается в горизонте A_0A_1 (O) и на 2001 г. равно в среднем 4,9 мг/кг, а максимальное достигает 12 мг/кг (2 ПДК) (см. табл. 2). Средние содержания Pb в органогенных горизонтах почв на водосборах вблизи города в несколько раз выше, чем на условно фоновом участке. Максимальное количество подвижного Pb в иллювиальном горизонте (4,7 мг/кг) отмечено на расстоянии 10–12 км южнее источника загрязнения (см. табл. 4).

Концентрация *железа* в исследованных почвах меняется в широких пределах (см. табл. 1–4). Валовое содержание его в органогенном горизонте почв по Кольскому полуострову составляет 2550 мг/кг (329–99200 мг/кг), а подвижных форм – 10 мг/кг (10–4640 мг/кг) [8]. По данным В. В. Никонова [7], в подзолах Кольского полуострова по Мончегорскому градиенту средняя концентрация валового Fe составила на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A_0A_1 (O) 12–55–71 г/кг, в горизонте A_2 (E) – 36–94–84 г/кг, в горизонте B – 42–110–86 г/кг.

На участках, удаленных от комбината (водосбор 4 и условно фоновый участок), максимальные концентрации подвижного Fe (329 и 364 мг/кг) отмечаются в иллювиальных горизонтах (рис. 2, 3; табл. 2 и 4). В почвенных разрезах, расположенных на наиболее загрязненных участках (водосбор 2 и 6), большая часть подвижных форм Fe концентрируется в верхнем горизонте и значительно понижается с глубиной. Полученная концентрация подвижных форм Fe в почвах в зоне воздействия комбината «Североникель» ниже показателей, приводимых Н. В. Лукиной [14]. В начале 1990-х годов в почвах сосновых лесов в горизонте A_0A_1 (O) она составляла на расстоянии 48–10–8 км соответственно 19–353–567 мг/кг, в горизонте A_2 (E) – 74–170–201 мг/кг, в горизонте B – 131–189–120 мг/кг.

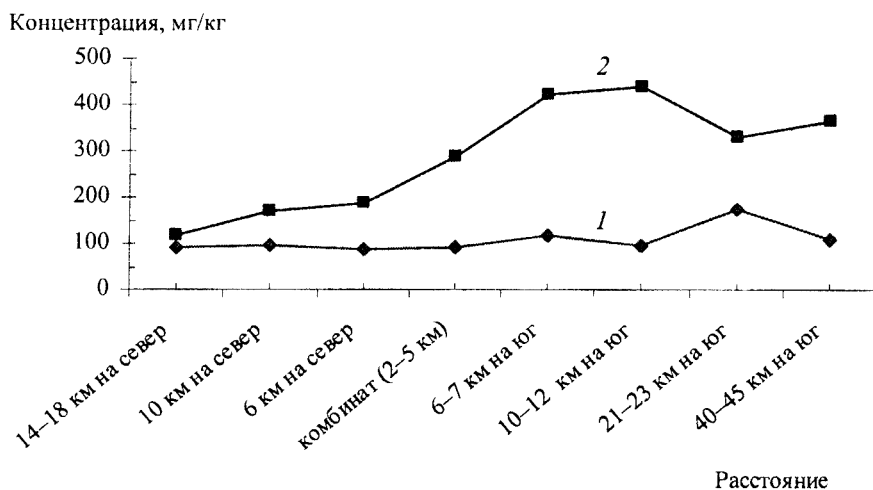


Рис. 2. Изменение средних (1) и максимальных (2) концентраций подвижных форм Fe в иллювиальном горизонте почв в зависимости от расстояния до комбината «Североникель».

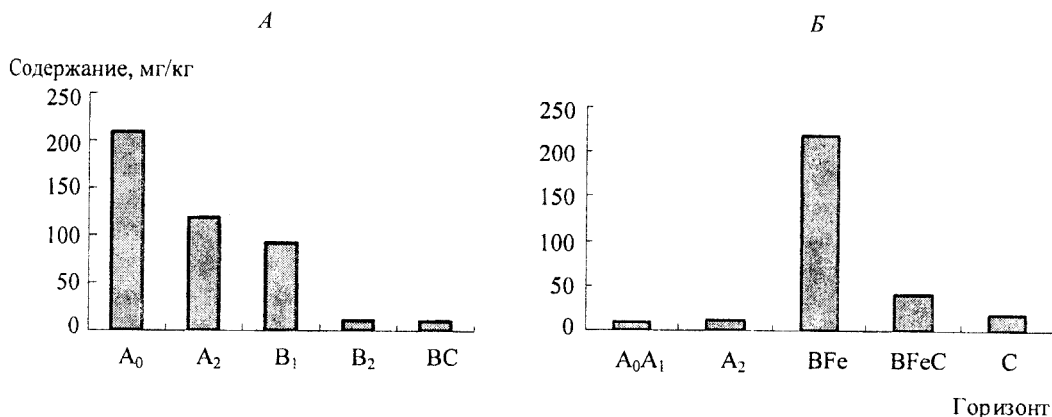


Рис. 3. Содержание подвижных форм Fe в генетических горизонтах почв.
 А – водосбор 2; Б – фоновый участок.

В почвах ельника, расположенного на расстоянии 7 км от комбината, содержание его было несколько ниже в поверхностных горизонтах (165 и 188 мг/кг соответственно), но значительно выше в иллювиальном (707 мг/кг), что обусловлено более кислой почвенной средой. Это подтверждается наличием отрицательной связи между содержанием подвижных форм Fe и кислотностью почв.

Валовое содержание *марганца* в органогенном горизонте почв фоновых ПТК составляет по Кольскому полуострову 96,4 мг/кг, его подвижных форм – 58,4 мг/кг. Диапазон варьирования в зависимости от местоположения и типа почв чрезвычайно велик, валовые и подвижные концентрации его изменяются соответственно в пределах 8,3–3600 и 3,5–1750 мг/кг [8].

В зоне техногенного загрязнения по Мончегорскому градиенту, по данным В. В. Никонова [7], содержание валового Mn в подзолах увеличивается в 3–5 раз. Так, например, на расстоянии 48–10–8 км в горизонте A₀A₁ (O) оно составляло соответственно 266–480–854 мг/кг, в горизонте A₂ (E) – 249–1008–1032 мг/кг, в горизонте B – 330–978–1094 мг/кг.

В 2001 г. среднее содержание подвижных форм Mn достигает максимума в органогенных горизонтах почв аккумулятивных ландшафтов водосбора 4. Средняя концентрация его в лесной подстилке – 77 мг/кг (см. табл. 2), а максимальная – 297 мг/кг, превышая ПДК соответственно в 1,5–5 раз. В иллювиальных горизонтах почв содержится до 19 мг/кг подвижных форм Mn (см. табл. 4). При этом миграционная способность Mn в почвах под сосняками и ельниками существенно различается. Так, например, в сосновых лесах концентрация подвижных форм Mn в горизонте A₀A₁ (O) на расстоянии 48–10–8 км составила соответственно 95–77–8 мг/кг, в горизонте A₂ (E) – 9–12–23 мг/кг, в горизонте B – 5,2–46–20 мг/кг. В еловых лесах на расстоянии 20 км от комбината эти показатели в горизонтах A₀A₁ (O) – A₂ (E) – B достигают соответственно 404–24–93 мг/кг [14].

Валовое содержание *кадмия* в органогенном горизонте почв Кольского полуострова – 0,33 мг/кг (0,04–1,35 мг/кг) [8]. По результатам проведенных исследований в зоне техногенного воздействия значимые концентрации подвижных форм Cd обнаружены только в пробах лесной подстилки (см. табл. 2).

Содержание *серы* в почвах варьирует в больших пределах в зависимости от типа почв, генетического горизонта и уровня антропогенного загрязнения. Валовое содержание S

в органогенном горизонте почв составляет по Кольскому полуострову 1370 мг/кг (149–2930 мг/кг), количество подвижной серы – 111 мг/кг (34–311 мг/кг) [8].

По данным Н. В. Лукиной [14], на начало 1990-х годов валовое содержание S в почвах на расстоянии 48 км от источника загрязнения достигало 630 мг/кг с максимумом в иллювиальном горизонте. На расстоянии 8 км максимум ее содержания обнаруживался в поверхностном горизонте и составлял 1050 мг/кг. Концентрация доступной S в лесной подстилке сосняков на расстоянии 10 км не превышала 134 мг/кг, а в горизонте В – 56 мг/кг. В ельниках она была выше – 178 мг/кг в горизонте A_0A_1 (O) и 130 мг/кг в горизонте В.

Структура корреляционных связей содержания подвижных форм ТМ в почвах типоморфна химическому составу рудоносной формации. На всех участках обнаружена тесная связь концентрации подвижных форм Ni и Co. На северных участках и в городских почвах наблюдается также достоверная связь Cu с Ni и Co. В корреляционной структуре химического состава почв в районе г. Ньюдоайвенч и телевизионной вершины тесная связь выявлена между Zn и Cu, Mn и Ni. Содержание подвижных форм Fe, Pb и Cd в почвах не коррелирует ни с одним из элементов. Необходимо отметить, что в районах с высокой антропогенной нагрузкой связи между элементами более тесные, чем на условно фоновых территориях. Достоверная положительная связь обнаружена между концентрацией S и потенциальной кислотностью подстилки.

Анализ изменения содержания подвижных форм ТМ по генетическим горизонтам почвенного профиля свидетельствует о том, что на условно фоновой территории оно почти для всех изученных химических элементов, за исключением Fe, выше в подстилке, чем в иллювиальных горизонтах почв. На участках, удаленных от источника загрязнения, количество подвижных форм в горизонтах А и В выравнивается (коэффициент перехода A_0/V изменяется от 2,6 до 63,5), причем подвижность ТМ в горизонте A_2 по сравнению с этими горизонтами резко снижается. На участках, недавно пострадавших от пожара, увеличивается концентрация подвижных форм ТМ в горизонте В (отношение A_0/V – 2,6). Однако на загрязненных участках большое количество подвижных форм ТМ не только задерживается в органогенном горизонте, но и мигрирует в иллювиальный. Коэффициенты перехода ТМ по почвенному профилю показывают, что Cu и Ni в ПТК, расположенных вблизи источника загрязнения, наиболее подвижны в верхних горизонтах A_0A_1 и A_2 (отношение A_0/V меняется от 37,6 до 359). Необходимо отметить, что Zn более равномерно распределен по профилю, чем Cu и Ni, а подвижные формы Co сосредоточены главным образом в горизонтах A_0A_1 и A_2 .

Таким образом, анализ распределения подвижных форм ТМ в почвах в зоне воздействия комбината «Североникель» и сравнение полученных материалов с литературными данными позволяет сделать следующие выводы.

1. Изученные почвы характеризуются значительным содержанием Cu, Ni и Co – элементов, типоморфных для медно-никелевой минерализации. В почвах ПТК, расположенных в южном направлении от Мончегорска, концентрации ТМ выше, чем в почвах ПТК северного направления, что обусловлено аэротехногенным загрязнением в соответствии с розой ветров. Максимальные концентрации большинства ТМ наблюдаются на расстоянии 6–7 и 10–12 км.

2. В лесной подстилке высока подвижность Cu, Ni, Zn, Co и Pb. Кислая реакция среды и легкий механический состав изученных почв приводят к выщелачиванию ТМ из верхних генетических горизонтов почвенного профиля и аккумуляции их в иллювиальном горизонте. Количество подвижных форм большинства ТМ уменьшается при удалении от комбината. Средние по рассмотренным участкам содержания Co, Cu, Ni и в меньшей степени Zn в иллювиальных горизонтах достигают максимума на расстоянии 6 км и далее снижаются

при удалении от источника загрязнения. При удалении от источника выбросов процент подвижных форм от валового содержания меняется.

3. В настоящее время большинство изученных почв характеризуется высокой токсичностью: превышения ПДК в органогенном горизонте почв наблюдаются по Cu (в 30–50 и до 160 раз), Ni (в 30–75 раз), Mn (в 3 раза), Pb и Co (в 2–4 раза).

4. За истекшие 15 лет, сопровождающиеся значительным снижением выбросов ТМ в атмосферный воздух, существенного уменьшения концентрации ТМ в изученных почвах не отмечено. Однако в условиях гумидного климата произошло заметное перераспределение их в пределах почвенного профиля: в органогенных горизонтах их содержание снизилось, а в иллювиальных увеличилось.

5. Вместе с тем уменьшение выбросов диоксида серы привело к резкому понижению в почвах концентрации серы и ее соединений – в органогенных и иллювиальных горизонтах они незначительно превышают фоновые показатели.

Summary

Opekunova M. G., Elskova E. Yu., Chekushin V. A., Tomilina O. V., Salminen R., Reimann C. Environmental condition monitoring in the districts of industrial complex "Severonikel". II. Migration and accumulation of chemical elements in soils.

The complex of ecological-biogeochemical investigations is conducted in the districts of industrial complex "Severonikel" (Kola Peninsula). In the second article the peculiarity of chemical composition of soils from several catchments near the industrial complex are determined and their pollutions and changing under antropogenic stress are considered. The contents of general and mobile forms S, Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Cd, and Pb in soils are determined. The estimation of heavy metal pollution degree is made. The comparative analysis of changes of soils chemical composition in the last years in natural and destroyed territories is conducted.

Литература

1. Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Сенькин О. В. и др. Мониторинг состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель» с применением методов биоиндикации // Материалы II Всерос. науч.-практ. конференции «Проблемы экологии и охраны природы. Пути их решения». Ульяновск, 2004.
2. Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Сенькин О. В. и др. Воздействие комбината «Североникель» (г. Мончегорск) на экологическое состояние почв и растительного покрова // Материалы регион. общ.-науч. конференции «Северо-Западная Россия: проблемы экологии и социально-экономического развития». Псков, 2004.
3. Kashulina G., Gregorauskiene V. Complete soil profiles – technical report from the catchment stage of Barents ecogeochemistry project // Geol. Survey of Finland. Rep. N S/41/0000/11/2000. Espoo, 2000.
4. Chekushin V., Tomilina O., Glavatskih S. Distribution of elements in the organic layer from the catchment stage of the Barents ecogeochemistry project // Geol. Survey of Finland. Rep. N S/41/0000/3/2000. Espoo, 2000.
5. Reimann C., Chekushin V. A., Ayras M. Kola project-international report, catchment study. Rep. N GU № 96088. Trondheim, 1994.
6. 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.
7. Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С. и др. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М., 2004.
8. Salminen R., Chekushin V., Tenhola M. et al. Geochemical atlas of eastern Barents region. Amsterdam, 2004.
9. Алещуккин Л. В. Геохимия меди и никеля в основных типах почв Мурманского заполярья: Автореф. канд. дис. М., 1964.
10. Алещуккин Л. В. Геохимия меди, никеля и железа в почвах Мурманского заполярья // Материалы геохимии ландшафтов Кольского полуострова / Под ред. В. В. Добровольского. М., 1972.
11. Добровольский В. В., Алещуккин Л. В. Некоторые ландшафтно-геохимические особенности северной тайги Кольского полуострова // Почвоведение. 1964. № 10.
12. Никонов В. В., Лукина Н. В., Дером Д. и др. Миграция и аккумуляция соединений никеля и меди в Al-Fe-гумусовых подзолистых почвах сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 1993. № 11.
13. Кашулина Г. М. Содержание и запасы тяжелых металлов в подстилке ельников, подверженных техногенному воздействию // Антропогенное воздействие на экосистемы Кольского Севера / Под ред. В. В. Крючкова. Апатиты, 1988.
14. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах севера в условиях аэротехногенного загрязнения: В 2 ч. Апатиты, 1996.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2006 г.