

УДК 550.46(470.21) : 502.65

## Особенности формирования состава инфильтрационных вод в условиях аэротехногенного загрязнения

З.А. Евтюгина<sup>1,2</sup>, В.Э. Асминг<sup>1</sup><sup>1</sup> Кольский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН)<sup>2</sup> Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии

**Аннотация.** Показано, что состав почвенных вод, формирующихся в техногенно трансформированных ландшафтах, отражает особенности состава водотоков, дренирующих лесопокрытые территории. Почвы могут быть дополнительным источником сульфат-иона в водах. Состав почвенных вод лесных биогеоценозов на территории локального воздействия выбросов комбината "Североникель" позволяет предварительно оценивать защищенность подземных вод от проникновения "аэротехногенных" меди и никеля.

**Abstract.** It has been shown that composition of soil water formed within technologically transformed ecosystems reflects features of streams draining the wooded area. Soil can serve as an additional source of sulfate ions in water. Forest ecosystems soil water composition in the territory of the local impact of emissions from "Severonickel" complex allows to pre-estimate groundwater protection against the penetration of "airtechnogenic" copper and nickel.

**Ключевые слова:** почвенные воды, родник, водоток, разрушенные леса, загрязнение воздуха  
**Key words:** soil water, spring, stream, destroyed forests, air pollution

### 1. Введение

Техногенный фактор неизбежно приводит к изменению качества всех категорий природных вод на территориях водосборов. Подзолистые Al-Fe-гумусовые почвы Кольского Севера являются биогеохимическим барьером для меди и никеля, поступающих в экосистемы из техногенно загрязненной атмосферы. Разрушение экосистем, деградация почв приводят к снижению сорбционной способности последних, особенно по отношению к никелю. Предполагалось, что это создает угрозу загрязнения поверхностных и подземных вод тяжелыми металлами (Евтюгина, Никонов, 1990).

Однако результаты поисковых работ, проводившихся в 2008-2010 гг. Центрально-Кольской экспедицией (ОАО "ЦКЭ") на территории локального воздействия выбросов комбината "Североникель", показали, что подземные воды защищены от проникновения "аэротехногенных" меди и никеля (Ананьев и др., 2011). Учитывая результаты собственных наблюдений и новые данные о составе поверхностных и подземных (родниковых) вод, мы попытались показать тенденции изменений содержаний основных компонентов выбросов – меди, никеля, серы при их миграции в составе атмосферных, почвенных, поверхностных и подземных (родниковых) вод.

### 2. Сравнительный анализ состава природных вод техногенно трансформированных ельников

По данным обследования 1996 г. (Экологический..., 1999) на территории локального воздействия выбросов комбината "Североникель" (г. Мончегорск) растительность существенно повреждена (рис. 1). В последние годы комбинат снизил выбросы сернистого газа, меди и никеля (табл. 1).

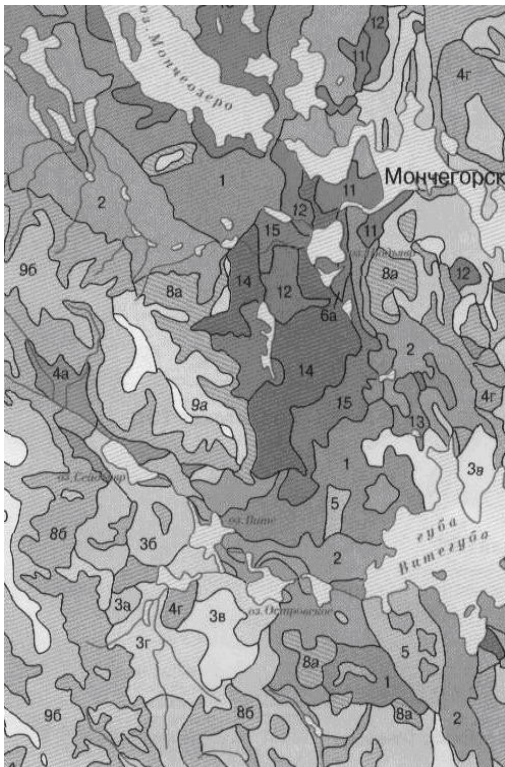
Таблица 1. Выбросы комбината "Североникель": SO<sub>2</sub>, тыс. т/год, Ni, Cu, т/год

	*1987 г.	**1990 г.	1994 г.	1995 г.	1999 г.	2001 г.	2007 г.	2009 г.
SO <sub>2</sub>	207.2	232.5	97.6	129.3	45.8	43.5	35.9	33.5
Ni	683.3	2712.0	1619.0	1366.0	1127.5	1257.8	546.1	387.0
Cu	1543.9	1813.0	933.6	725.9	856.3	829.2	622.4	439.3

\* – данные Государственной инспекции по охране атмосферного воздуха при Государственном комитете СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Мурманская региональная государственная инспекция по охране атмосферного воздуха;

\*\* – Мониторинг окружающей..., 2009.

Улучшилось состояние наземных экосистем. Тем не менее, вокруг комбината по-прежнему существуют техногенные редколесья, а также участки, где лес полностью разрушился – пустоши техногенные.



**Леса.** Сильно поврежденные: 1 – еловый и сосновый сухостой, поросль берез; почвы обнажены до минеральных горизонтов. Существенно поврежденные (доля погибших и отмирающих деревьев – 60-80 %): 2 – елово-березовые редколесья, мохово-лишайниковый и травяно-кустарничковый ярусы разрушены. Частично поврежденные (доля погибших и поврежденных деревьев 40-60 %): 3а – еловые; 3б – березово-еловые с участками сосновых; 3в – березово-еловые; 3г – елово-березовые. Слабо поврежденные (доля поврежденных деревьев менее 40 %): 4а – еловые; 4б – березово-еловые с участками сосновых; 4в – березово-еловые; 4г – елово-березовые. 5 – гари.

**Болота** низинные кустарничково-моховые и осоково-пушищевые: 6а – поврежденные промышленными выбросами; 6б – не поврежденные.

**Горные тундры:** 8а – каменистые кустарничково-лишайниковые поврежденные; 8б – не поврежденные.

**Сочетание горных каменистых кустарничково-лишайниковых тундр с арктическими пустынями:** 9а – поврежденные; 9б – не поврежденные.

**Жилая застройка** – 11.

**Промзоны, карьеры, хвостохранилища** – 12.

**Техногенные пустоши:** 14 – полностью лишенные растительного покрова; 15 – почти полностью лишенные растительного покрова

Рис. 1. Повреждение растительности (по состоянию на 1996 г.) в зоне локального воздействия комбината "Североникель" (Экологический атлас..., 1999)

**Техногенное редколесье.** В период максимальных техногенных нагрузок в 7 км в юго-западном направлении от источника пылегазовых выбросов в техногенном еловом редколесье (рис. 1, индекс 2, "существенно поврежденные леса") проводили опробование различных категорий природных вод: атмосферных, лизиметрических и ручьевых. Лизиметры были установлены в Al-Fe-гумусовой подзолистой почве и в пустоши техногенной – мертвой почве, на которой напочвенный покров разрушился (погиб). Почвенные воды из почвенного профиля ненарушенного сложения отбирались на уровне переходной зоны иллювиального горизонта и почвообразующей породы. Конструкция лизиметра описана в работе (Евтюгина, 1994).

Выявлено, что атмосферные осадки, отобранные на открытых участках техногенного редколесья, по преобладающим анионам и катионам, являются сульфатно-кальциево-натриевыми ( $SO_4-Ca-Na$ ), причем доля сульфат-иона от суммы анионов превышает 70 %-экв, pH 4.44 (табл. 2). Инфильтрационные воды, поступающие из подзолистой почвы – слабокислые (pH 5.08-5.95),  $SO_4-Ca$  (доля  $SO_4$  – более 80 %-экв). Концентрация сульфат-иона зависит от количества просачивающейся воды (мм): достоверный коэффициент корреляции  $R = 0.833$ . Почва задерживает медь и никель, поступающие с атмосферными осадками: содержание Cu – 4; Ni – 16 мкг/л, что составляет < 1 % и 6 % соответственно от концентраций в атмосферных водах.

Почва с разрушенным напочвенным покровом (пустошь) утрачивает буферную способность по отношению к кислотным осадкам. Кроме того, из профиля пустоши техногенной при pH лизиметрических вод от 3.66 до 4.84 никель вымывается: концентрация более чем в 300 раз превысила содержание в атмосферных осадках. Концентрация меди – в 5 раз меньше, т.е. даже разрушенная почва продолжает задерживать медь. Для почвенных вод техногенного елового редколесья, в целом, выявлена прямая (с вероятностью более 95 %) зависимость между концентрациями иона  $H^+$ , вычисленными из pH, и Ni ( $r = 0.857$ ,  $n = 12$ ).

Относительное превышение содержания нитрат-иона в почвенных водах пустоши (табл. 2), по сравнению с ручьевыми и лизиметрическими водами собственно почвы (вороничная парцелла) может быть связано с разрушением растительности и, соответственно, прекращением потребления азота на создание биомассы.

Таблица 2. Статистические параметры компонентов химического состава (мг/л; Cu, Ni – мкг/л) и pH природных: атмосферные; лизиметрические – ЛВ; поверхностные

Параметр	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cu	Ni
Атмосферные выпадения, 7 км*, ЮЮЗ* (1987-1990 гг.)												
Минимум	4.10	4.20	0.70	–	0.006	0.00	0.08	0.03	0.15	0.01	311	132
Максимум	4.72	8.10	2.30	–	0.780	2.50	0.88	0.22	0.51	0.33	1604	713
Медиана	4.44	5.87	1.40	–	0.321	0.20	0.39	0.11	0.32	0.07	540	262
ЛВ подзолистой почвы, (n = 7)												
Минимум	5.08	15.20	1.42	<0.01	0.07	0.01	3.82	1.11	1.08	0.17	1.5	5
Максимум	5.95	26.50	4.20	0.50	0.60	1.38	5.72	1.66	2.11	2.24	12	124
Среднее	5.33	18.84	2.61	0.15	0.24	0.30	4.88	1.36	1.65	0.98	4.3	42.7
Медиана	5.25	18.40	2.48	0.01	0.24	0.09	4.97	1.27	1.59	1.07	4	16
ЛВ пустоши техногенной, (n = 8)												
Минимум	3.66	13.76	2.10	–	0.24	0.03	2.86	0.63	0.86	0.43	34.7	708
Максимум	4.84	32.40	3.78	–	4.25	1.86	7.65	1.88	4.39	4.48	394	1186
Среднее	4.55	19.38	2.74	–	2.30	0.69	5.04	1.10	1.71	1.89	141	871
Медиана	4.68	18.95	2.64	–	2.83	0.31	4.93	1.07	1.23	1.58	103	846
Ручей, (n = 16)												
Минимум	6.23	9.10	1.05	2.77	0.08	0.01	2.38	0.60	1.30	0.16	5	32
Максимум	6.91	19.50	3.85	12.20	3.39	1.56	7.37	1.46	3.41	0.60	37	86
Среднее	6.64	15.15	2.12	5.37	0.58	0.22	4.87	1.05	1.89	0.28	14	55
Медиана	6.65	15.10	2.13	4.60	0.33	0.14	5.09	1.09	1.77	0.23	12	54

\* – расстояние и направление от промплощадки комбината "Североникель".

Ручей, точнее, микроручей (ширина 40-50 см) дренирует техногенно трансформированный ландшафт, на котором находится участок исследований. Воды ручья по величине pH (6.23-6.91) близки к нейтральным водам, SO<sub>4</sub>-Ca. Примечательно, что абсолютные (табл. 2) и относительные концентрации катионов в ручье и в лизиметрических водах подзолистой почвы почти совпадают (Ca59Mg21Na17NH<sub>4</sub>2K1 и Ca55Mg23Na15K6NH<sub>4</sub>1). Иными словами, ручей представляет собой сток, в основном, почвенных вод. Возможно, это связано с особенностями распределения влаги в подзолистых почвах. Почвенные горизонты, как правило, имеют различную водопроницаемость: горизонт вымывания (иллювиальный) менее проницаем – иногда служит относительным водоупором, задерживающим влагу (Роде, Смирнов, 1972). При наличии уклона эта вода может стекать, фильтруясь через вышележащие почвенные горизонты. Более того, почвообразующими породами Al-Fe-гумусовых подзолистых почв в техногенном еловом редколесье являются слабоводопроницаемые ледниковые отложения (мелкозернистые пески, супеси, суглинки с гравием, галькой и валунами). Это является дополнительным фактором того, что латеральный сток почвенных вод формирует воды ручья.

Допустим, что воды ручья сформированы почвенными (инфильтрационными) водами (рис. 2). Нам известны (табл. 2) содержания меди и никеля в ручье и в водах, которые отбирались из-под подзолистой почвы и пустоши техногенной. Вычислим, сколько воды поступает из собственно почвы и сколько – из пустоши. Для этого составим балансовое уравнение. Произведем вычисления – с использованием концентрации меди и с применением концентрации никеля. Составим уравнение расчета количества воды, которое поступает в водоток из собственно почвы и из пустоши техногенной:

$$C_p = (C_n \cdot X_n + C_v \cdot (100 - X_n)) / 100 \%,$$

где  $X_n$  – количество (%) воды, поступающей из подзолистой почвы, при расчете "баланса концентраций" применяются отдельно концентрации меди ( $n - Cu$ ) и никеля ( $n - Ni$ );  $C_p$  – содержание меди (или никеля) в водах ручья;  $C_v$  – то же в водах, поступающих из лесной подзолистой почвы;  $C_n$  – в водах пустоши техногенной.

$$X_{Cu} = (C_p Cu - C_v Cu) / (C_n Cu - C_v Cu) 100 \%,$$

аналогично рассчитываем  $X_{Ni}$ .



Рис. 2. Схема формирования вод микроручья

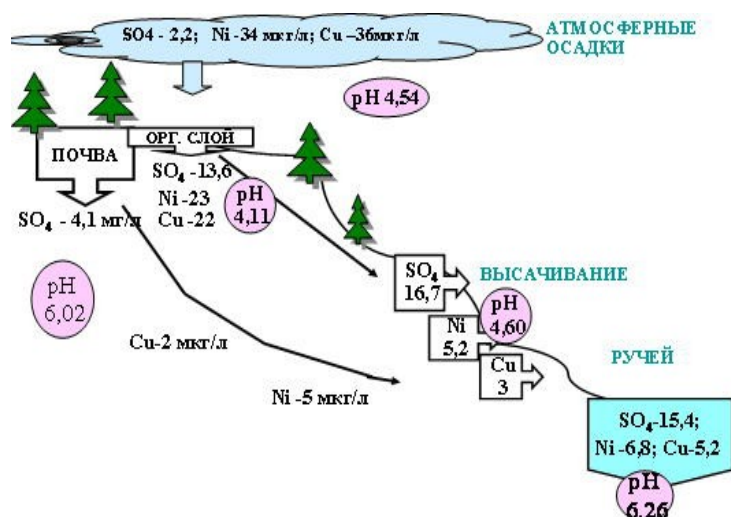


Рис. 3. Особенности водной миграции компонентов природных вод в сопряженном геохимическом ландшафте

направлении от комбината (рис. 1, индекс 4а, "слабо поврежденные леса"). Здесь отбирали атмосферные осадки, воды органогенного горизонта подзолистых почв – лесной подстилки (А<sub>0</sub>) и воды, просочившиеся через органогенный и минеральные горизонты почвы (А<sub>0</sub> – ВС) в целом. Опробовались также высачивания вод на склоне холма и ручей, дренирующий территорию, на которой расположен ельник.

В инфильтрационных водах, поступающих за границу переходной зоны иллювиального горизонта почв и почвообразующей породы, содержание катионов, по сравнению с составом атмосферных осадков, увеличивается. Различие не столь существенное, как в техногенном редколесье (7 км от комбината), где происходит разрушение БГЦ. В ельнике начальной стадии разрушения растения активно поглощают элементы-биофилы: кальций, магний и калий. Почвенные воды по значению pH относятся к категории слабокислых (5.44-6.14), в них появляется гидрокарбонат-ион (SO<sub>4</sub>52Cl33HCO<sub>3</sub>11NO<sub>3</sub>4), который достигает наибольших значений в ручье, дренирующем лесной ландшафт (SO<sub>4</sub>68HCO<sub>3</sub>18Cl13NO<sub>3</sub>1). Появление в этих водах гидрокарбонат-иона связано с процессами минерализации органического вещества, и конечным продуктом минерализации, как известно, является вода и CO<sub>2</sub>. Концентрация HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> в почвенной воде в БГЦ (36 км) намного превышает содержание этого компонента в инфильтрационных водах техногенного редколесья (7 км от источника пылегазовых выбросов).

Медь и никель, поступающие с дождями в этот биогеоценоз, сорбируются почвой. При содержаниях в атмосферных осадках 19 мкг/л и 13 мкг/л соответственно в почвенных водах содержится Cu – 2 мкг/л; Ni – 5.1 мкг/л. Примерно такие же, как и в почвенных водах, – концентрации тяжелых металлов в водах ручья (табл. 3). Таким образом, почва в летний период (период выпадения жидких атмосферных осадков) защищает поверхностные и, очевидно, подземные воды от проникновения тяжелых металлов (Евтюгина, Горбачева, 2012). Концентрация меди и никеля в этих водах меньше  $n$  мкг/л, где  $n = 1...10$  мкг/л.

Содержание сульфат-иона в ручье почти в 7 раз превышает содержание в атмосферных выпадениях. Чтобы объяснить подобное поведение серы, рассмотрим особенности миграции сульфат-иона на территории водосбора ручья в составе атмосферных, подстилочных, почвенных, склоновых и собственно ручьевых вод (рис. 3).

Судя по значению концентрации SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в атмосферных и почвенных водах (табл. 3), сера, возможно, аккумулируется в В-горизонте. Наши исследования показывают, что в период наблюдений только одна проба почвенных вод имела содержание сульфат-иона (17,8 мг/л), близкое к содержанию этого компонента в водах ручья и лесной подстилки (табл. 3 и 4). О том, что подзолистые почвы, например, в ельнике кустарничково-зеленомошном (в 100 км от комбината) могут аккумулировать серу, предполагалось и ранее (Евтюгина, 1994). Выявили же адсорбцию серы в иллювиальных горизонтах почв в зоне локального воздействия выбросов комбината "Североникель" Г.М. Кашулина (2002) – при

Вычисления показали: содержание меди в водах ручья (12 мкг/л) может быть получено смешением 92 % воды, поступающей из подзолистой почвы, и 8 % – из пустоши. Для никеля в ручье (концентрация 54 мкг/л) получаются близкие значения: 95 % воды, поступающей из собственно почвы, и 5 % – из разрушенной почвы – техногенной пустоши. Это вполне согласуется с результатами картирования напочвенного покрова, которое выполнялось при изучении биопродукционных процессов (Лукина, Никонов, 1996): на долю пустоши в техногенном редколесье приходилось около 10 %.

Лесной биогеоценоз начальной стадии техногенного разрушения. Это ельник на возвышенной части небольшого холма в 36 км в южном

исследованиях в рамках международного проекта "Экогеохимия Кольского полуострова" (1994) и Т.Т. Горбачева (2001) – при изучении вод подзолистых почв в лесах различных стадий деградиционной сукцессии.

В результате исследований в рамках проекта "Экогеохимия Кольского полуострова", в частности, было выявлено неизменное превышение содержаний серы в малых водотоках по сравнению с концентрациями в атмосферных осадках. Предполагалось, что это может быть связано с поступлением латеральных потоков, дренирующих органогенный и элювиальный горизонты, которые не обладают способностью накапливать серу (Каишулина, 2002). В наших исследованиях – воды, высачивающиеся в нижней части склона лесного холма, по содержанию сульфат-иона, величине pH близки водам лесной подстилки (органогенного горизонта – Ао) – рис. 3.

Таблица 3. Статистические параметры компонентов химического состава (мг/л; Cu, Ni – мкг/л) природных вод в зоне воздействия выбросов комбината

Параметр	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cu	Ni
Атмосферные осадки (дожди), 36 км, Ю (n = 10; 1987-1988 гг.)												
Минимум	4.27	2.10	0.70	–	0.14	0.18	0.59	0.10	0.29	0.07	11	9
Максимум	5.03	4.50	2.13	–	0.79	1.97	0.79	0.34	0.59	0.45	27	25
Среднее	4.60	2.73	1.00	–	0.54	1.14	0.65	0.15	0.36	0.26	19.4	14.3
Медиана	4.54	2.30	0.70	–	0.75	0.89	0.65	0.15	0.36	0.26	19	13
Почвенные (лизиметрические воды), n = 7; 1.09.1987 – 23.05.1988 гг.												
Минимум	5.44	1.60	0.70	0.30	0.20	0.03	0.84	0.32	1.26	0.25	<0.1	3
Максимум	6.14	17.80	2.80	2.26	0.87	1.68	2.34	1.27	2.39	2.43	5	12
Среднее	5.84	6.57	1.99	1.26	0.46	0.62	1.69	0.73	1.70	1.07	2.3	7.1
Медиана	5.82	4.40	2.10	1.20	0.41	0.32	1.77	0.75	1.59	0.99	2.0	5.1
Ручей болотный, n = 10; 1986-1990 гг.												
Минимум	6.26	13.15	1.05	2.40	0.13	0.01	2.09	0.57	1.20	0.37	2	<1
Максимум	7.20	18.90	3.19	9.60	1.12	1.10	4.85	1.22	3.41	0.82	12	25
Среднее	6.78	15.69	2.18	5.52	0.36	0.47	3.32	0.90	2.26	0.58	4.6	9.2
Медиана	6.77	15.65	2.22	5.20	0.24	0.54	3.44	0.96	2.24	0.54	3.5	6.8

Таблица 4. Химический состав различных категорий природных вод, формирующихся на водосборе ручья (сопряженное опробование вод лесной подстилки (Ао), почвенного профиля (Ао – ВС), высачивания и ручья)

Показатель	Атм. ос.	Ао	Ао – ВС	Склон	Ручей
pH	4.54	4.11	6.02	4.60	6.26
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> *	2.4	18.0	6.85	18.70	15.4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	–	1.2	–	5.1
Cl <sup>-</sup>	1.77	1.75	2.03	1.76	1.75
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.15	0.41	0.25	0.73	0.24
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.18	7.30	0.58	0.74	0.61
Робщ	0.036	0.720	0.026	0.009	0.018
Ca <sup>2+</sup>	0.64	1.04	1.31	1.66	3.89
Mg <sup>2+</sup>	0.18	0.39	0.73	0.72	0.99
Na <sup>+</sup>	0.35	1.25	1.54	1.48	2.28
K <sup>+</sup>	0.07	5.67	0.97	0.33	0.37
Si	0.02	2.33	1.51	2.8	4.76
Сорг	0.63	29.64	2.52	4.63	6.62
Mn**	5	108	35	14	2
Fe	40	222	20	197	100
Zn	29	63	254	3	3.6
Al	21	405	78	124	98

\* мг/л; \*\* мкг/л.

Следует отметить особенности состава вод, высачивающихся в нижней части склона лесного холма (табл. 4). Эти воды по содержанию железа, алюминия и сульфат-иона, величине pH близки подстильным водам. Однако, судя по концентрациям органических веществ (Сорг), меди и никеля, воды, инфильтрующиеся в более глубокие почвенные горизонты (Ао – ВС, табл. 4), также влияют на формирование химического состава склоновых вод.



Состав инфильтрационных (почвенных) вод, формирующихся в пределах техногенно трансформированных лесных биогеоценозов автономных ландшафтов, является информативным показателем внутрисочвенных процессов. Так, например, вынос за пределы корнеобитаемой зоны марганца, магния, калия и алюминия сопряжен с выносом сульфат-иона. Обеднение почвы важными элементами питания (Mn, K, Mg) для сильно поврежденных экосистем в зонах локального воздействия выбросов медно-никелевых предприятий было показано ранее (Евтюгина, 1994; Lobersli, Venn, 1995; Tikkanen, Niemela, 1995; Лукина, Никонов, 1996 – цит. по Кацулина, 2002).

Избыточное поступление соединений серы в этот ельник является главным фактором, определяющим уровень кислотности почвенных вод: зависимость между концентрацией  $SO_4^{2-}$  и pH ( $R = -0.971$ ) – достоверна. Миграционная активность тяжелых металлов в почвенных растворах также зависит от pH (рис. 4).

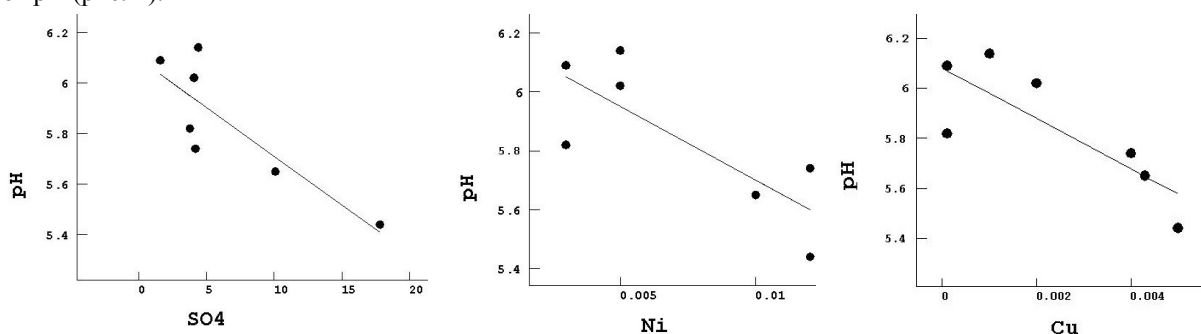


Рис. 4. Зависимости содержаний сульфат-иона, меди и никеля от pH в почвенных водах в ельнике начальной стадии техногенной трансформации (период наибольших объемов выбросов комбината)

### 3. Сравнительный анализ состава атмосферных и родниковых вод в зоне интенсивного воздействия выбросов комбината

В 2 км на запад-юго-запад от источника пылегазовых выбросов, в придорожном откосе, у подножия юго-восточного склона горы Ниттис находится родник. На схеме "Повреждение растительности (по состоянию на 1996 год)" этот участок охарактеризован так: "почти полностью лишенный растительности" (рис. 1, индекс 15). Тем не менее, растительность здесь существует: кустарник, злаки. Питание родника – атмосферное с инфильтрацией через озерно-ледниковые отложения (Ананьев, 2010). Атмосферные осадки (дождевая вода) собирались на площадке в нижней части северо-западного склона г. Нюд в 4 км в направлении на восток-юго-восток от комбината в период с 2001 по 2007 г. (Кацулина, Салтан, 2008).

В анионном составе атмосферных осадков доминирует сульфат-ион. Катионный состав, по сравнению с периодом наибольших объемов выбросов, изменился: конкурируют Ca и Mg ( $Mg\ 29Ca28Na26NH_4K4$ ), Cu – 48, Ni – 20 мкг/л, pH 4.49-5.96 (табл. 5).

Таблица 5. Концентрации компонентов химического состава (мг/л; Cu, Ni – мкг/л)

Параметр	pH	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	$NO_3^-$	$NH_4^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	Cu	Ni
Атмосферные осадки (дожди), 4 км, ВЮВ, (2001-2007 гг.)												
Минимум	4.49	0.82	<0.35	0.92	<0.1	<0.05	0.10	0.06	0.07	0.02	<0.5	2.0
Максимум	5.96	8.23	1.80	4.27	0.50	2.39	1.80	0.36	2.00	1.11	223	43
Медиана	5.23	4.29	0.62	2.30	0.18	0.55	0.65	0.19	0.32	0.48	48	20
Родник, подножие г. Ниттис, 2 км, ЗЮЗ ( $n = 29$ ; 1997-2009 гг.)*												
Минимум	5.67	9.88	1.70	7.90	0.21	<0.05	1.00	1.21	1.63	0.40	<1	2.9
Максимум	7.41	20.99	4.58	28.67	2.55	<0.05	7.60	5.28	4.35	1.66	2	11.4
Среднее	6.44	16.10	2.42	11.84	1.58	<0.05	5.42	2.99	2.46	0.67	1.2	6.3
Медиана	6.38	16.46	2.70	10.37	1.66	<0.05	5.60	2.75	2.34	0.61	<1	6.0

\* –  $N = 25$  (Ni);  $n = 15$  (Cu)

В составе анионов родниковых вод преобладает или  $SO_4$ -ион или  $HCO_3$ -ион, среди катионов доминирует Ca или Mg. Однако абсолютное содержание сульфат-иона в водах родника превышает существенно концентрации в атмосферных водах и почти совпадает с содержанием в водах ручья в техногенном редколесье (табл. 2). Концентрация сульфат-иона в инфильтрационных водах может увеличиваться вследствие десорбции серы, ранее накопленной в иллювиальном горизонте почв, а также за счет растворения так называемых сухих осадков, которые сорбируются растительностью, эродированной почвой, рыхлыми отложениями территории водосбора родника.

Примечательно, что близкие концентрации нитрат-иона в почвенных водах техногенной пустоши в редколесье периода наибольших объемов выбросов комбината (табл. 1, 2) и в родниковых водах в период снижения техногенной нагрузки на территорию (табл. 1, 5) также могут быть связаны с разрушением растительности, потребляющей азот на создание биомассы. На участке, где расположен родник, почти полностью погибла растительность (рис. 1).

Обогащение воды кальцием и, особенно, магнием происходит при взаимодействии атмосферных осадков с озерно-ледниковыми отложениями, состав которых связан с богатыми магнием ультраосновными и основными породами г. Ниттис. Это предположение сделано на основе результатов изучения четвертичных отложений Мончетундровского района (Евзеров, Кошечкин, 1981). Было выявлено, что минеральный состав глинистой фракции морены связан с составом близлежащих или подстилающих морену в данном пункте кристаллических пород. Глинистые частицы морены, залегающей на основных породах, представлены смесью иллита, хлорита и иллит-вермикулита или хлорит-вермикулита, т.е. минералами, богатыми магнием.

В период опробования родниковых вод (с 1997 по 2008 г.) в 60 % случаев концентрация меди в водах родника была менее 1 мкг/л. Концентрация никеля в 80 % случаев не превышала 8 мкг/л. Полагаем, что медь и никель, поступающие с атмосферными выпадениями, сорбируются почвой и/или рыхлыми отложениями.

В 2009 г. была ликвидирована придорожная насыпь, изменились условия питания родника и выхода на поверхность. Возможно, именно по этой причине концентрация никеля в 2009 г. была 23 мкг/л, в 2010 г. – 69 мкг/л.

#### 4. Заключение

Анализ результатов исследований, направленных на выявление особенностей миграции основных компонентов выбросов – меди, никеля, серы в составе атмосферных, почвенных, поверхностных вод и подземных (родниковых) вод, позволил сделать следующие выводы.

1. Почвенный покров служит биогеохимическим барьером для меди и никеля, инфильтрующихся с атмосферными водами в почвы. Тяжелые металлы атмосферных выпадений сорбируются почвой и/или почвообразующими породами. Механическое воздействие, нарушающее условия формирования подземного стока, может привести к повышению концентраций никеля в родниковой воде.

2. Кислотность атмосферных осадков, просочившихся в почву, на которой еще существует растительность, снижается. Почва с разрушенным напочвенным покровом (пустошь) утрачивает буферную способность по отношению к кислотным осадкам. Увеличение кислотности в инфильтрационных водах пустоши сопровождается соответствующим увеличением концентрации никеля в этих водах.

3. В лесном ландшафте начальной стадии разрушения превышение содержания сульфат-иона в ручье по сравнению с концентрациями в атмосферных осадках обусловлено, в частности, влиянием склонового стока, то есть поступлением латеральных потоков, дренирующих органогенный и элювиальный горизонты почв.

4. Почвы, возможно, адсорбируют сульфат-ионы при нисходящем потоке атмосферных вод (вертикальная инфильтрация).

5. Концентрация сульфат-иона в инфильтрационных водах в зоне локального воздействия выбросов металлургического комбината может увеличиваться вследствие десорбции серы, ранее накопленной в иллювиальном горизонте почв, а также за счет растворения так называемых сухих осадков, которые сорбируются растительностью, эродированной почвой, рыхлыми отложениями территории водосбора родника.

Благодарим гидрогеологов ОАО "Центрально-Кольская экспедиция" (г. Мончегорск) И.С. Зализко и З.И. Елизарьеву за предоставленные результаты химических анализов родниковых вод.

#### Литература

- Lobersli E., Venn K.** Effects of air pollutants on terrestrial ecosystems in the border area between Norway and Russia. *DN-utredning 1995-8 Derectorate for Nature Management. Trondheim*, 140 p., 1995.
- Tikkanen E., Niemela I.** Kola Peninsula pollutants and forest ecosystems in Lapland. *Finland's Ministry of Agriculture and forestry. The Finish Forest Research Institute*, 82 p., 1995.
- Ананьев В.Н.** Родники Мурманской области. *Мурманск, Книж. изд-во*, 88 с., 2010.

- Ананьев В.Н., Карпова Р.В., Сычева Л.Б.** Поиски подземных вод для обеспечения хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Мончегорска Мурманской области. Отчет за 2008-2010 гг. *Мончегорск, фонды ЦКЭ*, 2011.
- Горбачева Т.Т.** Состав и свойства вод Al-Fe-гумусовых подзолов Кольского полуострова (природные и техногенные аспекты). *Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.*, 23 с., 2001.
- Евзеров В.Я., Кошечкин Б.И.** Палеогеография плейстоцена западной части Кольского полуострова. *Л., Наука*, 104 с., 1981.
- Евтюгина З.А.** Особенности водной миграции химических элементов в ландшафтах, подверженных аэротехногенному загрязнению. *Препринт. Апатиты, КНЦ РАН*, 48 с., 1994.
- Евтюгина З.А., Горбачева Т.Т.** Тяжелые металлы в родниковых водах на территории воздействия выбросов предприятия цветной металлургии. Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. *Мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. Семипалатинский гос. пед. ин-т, 4-8 окт. 2012 г. Т. II. Семей*, с.76-78, 2012.
- Евтюгина З.А., Никонов В.В.** Особенности миграции меди и никеля по профилю подзолистых Al-Fe-гумусовых почв в условиях аэрогенного загрязнения. *Сб. мат. науч. сессии, посвященной 130-летию со дня рождения Н.М. Сибирцева. IV Сибирцевские чтения. Архангельск*, с.106-107, 1990.
- Кашулина Г.М.** Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона. Ч. 1. *Апатиты, КНЦ РАН*, 158 с., 2002.
- Кашулина Г.М., Салтан Н.В.** Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината "Североникель". *Апатиты, КНЦ РАН*, 239 с., 2008.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.** Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях антропогенного загрязнения. *Апатиты, КНЦ РАН*, 192 с., 1996.
- Мониторинг окружающей среды в зоне влияния ОАО "Кольская ГМК" и рекультивация нарушенных земель. URL: <http://www.kolagmk.ru/ecology/monitoring>. 2009.
- Роде А.А., Смирнов В.Н.** Почвоведение. *М., Высш. шк.*, 480 с., 1972.
- Экологический атлас Мурманской области. *Под ред. Г.В. Калабина. М., МГУ*, 48 с., 1999.