

З. А. Евтюгина, Ю. Г. Копылова, Н. В. Гусева

О формировании потоков веществ в аэротехногенно трансформированном лесном ландшафте

Проведен ретроспективный анализ формирования потоков веществ в техногенном еловом редколесье по результатам опробования атмосферных, почвенных и ручьевых вод в окрестностях комбината "Североникель". Сравняется состав вод ручья, дренирующего аэротехногенно трансформированный ландшафт в период наибольших объемов выбросов комбината (1987–1990 гг.), с химическим составом вод этого же ручья в 2014 и 2016 гг. Современный состав водотока определен с использованием методов ионной хроматографии, потенциометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Показано влияние лесной подстилки разных стадий разложения на формирование состава вод, инфильтрующихся в минеральные горизонты почв. Снижение концентраций Ni в водах подстилки на валеже по сравнению с Ni в атмосферных осадках не является достоверным, однако поток (мг/м^2) Ni из подстилки снижен. Поток Cu из подстилки на валеже почти в восемь раз меньше атмосферного потока Cu. В зоне интенсивного воздействия выбросов при отсутствии застойного увлажнения органический материал может быть источником питательных веществ для растительности, даже если содержание Cu и Ni в водах, просачивающихся через этот материал, в сотни раз превышает их фоновые показатели, но при условии многократного доминирования концентрации Ca над содержанием Cu и Ni в этих водах. На крутых склонах, где почва эродирована до минеральных горизонтов, а влага не может удерживаться в биологически активной области ландшафта, без мелиоративных мероприятий развитие растительности невозможно. Рекогносцировочное обследование территории показало, что в зоне разрушенных лесов и техногенных пустошей, на участках, где есть проточная вода и существуют выходы подземных вод в виде родников, развивается растительность, начинается возобновление лиственных и хвойных пород деревьев. В водах ручья, дренирующего аэротехногенно трансформированный ландшафт, после снижения объемов пылегазовых выбросов снизились концентрации SO_4^{2-} , Cl и K, увеличились – HCO_3^- и Si. Содержание Ni и Cu, а также Al, Fe, Mn согласно критерию Манна – Уитни не изменилось, возможно, из-за увеличения размеров техногенных пустошей в автономных позициях дренируемого ландшафта.

Ключевые слова: комбинат "Североникель", сухостой, почвенные воды, ручей, подстилка, трансформированный лесной ландшафт.

Введение

В зоне гипергенеза под влиянием различных факторов происходят почвообразование, формирование состава подземных вод, вод рек и озер [1]. Состав вод начинает формироваться в атмосфере, процесс продолжается в почвах и горных породах до тех пор, пока вода не окажется в области разгрузки. В соответствии с этим выделяются три этапа формирования состава подземных (и поверхностных [2, с. 9]) вод: атропогенный, биогенный и литогенный [3]. На каждом этапе воды приобретают свой неповторимый облик [4]. Среди основных факторов формирования подземных вод С. Л. Шварцев выделил биологическую продуктивность ландшафта, а также почвы и тип разрушения органического вещества. Эти же факторы, очевидно, определяют особенности состава водотоков, дренирующих и природные (естественные), и техногенно нарушенные ландшафты. Биологические параметры продуктивности отражают состояние биогеоценоза и отклонение его от нормы [5]. В условиях техногенно загрязненной атмосферы лесные биогеоценозы трансформируются, последовательно переходят из одного состояния в другое, вплоть до состояния полного разрушения. Подобная трансформация лесных ландшафтов произошла в Кольском регионе в результате выбросов комбината "Североникель". В настоящее время этот комбинат называется "площадка Мончегорск" Кольской горно-металлургической компании (ГМК)¹.

В 1966 г. впервые было проведено опробование снегового покрова в северо-западной и центральной частях Мурманской области. Установлено, что воздействие дымов комбината "Североникель" – "аэротехногенное заражение", по терминологии ответственного исполнителя и руководителя работ В. И. Гуревича, – причина возникновения ложных геохимических аномалий. Исследователи не рекомендовали проведение гидрогеохимических поисков, а также, основываясь на результатах анализов сосновой хвои, биогеохимических поисков сульфидных медно-никелевых оруденений на участках, удаленных от г. Мончегорска к северу и югу менее чем на 15 и 30 км соответственно, 5 км – к востоку и 10 км – к западу [6; 7].

¹ www.normik.ru.

В 1966 г. видимые признаки повреждения растительности отмечались лишь на расстоянии 2 и 3 км в северном и южном направлениях от комбината "Североникель". К 1985–1986 гг. зона поврежденных лесов достигла 930 км², а на территории 37 км² хвойные леса были полностью разрушены [8]. С 1990 г. комбинат "Североникель" последовательно снижал объемы выбросов SO₂: с 232,5 тыс. т/год (в работе [8] – 287 тыс. т/год) до 45,8 – в 1999 г. В 2015 г. объем выбросов достиг 36,9 тыс. т². Снижение выбросов тяжелых металлов происходило не так резко, как SO₂. В 1990 г. в атмосферу поступило Cu и Ni соответственно 1 813 и 2 712 т, а в 1999 г. – 873,8 и 1127 т, в 2013 г. выбросы Cu достигли 523,8 т, Ni – 374,5 т (данные Кольской ГМК). Сократилась площадь поврежденных лесов – 474 км², но увеличилась площадь погибших (89 км²)³. Несмотря на то что к настоящему времени содержание загрязнителей (Cu и Ni) в выбросах комбината снизилось относительно 80–90-х годов прошлого века в несколько раз, в почве (органогенном горизонте) адекватного снижения Cu и Ni не отмечено. Состояние почвенного покрова не улучшилось [9].

В июле 2014 и 2016 гг. на территории водосбора оз. Имандра, подверженного воздействию выбросов Кольской ГМК, проводили работы по оценке современного состояния водоемов, водотоков и родниковых вод [10]. Одним из объектов опробования был ручей в 7 км от комбината "Североникель". На территории водосбора этого ручья в период наибольших объемов выбросов комбината (конец 80-х – начало 90-х годов прошлого века) проводились комплексные исследования, составной частью которых являлось изучение химического состава различных категорий природных вод [11–13].

В этой связи целесообразно сравнить состав вод ручья, дренирующего аэротехногенно трансформированный ландшафт в период наибольших объемов выбросов комбината "Североникель", с современным химическим составом вод этого ручья, провести ретроспективный анализ формирования потоков веществ в техногенном еловом редколесье и выявить влияние лесной подстилки разных стадий разложения на состав вод, инфильтрующихся в минеральные горизонты почв в период вегетации.

Материалы и методы

Отбор проб вод ручья, дренирующего аэротехногенно трансформированный ландшафт (7 км к ЮЮЗ от источника выбросов), проводили в июле 2014 и 2016 гг. Для сравнительного анализа из материалов, полученных в 1987–1990 гг., были выбраны гидрохимические показатели вод этого ручья, также относящиеся к периодам вегетации.

Для ретроспективного анализа формирования потоков веществ в техногенном еловом редколесье [14], располагавшемся на автономном участке территории водосбора ручья, использовали показатели химического состава атмосферных, подкroновых и почвенных вод. Лизиметры устанавливались под органогенным горизонтом почв (лесной подстилкой) с учетом структуры надземной части фитоценоза. В условиях холодного гумидного климата растительный опад, поступающий на поверхность почвы в таежных лесах, не успевает полностью разложиться. Постепенно растительные остатки накапливаются, образуя грубогумусный органогенный генетический почвенный горизонт. Этот горизонт (лесную подстилку) рассматривают как отдельный блок биогеоценоза [15]. В лесах, на северном пределе их произрастания, лесная подстилка является единственным аккумулятивным горизонтом почв и основным источником питательных веществ для растительности. В подстилке, как правило, расположена значительная часть корней растений, поглощающих элементы питания [15–17]. Около 70 % площади техногенного редколесья приходилось на долю вороничной (Вр) растительной группировки (РГ), 5 % занимала брусничная (Бр) РГ, около 10 % площади не покрыто растительностью [18]. В течение первого года исследований использовали по два лизиметра в виде полиэтиленовых поддонов (30 × 30 см) конструкции Е. И. Шиловой, которые были врезаны под подстилку этих РГ, затем лизиметры заменили на цилиндрические полиэтиленовые поддоны, диаметром 25 см, закрытые от бокового притока подстилочных вод.

Вороничная растительная группировка (Вр РГ) сформирована на валеже, стадию трансформации и зарастания которого можно охарактеризовать, воспользовавшись отчасти измененной шкалой из работы [19]: ствол теряет форму, на поверхности выделяется незначительное повышение. По степени разложения древесина представляет собой призмочки, кубики различной величины, а также волокнистый материал в составе почвенной подстилки. Мощность этого слоя (О) – 12 см. Брусничная РГ сформирована под старым, диаметром около 20 см, еловым сухостоем без коры и тонких ветвей. Под кроной росла только брусника. Подстилка Бр (О-горизонт почв) – бурая, однородная, мощностью около 14 см.

Кроме лизиметров, расположенных под органогенным горизонтом почв (лесной подстилкой), в межкroновых участках техногенного редколесья (7 км от комбината) установили три лизиметра, диаметром 30 см, представленные цилиндрами из нержавеющей стали с полиэтиленовыми поддонами [20]. "Особенности конструкции лизиметров определяют адекватность полученных с их помощью результатов

² URL: <http://www.kolagmk.ru/news/2016-03-17/kolskaya-gmk-prodolzhaet-kologicheskii-dialog.html>.

³ Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2008 году. URL: https://gov-murm.ru/upload/iblock/2c2/2008_.pdf.

природным явлениям. Применение изолированных лизиметров позволяет в наибольшей степени приблизиться к естественным условиям водной миграции веществ в почвах" [21, с. 143]. Использование цилиндрических лизиметров позволило получить инфильтрационные воды с минимальным нарушением структуры завалуненных почв и почвообразующих озерно-ледниковых отложений.

Два цилиндра были заложены на глубину 40 и 30 см в пустоши техногенной (Пт1 и Пт2), при этом С-горизонт – почвообразующие породы – отмечен соответственно на уровне 26 и 28 см от поверхности почвы. Монолиты этих лизиметров полностью охватывали разрушенную почву, минеральные слои которой покрывала темно-коричневая торфянистая подстилка мощностью 1,5–2 см. Третий цилиндр врезан в почву на глубину 30 см – на уровне переходной зоны от иллювиального горизонта к почвообразующей породе. Мощность подстилки, на которой росли кустарнички (вороника), составляла 9–10 см. С-горизонт на глубине 48–50 см представляет собой весьма влажный крупный песок и плохо окатанный гравий. Наполнитель обломочного материала – влажный суглинок. Сходный гранулометрический состав и физическое состояние отложений на этой площадке отмечены и в профиле Пт1 на глубине 40–50 см.

В техногенном еловом редколесье, примерно в трех метрах от сухостоя и почв Бр, опробовались воды, скапливающиеся в микропонижении на склоне, условно названные подпочвенными. Возможно, это был выход грунтовых вод или верховодки.

Фоновый (условно) ельник расположен в автономной позиции ландшафта в 100 км от комбината, в ЮВ части территории водосбора оз. Умбозеро. В прогалинах этого ельника под лесной подстилкой, доминирующей по площади РГ, кустарничково-зеленомошной (КЗм), были установлены четыре лизиметра и два – в подкрановом участке ели (ЕКЗм). Напочвенный покров КЗм РГ – это "подушка" мха с единичными экземплярами вороники и черники, мощность подстилки – 7 см. ЕКЗм РГ расположена под елью, где также выделяется "подушка" мха с единичными особями брусники, мощность органогенного горизонта подкранового подзола – 10 см. Почвообразующая порода – разнородные пески с гравием и валунами – ледниковые отложения.

В межкрановых участках техногенного редколесья и фонового ельника для сбора атмосферных выпадений рядом с лизиметрами были установлены полиэтиленовые воронки, соединенные с бутылками, заглубленными в почву. Для примерной оценки влияния сухой ели на состав вод органогенного горизонта почв под этим сухим деревом определяли количество (мг/л, мг/м²) химических элементов осаджений, поступающих в осадкоприемник под кроной сухостоя в один из осенних периодов (с 26.08.88 по 4.10.88 гг.). Количество химических компонентов (поток) – мг/м² – это произведение количества воды – мм – и концентрации компонента в пробе.

Изучение химического состава природных вод периода наибольших объемов выбросов. Во всех исследуемых водах определяли: рН – потенциметрически; NO₃⁻ – ионоселективным электродом. Затем (после фильтрования через бумажный фильтр "синяя лента", как правило, только атмосферные и подкрановые воды) NH₄⁺ – с реактивом Неслера (предварительная обработка по [22]); SO₄²⁻ – турбидиметрическим методом; СГ – меркуриметрическим; фосфор общий, кремний – фотометрическое определение; углерод органический – с бихроматом калия по методикам, изложенным в [23]; К, Na, Ca, Mg, Cu, Ni, Fe, Mn, Zn, Al – методом атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии.

Изучение современного химического состава природных вод выполнено в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Научно-образовательного центра "Вода" Томского политехнического университета с использованием методов ионной хроматографии, титриметрии и потенциметрического титрования. Катионы и анионы, включающие NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, СГ, PO₄³⁻, Br⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, определяли методом ионной хроматографии на двухканальном безреагентном ионохроматографическом комплексе ICS-5000 с кондуктометрическим детектированием производства компании Dionex – Thermo Scientific (США).

Определение органического углерода проводилось на анализаторе углерода Liquid TOC компании Elementar (Германия) с детектором инфракрасного излучения методом высокотемпературного каталитического окисления соединений углерода и разложения органического углерода до диоксида углерода (IV) (CO₂). Окисление проводится в присутствии кислорода при температуре 800 °С.

Определение железа общего проводили фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой на спектрофотометре UNICO 2100 "ЮНИКО-СИС" (РФ, г. Санкт-Петербург).

Микрокомпонентный состав вод определялся масс-спектральным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе NexION 300 фирмы Perkin Elmer, США.

Расчет статистических параметров и построение графиков проводили с помощью Microsoft Excel 2003. Достоверность различий между выборками оценивали с помощью *U*-критерия Манна – Уитни (автоматический расчет *U*-критерия⁴). Критерий позволяет выявлять различия между малыми выборками. Эмпирическое значение критерия *U* отражает, насколько велика зона совпадения между рядами. Чем меньше *U*_{эмп}, тем более вероятно, что различия достоверны.

⁴ <http://www.psychol-ok.ru/statistics/mann-whitney/>.

Результаты и обсуждение

Изменение состава атмосферных осадков в зависимости от состояния лесного ландшафта показано в табл. 1. В фоновом ельнике по сравнению с атмосферными осадками техногенного редколесья наблюдается повышение значений рН, увеличение концентраций $C_{орг}$, иона аммония, фосфора, калия. В редколесье техногенный фактор определяет повышенные, по отношению к условно фоновым, содержания в атмосферных осадках Ni, Cu, Co, Fe, Al, Si и SO_4^{2-} .

Воды, поступающие в лизиметр из-под подстилки, сформированной на валеже ели (Вр), имеют относительно низкие концентрации растворенных органических веществ – 7,8 мг/л, в отличие от вод органогенного слоя почв под еловым сухостоем (Бр: $C_{орг}$ – 22,9 мг/л) в техногенном редколесье и подстилочных вод в условно фоновом ельнике (КЗм – 25,9 мг/л, ЕКЗм – 16,7 мг/л) (табл. 1). Воды подстилки на валеже (Вр) неокрашенные, почти бесцветные. Фульвокислоты (ФК) и низкомолекулярные органические кислоты могут быть бесцветными [24; 25].

Таблица 1. Изменение состава атмосферных осадков при формировании вод органогенных почвенных горизонтов в техногенном еловом редколесье и в условно фоновом ельнике
Table 1. Changes in the composition of atmospheric precipitation during the formation of litter waters in destroyed and background spruce forests

Параметр	Техногенное еловое редколесье, 7 км						Условный фон, 100 км		
	МК*	Вр	Бр	МК**	ПК**	Бр2**	МК*	КЗм	ЕКЗм***
	Med	Med	Med	26.08.88–04.10.88 гг.			Med	Med	Med
мм	140	77	57	94	64	31	155	43	16
рН	4,44	3,7	3,48	4,55	3,33	3,25	4,90	4,34	4,65
SO_4^{2-}	5,8	41,2	68,3	5,1	44,4	69,0	2,30	0,20	8,9
Cl ⁻	1,05	1,93	11,25	2,8	6,65	9,10	0,70	2,10	2,4
NO_3^-	0,39	0,42	0,92	0,10	0,89	0,63	0,35	0,62	0,40
NH_4^+	0,20	1,66	3,08	0,15	0,45	0,70	0,58	3,63	1,14
P	0,012	0,129	0,294	0,022	0,054	0,150	0,072	0,240	0,198
$C_{орг}$	1,06	7,8	22,86	0,42	16,54	18,56	3,75	25,92	16,70
Ca	0,30	5,78	16,96	0,31	6,18	14,08	0,34	1,93	2,00
Mg	0,07	1,6	1,71	0,17	0,75	1,77	0,065	0,52	0,66
Na	0,26	0,56	4,08	0,32	1,93	1,33	0,34	0,42	1,59
K	0,07	2,68	5,51	0,10	0,90	3,32	0,18	3,45	2,9
Cu	0,540	0,127	1,868	0,419	2,340	2,704	0,003	0,006	0,009
Ni	0,279	0,240	4,700	0,161	1,800	3,608	0,002	0,008	0,010
Co	0,014	0,039	0,243	0,034	0,380	0,660	0,0005	0,000	0,0035
Mn	0,004	0,196	0,960	0,002	0,142	1,179	0,005	0,241	0,288
Fe	0,060	0,112	0,526	–	–	0,297	0,030	0,232	0,112
Zn	0,016	0,361	0,703	0,009	0,100	0,664	0,023	0,134	0,197
Al	0,081	0,670	1,020	0,001	0,316	0,832	0,001	0,425	0,341
Si	0,07	1,25	1,22	0,23	0,37	1,21	0,02	0,66	0,56

Примечание: содержания компонентов в водах, кроме рН, представлены в мг/л (здесь и в др. таблицах), med – медиана (четыре периода вегетации: июнь – август) содержаний компонентов в водах органогенных горизонтов почв: Вр ($n = 6$); Бр ($n = 8$); КЗм ($n = 13$); ЕКЗм ($n = 5$). МК* – состав атмосферных осадков в межкрупных участках; ** – сопряженный отбор атмосферных осадков в период с 26.08.88 по 4.10.88 гг. подкрупных осаджений сухостоя (ПК) и вод Бр2 органогенного горизонта почв, полученные с помощью цилиндрического поддона, установленного под кроной этого сухостоя; *** – содержание компонентов в водах органогенного горизонта почв под елью в условно-фоновом ельнике. Жирный шрифт – недостоверные различия между концентрациями компонентов в водах атмосферных и подстилки на валеже (Вр) в техногенном редколесье (объяснение – в тексте). Прочерк – нет данных (здесь и в др. таблицах). Мм – количество воды.

В наших исследованиях специфика $C_{\text{орг}}$ в водах органогенного горизонта (подстилки) Вр в период вегетации проявляется в увеличении содержания при pH от 3,55 до 3,84 (рис. 1, *b*), при этом высокие концентрации Ca, Mg, K соответствуют низким значениям $C_{\text{орг}}$ (рис. 1, *d*). Также для вод подстилки Вр, сформированной на валеже, получены аналогичные (отрицательные) корреляционные зависимости между $C_{\text{орг}}$ и содержаниями Cu ($r = -0,456$), Ni ($-0,749$), Co ($-0,366$), Mn ($-0,446$) и Al ($-0,636$). Не зная состава растворенного органического вещества, сложно объяснить подобное поведение Ca, Mg, K и микроэлементов. На этой стадии разложения валежа (см. "Материалы и методы") в лизиметрических водах подстилки Вр концентрация сульфат-иона в 5 раз превышает содержание растворенных органических веществ и, как показано на рис. 1, *a*, *c*, миграция макрокатионов происходит совместно с SO_4^{2-} .

Содержания всех компонентов химического состава вод Вр превышают концентрации в атмосферных осадках (МК), за исключением NO_3^- , Fe, Co, Ni. Для Cl^- и Na^+ незначительное превышение концентраций (медиана – табл. 1) подтверждает U -критерий Манна – Уитни ($p < 0,05$), однако потоки (мг/м^2) Cl^- и Na^+ , поступающие с атмосферными осадками и выносимые из подстилки Вр, не различаются: $U_{\text{эмп}} = 7 > U_{\text{крит}0.05} = 1$ – для Cl^- и $U_{\text{эмп}} = 14 > U_{\text{крит}0.05} = 5$ – для Na^+ .

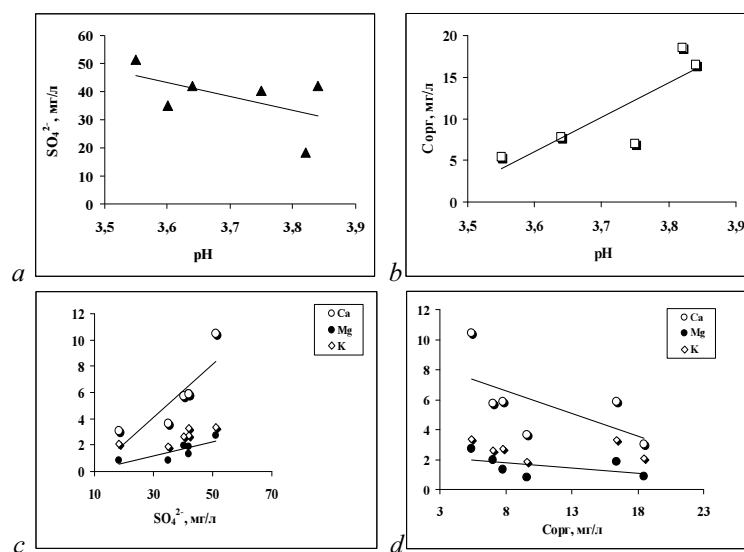


Рис. 1. Зависимости содержаний $C_{\text{орг}}$, SO_4^{2-} , Ca, Mg, K и значений pH в водах лесной подстилки, сформированной на валеже (Вр)

Fig. 1. Dependences of the contents of $C_{\text{орг}}$, SO_4^{2-} , Ca, Mg, K and pH values in the waters of the forest litter formed on the fallen tree (Вр)

Снижение концентраций (медиана) Ni в водах подстилки на валеже Вр (0,240 мг/л) по сравнению с Ni в атмосферных осадках (0,279 мг/л) не является достоверным. Однако значимое ($U_{\text{эмп}} = 3 < U_{\text{крит}0.05} = 4$) уменьшение потока Ni (18,48 мг/м²) из подстилки Вр по сравнению с потоком Ni из атмосферы (39,06 мг/м²) указывает на то, что Ni тем не менее закрепляется в подстилке на валеже. Не вызывает сомнений поглощение подстилкой меди. Поток Cu из подстилки на валеже Вр (9,78 мг/м²) почти в 8 раз меньше атмосферного потока Cu (75,6 мг/м²). Эту же тенденцию отражает изменение отношений концентраций меди и никеля – Cu/Ni. Так, в течение 4 периодов вегетации в атмосферных выпадениях концентрация (медиана) Cu почти в 2 раза превышала концентрацию Ni, а в водах, поступающих из подстилки Вр в минеральные горизонты почв, отношение Cu/Ni – 0,5 (из табл. 1).

Воды подстилки – О-горизонт почв под еловым сухостоем (Бр), также как и воды подстилки, сформированной на валеже (Вр), являются кислыми: значения pH изменяются от 3,38 до 3,63. Бурый цвет вод рыхлой и однородной (по структуре) подстилки Бр изменялся в зависимости от количества поступающих в подстилку осадков. Так, например, для одного из лизиметров в водах подстилки Бр концентрация $C_{\text{орг}}$ составила 11,3 мг/л при количестве просочившейся влаги 116 мм, а при 36 мм влаги $C_{\text{орг}}$ – 99,7 мг/л.

Содержание почти всех компонентов в водах О-горизонта почвы Бр многократно превышают их концентрации в атмосферных осадках. Однако для получения вод, просочившихся через подстилку Бр РГ, лизиметры были установлены под кроной старого сухостоя без коры и тонких ветвей. Состав же подкороновых выпадений является результатом сорбционного концентрирования и последующего смывания и/или вымывания элементов при взаимодействии собственно осадков с кроной этого елового

сухостоя. Как показали результаты единичного (в период с 26.08.88 по 4.10.88 гг.) одновременного опробования вод подстилки и подкروновых осадений, состав вод подстилки Бр под еловым сухостоем в целом близок составу подкроновых осадений (табл. 1). Наибольшее превышение концентраций (в 3–8 раз) в водах подстилки Бр по сравнению с подкроновыми водами показали К, Mn, Zn и Si.

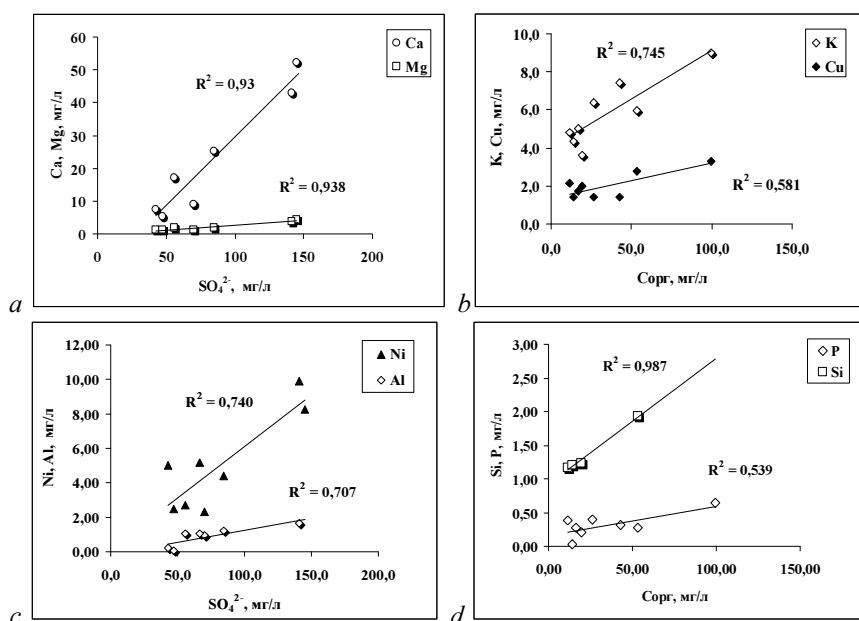


Рис. 2. Зависимости содержаний SO_4^{2-} , Ca, Mg, Ni, Al и $\text{C}_{\text{орг}}$, K, Cu, P, Si в водах лесной подстилки (Бр), сформированной под еловым сухостоем
Fig. 2. Dependences of the contents of SO_4^{2-} , Ca, Mg, Ni, Al and $\text{C}_{\text{орг}}$, K, Cu, P, Si in the forest litter (Бр) formed under spruce deadwood

Среди анионов минеральных кислот (медиана) в водах подстилки Бр доминирует сульфат-ион. Превышение содержаний (мг/л) SO_4^{2-} и $\text{C}_{\text{орг}}$ в подстилочных водах по сравнению с концентрациями этих компонентов в подкроновых водах незначительно.

Растворимое органическое вещество ($\text{C}_{\text{орг}}$) в водах лесной подстилки (Бр), сформированной под сухостоем, ассоциировано с K, Cu, P, Si (рис. 2, b, d), а вынос сульфат-иона связан с Ca, Mg, Ni, Al (рис. 2, a, c). Следует отметить, что даже сухая крона сорбирует медь. Это показывает последовательное изменение отношений концентраций меди и никеля (Cu/Ni) в атмосферных, подкроновых и подстилочных водах: 2,6; 1,3; 0,75 (табл. 1, период с 26.08.88 по 4.10.88 гг.).

В водах подстилки под сухостоем (брусничная РГ) никеля и меди содержалось соответственно в 500 и 300 раз больше, чем в водах О-горизонта почв в условно-фоновом ельнике (табл. 1). Потоки этих элементов, поступающие в минеральные горизонты почвы Бр, значительно различаются.

Cu, Ni, Co входят в группу наиболее ядовитых микроэлементов как для высших растений, так и для ряда микроорганизмов [26]. Оценка токсичных концентраций и действия микроэлементов на растения очень сложна. Ca, P и Mg – главные антагонистические элементы, которые могут ингибировать поглощение микроэлемента, или, наоборот, микроэлемент ингибирует поглощение макрокомпонента [26]. Концентрации меди и никеля, которые в водах подстилки Бр являются макрокомпонентами, в течение четырех периодов вегетации изменялись соответственно от 1,39 до 3,3 мг/л и от 2,29 до 9,90 мг/л. При этом концентрации макрокомпонентов были близки или многократно превышали содержание меди и никеля. Например, концентрации Ca изменялись от 5,25 до 52,29 мг/л, Mg – от 1,21 до 4,33 мг/л, K – от 3,69 до 9,01 мг/л, SO_4^{2-} – от 42,7 до 145,0 мг/л.

Материалы полевых опытов, проводившихся под руководством Г. А. Евдокимовой [27], свидетельствуют о сильном влиянии ионов Ca на биогенную миграцию Cu и Ni. На почвах, подверженных воздействию выбросов комбината "Североникель", идентичных по уровню загрязнения, но имеющих разные отношения суммарного содержания обменных катионов к валовому содержанию меди или никеля: $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{Cu}$ (или Ni), различается биомасса растений и ее качество. Результаты наших исследований химического состава вод подстилки Бр позволяют предположить, что кальций играет важную роль в снижении токсичности Cu и Ni для растений. Так, при содержаниях (медиана) Ca, превосходящих Cu и Ni в 9 и 4 раза соответственно, в водах, просачивающихся через лесную подстилку, на ней могут произрастать некоторые кустарничковые формы растений (брусника), даже если медь и никель в данном случае являются макрокомпонентами и в сотни раз превосходят их фоновые концентрации.

Ретроспективный анализ формирования потоков веществ в техногенном еловом редколесье и влияния лесной подстилки разных стадий разложения на состав вод, инфильтрующихся в минеральные горизонты почв в период вегетации, позволяет сделать предположение относительно роли отпада и валежа на склонах в зоне интенсивного воздействия пылегазовых выбросов предприятий Кольской ГМК (промплощадка Мончегорск). В настоящее время некоторые пологие склоны возвышенностей в этой зоне покрыты стволами погибших хвойных деревьев. Лежащие на одном из таких склонов стволы (рис. 3) являются протекторами почвы от загрязняющих веществ, как это показало сопоставление количества Cu (менее значительно – Ni), содержащегося в водах из-под подстилки на валеже и из атмосферы. Отпад, по мере его гумификации и минерализации, может быть источником питательных элементов для растений, даже если по уровню концентраций в инфильтрующихся водах тяжелые металлы являются макрокомпонентами. При этом важно, как показали исследования, чтобы содержания элементов питания растений (Ca, Mg, K) в водах органического горизонта почв превышали в несколько раз концентрации Cu и Ni. Однако это возможно, если есть условия для просачивания и задержки атмосферных осадков, например наличие на пологом склоне микропонижений, стволового отпада, не смытой лесной подстилки (рис. 3). В зоне интенсивного воздействия выбросов на крутых склонах, где разрушен даже напочвенный покров, а почва эродирована до минеральных горизонтов и соответственно, нет условий для удерживания влаги в биологически активной области ландшафта, без мелиоративных мероприятий развитие растительности невозможно.



Рис. 3. Погибший хвойный лес на склоне, 2 км в ЗЮЗ направлении от комбината, июль 2016 г.
Фото З. А. Евтюгиной
Fig. 3. The dead coniferous forest on the hillside, 2 km WSW direction from the smelter, July 2016.
Photo by Z. A. Evtyugina

Чтобы проследить, как изменяется состав вод, просачивающихся через почвы и почвообразующие породы и поступающих в водоток аэротехногенно трансформированного ландшафта, рассмотрим состав инфильтрационных вод (табл. 2) и химический состав вод ручья (микроручья, шириной 30–50 см), дренирующего этот ландшафт.

Инфильтрационные воды, условно названные подпочвенными, отбирались в микропонижении на склоне в 3 м от лизиметров Бр, расположенных на высоте около 1,5 м. Воды, скапливающиеся в микропонижении, возможно, представляют собой выход грунтовых вод или верховодки. Это предположение основано на том, что при установке на автономном участке ландшафта цилиндрических лизиметров для отбора инфильтрационных (почвенных) вод кустарничковой РГ и вод пустоши техногенной (напочвенный покров разрушен – кустарнички погибли) на глубине около 50 см вскрыт весьма влажный крупный песок и плохо окатанный гравий. Наполнитель обломочного материала – влажный суглинок.

Детальные исследования, основанные на лизиметрических экспериментах, показывают, что каждый почвенный профиль с хорошо развитыми горизонтами имеет свои собственные характеристики движения микроэлементов [26]. Это утверждение наиболее ярко проявляется при сопоставлении химических составов вод, просочившихся через почвенный профиль кустарничковой растительной группировки и профиль пустоши техногенной (табл. 2).

В целом состав инфильтрационных вод (медианные значения), отбравшихся в период вегетации, незначительно отличается от показанного ранее [28] среднегодового химического состава почвенных вод кустарничковой РГ и пустоши техногенной.

Примечательно, что катионно-анионный состав вод в микропонижении близок составу инфильтрационных (почвенных) вод кустарничковой РГ, отбравшихся на уровне слоя ВС (табл. 2), за исключением повышенных концентраций иона аммония, кремния и относительно низких содержаний калия.

Таблица 2. Статистические параметры инфильтрационных и подпочвенных вод в микропонижении на склоне в аэротехногенно трансформированном ландшафте (7 км ЮЮЗ от промплощадки Мончегорск Кольской ГМК) в течение четырех вегетационных периодов при наибольших объемах выбросов
Table 2. Statistical parameters of infiltration and subsoil waters in the microdepression on the slope in the aerotechnologically transformed landscape (7 km southwest from Monchegorsk site) during the four growing seasons with the largest amount of emissions

Параметр	Почвенные воды кустарничковой РГ (цилиндрический лизиметр)			Воды пустоши техногенной – Пт1 (цилиндрический лизиметр)			Подпочвенные воды* в микропонижении на склоне		
	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max
мм	97	38	101	65	14	133			
$C_{орг}$	3,37	1,14	4,32	2,86	2,29	4,32	1,56	1,25	3,23
pH	5,39	5,12	5,95	4,72	4,65	4,76	5,39	5,05	5,82
SO_4^{2-}	19,50	17,20	19,70	19,10	14,70	19,50	22,00	19,5	24,8
Cl	2,48	1,77	3,50	2,83	2,80	3,50	2,29	2,10	3,50
NO_3^-	0,240	0,124	0,600	3,100	0,324	3,250	0,295	0,028	0,500
NH_4^+	0,083	0,070	1,380	1,210	0,072	1,860	0,680	0,050	1,420
P	0,001	0,0005	0,034	0,024	0,011	0,040	0,009	0,0005	0,022
Ca	5,25	4,41	5,72	3,55	2,86	5,78	5,49	4,71	6,00
Mg	1,25	1,14	1,54	0,9	0,63	1,23	1,62	1,26	1,72
Na	1,97	1,29	2,11	1,18	1,14	1,27	1,84	1,77	2,14
K	1,07	0,27	1,12	1,43	1,43	2,31	0,21	0,15	0,27
Cu	0,004	0,002	0,012	0,135	0,030	0,394	0,030	0,005	0,054
Ni	0,016	0,014	0,124	0,930	0,850	1,186	0,075	0,037	0,111
Co	0,011	0,003	0,020	0,050	0,036	0,150	0,005	0,0005	0,040
Mn	0,082	0,030	0,099	0,127	0,030	0,142	0,022	0,011	0,032
Fe	0,023	0,002	0,041	0,039	0,021	0,079	0,062	0,026	0,078
Zn	0,118	0,062	0,269	0,429	0,400	0,812	0,037	0,012	0,065
Al	0,063	0,050	0,260	1,050	0,855	1,192	0,106	0,008	0,204
Si	2,24	1,68	2,47	2,33	2,29	2,71	4,14	3,34	5,85
HCO_3^-	0,49	0,01	0,60	–	–	–	–	–	–

Примечание: * – воды, условно названные подпочвенными, в микропонижении на склоне в 3 м от лизиметров Бр.

Современный химический состав вод ручья отличается от параметров состава вод периода наибольших объемов выбросов (табл. 3).

В водах ручья, дренирующего аэротехногенно трансформированный ландшафт, произошло снижение содержаний сульфат-, хлорид-ионов и калия, увеличилась концентрация гидрокарбонат-иона и кремния. Несмотря на снижение содержаний меди и никеля в атмосферных осадках в 2000–2010 гг. (по сравнению с 1987–1990 гг.) в 13 и 5 раз соответственно (табл. 1 и 2), в водах ручья концентрации Cu и Ni, а также Al, Fe, Mn согласно критерию Манна – Уитни не изменились. Вероятно, это произошло из-за того, что увеличились размеры техногенных пустошей в автономных позициях дренируемого ландшафта, т. е. участков, на которых погибли не только деревья, но и разрушился напочвенный покров. Разрушенная почва (пустошь) является своего рода источником меди и никеля (табл. 2), других микрокомпонентов в почвенных водах, генетически связанных с водами ручья. Возможно, это обстоятельство объясняет отсутствие различий содержаний тяжелых металлов и алюминия в ручье в период наибольших объемов выбросов и при снижении техногенной нагрузки.

Таблица 3. Изменение концентраций компонентов в поверхностных водах при уменьшении техногенной нагрузки

Table 3. Changes of surface waters components concentrations with the decrease of atmospheric pollution load

Параметр	Ручей, июнь – август 1987–1990 гг.			Ручей, июль 2014, 2016 гг.			МК***
	Med	Min	Max	2014 г.*	2014 г.**	2016 г.*	
pH	6,63	6,57	6,78	6,73	6,69	6,90	4,03
C _{орг}	1,87	0,39	2,45	–	–	3,92	4,29
NO ₃ ⁻	0,425	0,082	0,800	0,17	<0,02	<0,1	0,10
NH ₄ ⁺	0,199	0,140	1,560	0,068	0,05	2,78	0,221
P	0,003	0,001	0,010	0,0046	0,013	0,0005	0,006
HCO ₃ ⁻	5,81	4,20	12,20	18,3	19,5	11,6	–
SO ₄ ²⁻	16,45	13,60	18,90	7,27	8,05	7,30	4,72
Cl ⁻	2,47	1,77	3,85	1,08	1,39	1,00	0,67
Ca	5,48	5,09	5,92	6,18	6,15	5,40	0,88
Mg	1,17	1,09	1,23	1,57	1,63	1,00	0,19
Na	2,03	1,77	2,05	2,12	2,19	1,90	0,45
K	0,17	0,16	0,17	0,075	0,16	0,07	0,15
Si	2,71	2,18	4,20	4,24	4,38	4,74	0,031
Al	0,0010	0,0005	0,0160	0,0332	0,0032	0,0173	0,0236
Fe	0,0100	0,0070	0,1890	0,08	0,12	0,018	0,0109
Mn	0,0024	0,0001	0,0050	0,0028	0,0004	0,0007	0,0028
Co	0,0026	0,0005	0,0070	0,0003	0,00003	0,0001	0,00166
Cu	0,014	0,0063	0,0198	0,018	0,020	0,017	0,0429
Ni	0,0603	0,0410	0,0860	0,046	0,038	0,045	0,0523
Zn	0,0075	0,0024	0,0130	0,0019	0,0018	0,0020	0,0041
Sr	–	–	–	0,01475	0,01532	0,01403	0,00785
Cd	–	–	–	0,00004	0,00001	0,00004	0,0001
Pb	–	–	–	0,00011	<0,00002	0,00005	0,00031
Cr	–	–	–	0,00034	0,00019	0,00028	0,0005

Примечание: * – точка отбора проб № 1; ** – точка отбора проб № 2 – примерно в 20 м от точки № 1 выше по течению; МК*** – состав атмосферных осадков [29] в межкросовых участках техногенного редколесья ($n = 34$; июнь – октябрь 2000–2010 гг.).

Заклучение

В настоящее время на автоморфных участках ландшафта в техногенном редколесье почти все хвойные деревья погибли – остались единичные особи, но возросло количество лиственных деревьев и кустарников высотой 1,5–3 м. Встречаются ветровальные ели без коры и мелких ветвей, не имеющие визуальных признаков гниения. Напочвенный покров трансформировался, увеличилась площадь, на которой органогенный горизонт почв (лесная подстилка) смыт тальми и дождевыми водами. Почва эродирована до минеральных горизонтов. На пологих склонах долины ручья, примыкающих к пушицевому болоту, произрастают ель, ерник, кустарниковые формы ив и берез. Такому развитию растительности, возможно, способствует поступление питательных элементов с внутрпочвенным склоновым стоком. Ранее было показано, что ельники, функционирующие в транзитных ландшафтах, имеют большую массу "живого вещества", чем в автономных, за счет поступления питательных веществ с боковым поверхностным и внутрпочвенным стоком [15].

Когда лесная подстилка не получает свежего опада вследствие разрушения древесного яруса и напочвенного покрова, то органогенный горизонт уже не скрепляется живыми корнями и со временем становится бесструктурным органическим материалом, который смывается тальми и дождевыми водами с возвышенных участков рельефа и скапливается в микропонижениях. В таких местах (при отсутствии застойного увлажнения) органический материал может быть источником питательных веществ для растительности, даже если в просачивающихся через эти скопления водах содержания меди и никеля в сотни раз превышают их фоновые показатели, а также при условии многократного доминирования

концентрации кальция над содержанием Cu и Ni в этих водах. Рекогносцировочное обследование территории в 2014 и 2016 гг. показало, что в зоне разрушенных лесов и техногенных пустошей, как правило, где есть проточная вода и существуют выходы подземных вод в виде родников, развивается растительность, начинается возобновление лиственных и хвойных пород деревьев.

Библиографический список

1. Горная энциклопедия : в 5 т. / редкол. Е. А. Козловский (гл. ред.) [и др.]. М. : Советская энциклопедия, 1984. Т. 2 : Геосферы – Кеная. 1986. 575 с.
2. Пименова Е. В. Химические методы анализа в мониторинге водных объектов. Пермь : Пермская ГСХА, 2011. 138 с.
3. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М. : Недра, 1998. 367 с.
4. Shvartsev S. L. Geochemistry of groundwater in the main landscape zones of the Earth // *Geochemistry International*. 2008. V. 46, Iss. 13. P. 1285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702908130016>.
5. Глазовская М. А. Принципы классификации природных геосистем по устойчивости к техногенезу и прогнозные ландшафтно-геохимическое районирование // *Устойчивость геосистем : сб. статей*. М. : Наука, 1983. С. 61–78.
6. Гуревич В. И., Дейч А. Е., Чижиков В. В., Яковлева Т. В. Некоторые новые способы и методы опробования, анализа и интерпретации результатов при гидрогеохимических поисках сульфидного медно-никелевого оруденения / *Вопросы геологии, минералогии и геохимии изверженных и метаморфических комплексов Кольского полуострова : (Расшир. тезисы докладов на сессии Учен. совета Геол. ин-та, посвящ. 80-летию со дня рождения С. М. Кирова. 28–30 марта 1966 г.)*. Апатиты : [б. и.], 1967. С. 121–130.
7. Нежданова И. К., Свешников Г. Б., Суетин Ю. П. Опыт гидрогеохимических исследований в Мончегорском районе // *Вопросы геофизики*. 1969. (Ученые записки Ленингр. гос. ун-та; № 346. Сер. физических и геологических наук; Вып. 19). С. 94–106.
8. Poznyakov V. Ya. The "Severonikel" smelter complex: History of development // *Aerial pollution in the Kola Peninsula : Proceedings of the international workshop / Eds. Kozlov M. V., Haukioja E., Yarmishko V. T. April 14–16, 1992, St. Petersburg*. Апатиты : KSC, 1993. P. 16–19.
9. Евдокимова Г. А., Калабин Г. В., Мозгова Н. П. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия воздушных выбросов комбината "Североникель" // *Почвоведение*. 2011. № 2. С. 261–268.
10. Evtugina Z. A., Guseva N. V., Kopylova J. G., Vorobeva D. A. Chemical composition of natural waters of contaminated area: The case for the Imandra Lake catchment (the Kola Peninsula) // *All-Russian Scientific Conference with International Participation on Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoecology in Eurasia. Tomsk, 23–27 November 2015. Tomsk, 2016. V. 33. Conference Series: Earth and Environmental Science*. URL: <http://toc.proceedings.com/30271webtoc.pdf>.
11. Лукина Н. В., Никонов В. В. Состояние еловых биогеоценозов Севера в условиях техногенного загрязнения / под ред. А. И. Уткина. Апатиты : КНЦ РАН, 1993. 134 с.
12. Кашулина Г. М. Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона = *Aerotechnogenic transformation of soils in Subarctic European region : в 2 ч. / под ред. В. Н. Переверзева*. Апатиты : КНЦ РАН, 2002. 2 ч.
13. Евтюгина З. А. Роль еловых биогеоценозов Кольского полуострова в формировании кислотности и состава природных вод в условиях промышленного воздушного загрязнения : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16. СПб., 1997. 25 с.
14. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения = *Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution : в 2 ч. / под ред. С. В. Зонна*. Апатиты : КНЦ РАН, 1996. 2 ч.
15. Манакон К. Н., Никонов В. В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л. : Наука : Ленингр. отд-ние, 1981. 196 с.
16. Пономарева В. В. Условия водноминерального питания растений, типы растительности и почвообразование // *География, генезис и плодородие почв : сб. науч. трудов. Вып. V. Л. : Колос, 1972. С. 24–57*.
17. Ушакова Г. И. Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского полуострова. Апатиты : КНЦ РАН, 1997. 150 с.
18. Никонов В. В., Лукина Н. В., Кашулина Г. М. Запас подстилки ельников кустарничково-зеленомошных в зоне влияния горно-металлургического производства // *Изучение целинных и окультуренных почв Мурманской области / отв. ред. В. Н. Переверзев*. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1987. С. 5–15.
19. Кожина В. С., Семиколенных А. А. Скорости и характерные времена разложения древесного опада в темнохвойных лесах Северного Урала (Печеро-Илычский заповедник) // *Разнообразие лесных почв и биоразнообразие лесов : сб. материалов V Всерос. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием (памяти проф. Л. О. Карпачевского и проф. А. С. Владыченского)*, Пушино, 24–27 сентября 2013 г. Пушино : ИФХ и БПП РАН, 2013. С. 78–80.

20. Лизиметр цилиндрический : пат. на полезную модель 127090 Рос. Федерация / Евтюгина З. А. № 2012136605/13 ; заявл. 27.08.2012 ; опубл. 20.04. 2013, Бюл. № 11.
21. Переверзев В. В. Современные почвенные процессы в биогеоценозах Кольского полуострова. М. : Наука, 2006. 149 с.
22. Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов И. Ю. Методы анализа природных вод. 3-е изд., доп. и перераб. М. : Недра, 1970. 488 с.
23. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. А. Д. Семенова. Л. : Гидрометеоиздат, 1977. 541 с.
24. Пономарева В. В. К вопросу о кислотно-основных свойствах лизиметрических вод в подзолистых почвах // Почвоведение. 1973. № 5. С. 128–134.
25. Горшков Г. П., Якушова А. Ф. Общая геология. 3-е изд. М. : МГУ, 1973. 592 с.
26. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / ред. Ю. Е. Саэт. М. : Мир, 1989. 436 с.
27. Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера / отв. ред. В. Н. Переверзев. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 268 с.
28. Евтюгина З. А., Асминг В. Э. Особенности формирования состава инфильтрационных вод в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 73–80.
29. 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 : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. Семей, 4–8 октября 2012 г. Семей : Семипалатинский государственный педагогический ин-т, 2012. Т. II. С. 76–78.

References

1. Gornaya entsiklopediya [Mountain encyclopedia] : v 5 t. / redkol. E. A. Kozlovsky (gl. red.) [i dr.]. M. : Sovetskaya entsiklopediya, 1984. V. 2 : Geosfery – Kenay. 1986. 575 p.
2. Pimenova E. V. Himicheskie metody analiza v monitoringe vodnyh ob'ektov [Chemical methods of analysis in monitoring water bodies]. Perm : Permskaya GSHA, 2011. 138 p.
3. Shvartsev S. L. Gidrogeohimiya zony gipergeneza [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. M. : Nedra, 1998. 367 p.
4. Shvartsev S. L. Geochemistry of groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. 2008. V. 46, Iss. 13. P. 1285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702908130016>.
5. Glazovskaya M. A. Printsipy klassifikatsii prirodnyh geosistem po ustoychivosti k tehnogenezu i prognoznnoe landshaftno-geohimicheskoe rayonirovanie [Principles of classification of natural geosystems for resistance to technogenesis and predictive landscape and geochemical zoning] // Ustoychivost geosistem : sb. statey. M. : Nauka, 1983. P. 61–78.
6. Gurevich V. I., Deych A. E., Chizhikov V. V., Yakovleva T. V. Nekotorye novye sposoby i metody oprobovaniya, analiza i interpretatsii rezultatov pri gidrogeohimicheskikh poiskakh sulfidnogo medno-nikelevogo orudneniya [Some new methods for testing, analyzing and interpreting the results of hydrogeochemical searches for sulfide copper-nickel mineralization] / Voprosy geologii, mineralogii i geohimii izverzhennyh i metamorficheskikh kompleksov Kolskogo poluostrova : (Rasshir. tezisy dokladov na sessii Uchen. soveta Geol. in-ta, posvyasch. 80-letiyu so dnya rozhdeniya S. M. Kirova. 28–30 marta 1966 g.). Apatity : [b. i.], 1967. P. 121–130.
7. Nezhdanova I. K., Sveshnikov G. B., Suetin Yu. P. Opyt gidrogeohimicheskikh issledovaniy v Monchegorskom rayone [Experience of hydrogeochemical research in the Monchegorsk district] // Voprosy geofiziki. 1969. (Uchenye zapiski Leningr. gos. un-ta; N 346. Ser. fizicheskikh i geologicheskikh nauk; Vyp. 19). P. 94–106.
8. Poznyakov V. Ya. The "Severonikel" smelter complex: History of development // Aerial pollution in the Kola Peninsula : Proceedings of the international workshop / Eds. Kozlov M. V., Haukioja E., Yarmishko V. T. April 14–16, 1992, St. Petersburg. Apatity : KSC, 1993. P. 16–19.
9. Evdokimova G. A., Kalabin G. V., Mozgova N. P. Soderzhanie i toksichnost tyazhelyh metallov v pochvah zony vozdeystviya vozdushnyh vybrosov kombinata "Severonikel" [The content and toxicity of heavy metals in the soils of the zone of impact of air emissions of the "Severonikel" smelter complex] // Pochvovedenie. 2011. N 2. P. 261–268.
10. Evtjugina Z. A., Guseva N. V., Kopylova Yu. G., Vorobeva D. A. Chemical composition of natural waters of contaminated area: The case for the Imandra Lake catchment (the Kola Peninsula) // All-Russian Scientific Conference with International Participation on Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeocology in Eurasia. Tomsk, 23–27 November 2015. Tomsk, 2016. V. 33. Conference Series: Earth and Environmental Science. URL: <http://toc.proceedings.com/30271webtoc.pdf>.

11. Lukina N. V., Nikonov V. V. Sostoyanie elovyh biogeotsenzov Severa v usloviyah tehnogennoho zagryazneniya [State of spruce biogeocenoses of the North in conditions of technogenic pollution] / pod red. A. I. Utkina. Apatity : KNTs RAN, 1993. 134 p.
12. Kashulina G. M. Aerotehnogennaya transformatsiya pochv evropeyskogo subarkticheskogo regiona [Aerotechnogenic transformation of soils in Subarctic European region] : v 2 ch. / pod red. V. N. Pereverzeva. Apatity : KNTs RAN, 2002. 2 ch.
13. Evtyugina Z. A. Rol elovyh biogeotsenzov Kolskogo poluostrova v formirovani kislrotnosti i sostava prirodnyh vod v usloviyah promyshlennogo vozduzhnogo zagryazneniya [The role of spruce biogeocenoses of the Kola Peninsula in forming acidity and composition of natural waters in industrial air pollution] : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.16. SPb., 1997. 25 p.
14. Lukina N. V., Nikonov V. V. Biogehimicheskie tsikly v lesah Severa v usloviyah aerotehnogennoho zagryazneniya [Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution] : v 2 ch. / pod red. S. V. Zonna. Apatity : KNTs RAN, 1996. 2 ch.
15. Manakov K. N., Nikonov V. V. Biologicheskii krugovorot mineralnyh elementov i pochvoobrazovanie v elnikah Kraynego Severa [Biological circulation of mineral elements and soil formation in spruce forests of the Far North]. L. : Nauka : Leningr. otd-nie, 1981. 196 p.
16. Ponomareva V. V. Usloviya vodnomineralnogo pitaniya rasteniy, tipy rastitelnosti i pochvoobrazovanie [Conditions of water-mineral nutrition of plants, types of vegetation and soil formation] // Geografiya, genesis i plodorodie pochv : sb. nauch. trudov. Vyp. V. L. : Kolos, 1972. P. 24–57.
17. Ushakova G. I. Biogehimicheskaya migratsiya elementov i pochvoobrazovanie v lesah Kolskogo poluostrova [Biogeochemical migration of elements and soil formation in the forests of the Kola Peninsula]. Apatity : KNTs RAN, 1997. 150 p.
18. Nikonov V. V., Lukina N. V., Kashulina G. M. Zapas podstilki elnikov kustarnichkovozelenomoshnyh v zone vliyaniya gorno-metallurgicheskogo proizvodstva [Stock of litter spruce shrubby-green in the zone of influence of mining and metallurgical production] // Izuchenie tselinnyh i okulturenyh pochv Murmanskoy oblasti / otv. red. V. N. Pereverzev. Apatity : Kol. fil. AN SSSR, 1987. P. 5–15.
19. Kozhina V. S., Semikolennyh A. A. Skorosti i harakternyie vremena razlozheniya drevesnogo otpada v temnohvoynyh lesah Severnogo Urala (Pechero-Ilyichskiy zapovednik) [Velocities and characteristic times of decomposition of woody fall in dark coniferous forests of the Northern Urals (Pechero-Ilychsky Reserve)] // Raznoobrazie lesnyh pochv i bioraznoobrazie lesov : sb. materialov V Vseros. konf. po lesnomu pochvovedeniyu s mezhdunar. uchastiem (pamyati prof. L. O. Karpachevskogo i prof. A. S. Vladychenskogo), Puschino, 24–27 sentyabrya 2013 g. Puschino : IFH i BPP RAN, 2013. P. 78–80.
20. Lizimetr tsilindricheskii [Lysimeter cylindrical] : pat. na poleznuyu model 127090 Ros. Federatsiya / Evtyugina Z. A. N 2012136605/13 ; zayavl. 27.08.2012 ; opubl. 20.04. 2013, Byul. N 11.
21. Pereverzev V. V. Sovremennyye pochvennyie protsessy v biogeotsenzah Kolskogo poluostrova [Modern soil processes in biogeocenoses of the Kola Peninsula]. M. : Nauka, 2006. 149 p.
22. Reznikov A. A., Mulikovskaya E. P., Sokolov I. Yu. Metody analiza prirodnyh vod [Methods of natural waters' analysis]. 3-e izd., dop. i pererab. M. : Nedra, 1970. 488 p.
23. Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnyh vod sushi [Guidelines for the chemical analysis of surface waters] / pod red. A. D. Semenova. L. : Gidrometeoizdat, 1977. 541 p.
24. Ponomareva V. V. K voprosu o kislотно-osnovnyh svoystvah lizimetricheskikh vod v podzolistykh pochvah [To the question of the acid-base properties of lysimetric waters in podzolic soils] // Pochvovedenie. 1973. N 5. P. 128–134.
25. Gorshkov G. P., Yakushova A. F. Obschaya geologiya [General Geology]. 3-e izd. M. : MGU, 1973. 592 p.
26. Kabata-Pendias A., Pendias H. Mikroelementy v pochvah i rasteniyah [Microelements in soils and plants] / red. Yu. E. Saet. M. : Mir, 1989. 436 p.
27. Evdokimova G. A. Ekologo-mikrobiologicheskie osnovy ohrany pochv Kraynego Severa [Ecological-microbiological basis of protection of soils in the Far North] / otv. red. V. N. Pereverzev. Apatity : KNTs RAN, 1995. 268 p.
28. Jevtjugina Z. A., Asming V. E. Osobennosti formirovaniya sostava infiltratsionnyh vod v usloviyah aerotehnogennoho zagryazneniya [Features of formation of the composition of infiltration water in conditions of aerotechnogenic pollution] // Vestnik MGTU. 2013. V. 16, N 1. P. 73–80.
29. Evtyugina Z. A., Gorbacheva T. T. Tyazhelye metally v rodnikovykh vodah na territorii vozdeystviya vybrosov predpriyatiya tsvetnoy metallurgii [Heavy metals in spring waters in the territory of the impact of emissions from a non-ferrous metallurgy enterprise] // Tyazhelye metally i radionuklidy v okruzhayushey srede : materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. : v 2 t. Semey, 4–8 oktyabrya 2012 g. Semey : Semipalatinskii gosudarstvennyi pedagogicheskii in-t, 2012. V. II. P. 76–78.

Сведения об авторах

Евтюгина Зинаида Анатольевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Кольский филиал ФИЦ "Единая геофизическая служба Российской академии наук", канд. биол. наук, науч. сотрудник; e-mail: zina_evt@mail.ru;
ул. Ферсмана, 50а, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209; Апатитский филиал Мурманского государственного технического университета, доцент

Jevtjugina Z. A. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Kola Branch of Geophysical Survey RAS; Cand. of Biol. Sci., Researcher; e-mail: zina_evt@mail.ru;
50a, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Murmansk State Technical University, Apatity Branch, Associate Professor

Копылова Юлия Григорьевна – пр. Ленина, 30, г. Томск, Россия, 634050; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Научно-образовательный центр "Вода", канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: unpc_voda@mail.ru

Kopylova Yu. G. – 30, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050; National Research Tomsk Polytechnic University, Scientific and Educational Centre "Water", Cand. of Geol. & Miner. Sci., Senior Researcher; e-mail: unpc_voda@mail.ru

Гусева Наталья Владимировна – пр. Ленина, 30, г. Томск, Россия, 634050; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, канд. геол.-минерал. наук; e-mail: guseva24@yandex.ru

Guseva N. V. – 30, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050; National Research Tomsk Polytechnic University, Cand. of Geol. & Miner. Sci.; e-mail: guseva24@yandex.ru

Z. A. Jevtjugina, Yu. G. Kopylova, N. V. Guseva

On formation of substance flows in aerotechnogenically degraded forest landscape

A retrospective analysis of the formation of substance flows in aerotechnogenically degraded forest landscape has been carried out based on the results of testing the atmospheric, soil and stream waters in the vicinity of the Severonickel Combine. The composition of the stream waters draining the aerotechnologically transformed landscape is compared in the period of the greatest volumes of the plant's emissions (1987–1990) with the chemical composition of the stream waters in 2014 and 2016. The current composition of the watercourse is determined using ion chromatography, potentiometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. The influence of forest litter of different stages of decomposition on the structure of waters infiltrating into mineral horizons of soils has been shown. The decrease in Ni concentrations in the litter on the fallow as compared to Ni in atmospheric precipitation is not reliable, however the Ni flow (mg/m^2) from the litter is reduced. The Cu flux from the litter on the fallow is almost eight times less than the atmospheric flow of Cu. In the zone of intensive exposure to emissions in the absence of stagnant moistening, the organic material can be a source of nutrients for vegetation, even if the Cu and Ni content in the waters seeping through this material is hundreds of times higher than their baseline values, but under the condition of multiple dominance of Ca concentration above the content of Cu and Ni in these waters. On steep slopes where the soil is eroded to mineral horizons, and moisture cannot be retained in the biologically active area of the landscape, the development of vegetation is impossible without meliorative measures. A reconnaissance survey of the territory has shown that in the zone of destroyed forests and technogenic wastelands, in areas where there is running water and there are outcrops of groundwater in the form of springs, vegetation develops, renewal of deciduous and coniferous trees begins. In the stream waters draining the aerotechnologically transformed landscape the concentrations of SO_4^{2-} , Cl^- and K have decreased, and HCO_3^- and Si have increased. Concentrations of Ni and Cu and Al, Fe, Mn as well according to the Mann – Whitney test have not changed. It has been assumed that this is due to increasing the size of man-made wastelands in the autonomous positions of the landscape.

Key words: Severonikel industrial complex, dead wood, soil water, litter, transformed forest landscape.