

УДК 624.131.41

## Геоэкологическая обстановка водоемов в зоне влияния ГМК "Печенганикель"

В.А. Даувальтер<sup>1,2</sup>, А.А. Канищев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты*

<sup>2</sup> *Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии*

**Аннотация.** Пылевые выбросы горно-металлургического комбината "Печенганикель" и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников являются главными источниками повышенных концентраций Ni, Cu, Co и Zn в воде и поверхностных слоях донных отложений озер, расположенных близко к источнику загрязнения. Донные отложения озер, удаленных на расстояние более 40 км к югу от комбината "Печенганикель", загрязнены этими тяжелыми металлами незначительно. Повышенные концентрации высокотоксичных халькофильных элементов (Cd, Hg, Pb и As) обнаружены в верхних слоях отложений почти всех исследованных озер.

**Abstract.** Dust emissions of heavy metals and wastewater from melting furnaces, slime pits, tailing dumps, and mines of the Pechenganikel Plant are main sources of increased concentrations of Ni, Cu, Co and Zn in the water column and the top layers of sediments of lakes close to the sources. The sediments in lakes located 40 km farther south of the Pechenganikel Plant are contaminated by these heavy metals only slightly. Increased concentrations of high-toxic chalcophile elements (Cd, Hg, Pb and As) have been recorded in the upper layers of the sediments in almost all investigated lakes.

### 1. Введение

Кольский Север в силу уникальности и богатства минерально-сырьевых ресурсов имеет огромный промышленный потенциал. Промышленное освоение территорий Кольского полуострова началось в 30-40 гг. XX столетия. Мурманская область обеспечивает преобладающую часть потребности России в фосфатных рудах, редкоземельных металлах и многих других видах минерального сырья. Кроме этого ведется добыча медно-никелевых, железных и хромитовых руд и других полезных ископаемых. На базе разведанных месторождений действуют горно-обогатительные предприятия, являющиеся градообразующими для городов Апатиты, Кировск (ОАО "Апатит"), Заполярный, Никель, Мончегорск (ОАО "Кольская ГМК"), Оленегорск (ОАО "Олкон"), Ковдор (ОАО "Ковдорский ГОК", ОАО "Ковдорслюда"), поселков Енский (ОАО "Чалмозеро"), Риколатва (ОАО "Мусковит"), в которых проживает треть населения области.

В настоящее время на сравнительно небольшой территории Кольского полуострова сосредоточены крупные горно-перерабатывающие и металлургические предприятия, построена АЭС, созданы города и поселки. В последние годы в хозяйственный оборот вовлекаются все новые территории, что приводит к увеличению нагрузки на экосистемы. Следует подчеркнуть, что характерной особенностью северных экосистем является низкая способность к самовосстановлению. Вместе с тем, каждый вид природопользования предъявляет свои требования к качеству и количеству природных ресурсов и оказывает разное по своему уровню негативное воздействие на окружающую природную среду.

Наиболее сильно подвержены воздействию человека и его хозяйственной деятельности водные источники, особенно внутренние водоемы. Деятельность металлургических комплексов на Кольском Севере приводит к повышенному содержанию ряда металлов, которые поступают как в составе пылевых выбросов, так и в составе сточных вод. В качестве примера в работе рассматривается влияние ГМК "Печенганикель" на состояние поверхностных вод и донных отложений. Установлено, что пылевые выбросы металлургического комбината и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников являются главными источниками повышенных концентраций Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Hg в поверхностных слоях донных отложений (Даувальтер, 1997).

Металлы поступают в водные экосистемы с территории водосбора и с атмосферными осадками. Содержание растворенных форм в воде озер невелико. Они адсорбируются взвешенными частицами, оседающими на дно и образующими донные отложения озер. Металлы могут также захватываться и непосредственно донными отложениями. Следовательно, донные отложения озер могут рассматриваться как информационная система для оценки экологического состояния окружающей среды, в том числе и для установления степени загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами (Даувальтер, 2002).

Проблема загрязнения поверхностных вод тяжелыми металлами приобретает все большую актуальность вследствие их токсичности, способности длительное время задерживаться в экосистемах и накапливаться в телах гидробионтов. Наряду с загрязнением тяжелыми металлами происходит закисление территории водосборов. Это приводит к повышению мобильности тяжелых металлов в экосистеме и увеличению токсичности и биоаккумуляции (Моисеенко и др., 1996). В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы, связанные с изучением закономерности распределения тяжелых металлов в поверхностных водотоках под влиянием сточных вод и атмосферных выбросов горно-металлургических предприятий.

Целью работы является оценка геоэкологического состояния поверхностных вод в районе антропогенного влияния ГМК "Печенганикель" по результатам исследований химического состава воды и донных отложений озер северо-запада Мурманской области.

## 2. Материалы и методы

В работе были использованы результаты исследований водных объектов на приграничной с Норвегией территории России в Печенгском районе, проведенных сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в период 2002-2005 гг. Объектами исследований в основном были водоемы (более 20 озер) водосбора реки Пасвик, вытекающей из оз. Инари (крупнейшее озеро Финляндской Лапландии). Река Пасвик является пограничной рекой между Россией и Финляндией, а затем Россией и Норвегией. Отбор проб воды и донных отложений на водоемах проводился, главным образом, в летне-осенние месяцы.

Пробы воды на химический анализ отбирались с поверхностного и придонного горизонтов исследуемых озер пластиковым батометром объемом 2 л. Пробы донных отложений отбирались колонкой открытого гравитационного типа (внутренний диаметр 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой и в полевых условиях разделялись на 1-см слои. Отборник, изготовленный из плексигласа по образцу, разработанному Скогхеймом (Skogheim, 1979), позволял транспортировать колонки в лабораторию ненарушенными для дальнейшего использования. В пробах воды и донных отложений определялись концентрации элементов, в том числе и тяжелых металлов, методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии после обработки концентрированной азотной кислотой (в донных отложениях). Пробы анализировались в лаборатории ИППЭС КНЦ РАН. Все аналитические методики определения основных гидрохимических параметров приведены в соответствие международным стандартам (Лурье, 1984).

## 3. Результаты и обсуждение

Гидрохимические параметры, наряду с климатическими, географическими, ландшафтными и геологическими условиями конкретных водосборов, определяют природное состояние водных экосистем. Загрязнение водных объектов, вызывая изменения в физическом и химическом состоянии воды, приводит к нарушению экологического баланса системы. Поэтому первоочередной задачей при оценке устойчивости экосистем является оценка качества поверхностных вод и распределение гидрохимических параметров.

При исследовании процессов трансформации качества вод под воздействием техногенных факторов, а также при оценке их современного состояния большой проблемой является определение природного состояния данных водоемов. Зачастую данные об их состоянии в "доиндустриальный период" отсутствуют. Поэтому, учитывая большую природную вариабельность качества поверхностных вод Кольского полуострова, довольно трудно судить о роли того или иного предприятия в формировании современного качества вод (Кашулин и др., 2005).

### 3.1. Гидрохимия водоемов

Более чем полувековая деятельность ГМК "Печенганикель", сопровождающаяся большими объемами сброса сточных вод с повышенным содержанием тяжелых металлов и поступлением загрязняющих веществ аэротехногенным путем, привела к изменению естественных геохимических циклов элементов и формированию гидрохимических аномалий в непосредственной близости от источников загрязнения природных вод. Изучение уровней содержания загрязняющих веществ и закономерностей перераспределения элементов при движении потока загрязненных вод является необходимым условием для обоснованного прогнозирования качества природных вод.

**Минерализация и главные ионы.** Сточные воды горно-перерабатывающих и металлургических предприятий вносят в водоемы тысячи тонн минеральных солей, что приводит к изменению природного соотношения основных ионов. В озерах, расположенных в непосредственной близости от площадок ГМК "Печенганикель", наблюдается высокая минерализация: в озерах вблизи пос. Приречный – 87 мг/л, в расположенных вблизи г. Никель озерах LN2 – 179 мг/л и Куэтсъярви – 72 мг/л. По мере удаления от места сброса сточных вод и атмосферных выбросов происходит

закономерное снижение минерализации воды (рис. 1). Так, в остальных водоемах отмечается природная минерализация вод, характерная для большинства водоемов Кольского полуострова (в среднем 20 мг/л, в диапазоне от 4.5 до 46.2 мг/л) (Моисеенко и др., 1996).

Поступление промышленных сточных вод в водоем не только увеличивает общее содержание солей в водоеме, но также может привести к перераспределению содержания основных ионов. Для природных вод Кольского Севера типичен следующий порядок распределения главных ионов:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ;  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$ . Многолетнее поступление сточных вод привело к изменению соотношения ионов. В озерах, расположенных вблизи комбината "Печенганикель", основные ионы по значимости распределяются следующим образом:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ ;  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , т.е. вода в настоящее время соответствует сульфатному классу (рис. 1).

В остальных водоемах состав исследуемых вод в основном соответствует природному распределению и относится к классу гидрокарбонатных вод. Сопоставление содержания катионов показывает, что в большинстве водоемов преобладающим катионом является  $\text{Ca}^{2+}$ , и на его долю приходится от 16 до 71 % в катионном составе. Значительно меньшая вариабельность наблюдается по  $\text{Na}^+$  (0.79-4.69 мг/л),  $\text{Mg}^{2+}$  (0.2-9.68 мг/л),  $\text{K}^+$  (0.19-3.09 мг/л). В распределении главных ионов в воде исследуемых озер отмечается увеличение содержания по мере приближения к комбинату "Печенганикель" (рис. 1).

**Водородный показатель.** В исследуемом районе водородный показатель воды изменялся от 4.64 до 7.21 единиц pH. Реакция вод в большинстве водоемов слабокислая. Наименьшие значения отмечены в озерах вблизи пос. Приречный, который расположен в 40 км на юг от Никеля, и в придонном слое оз. Виртуовошьяур. С удалением от комбината "Печенганикель" значения pH уменьшаются (рис. 1), т.е. пылевые выбросы комбината оказывают подщелачивающее влияние на воду исследуемых озер вследствие большого содержания в составе пыли щелочных и щелочноземельных металлов. Подобная закономерность была отмечена в озерах вблизи Воркутинского промышленного района (Даувальтер, 2004).

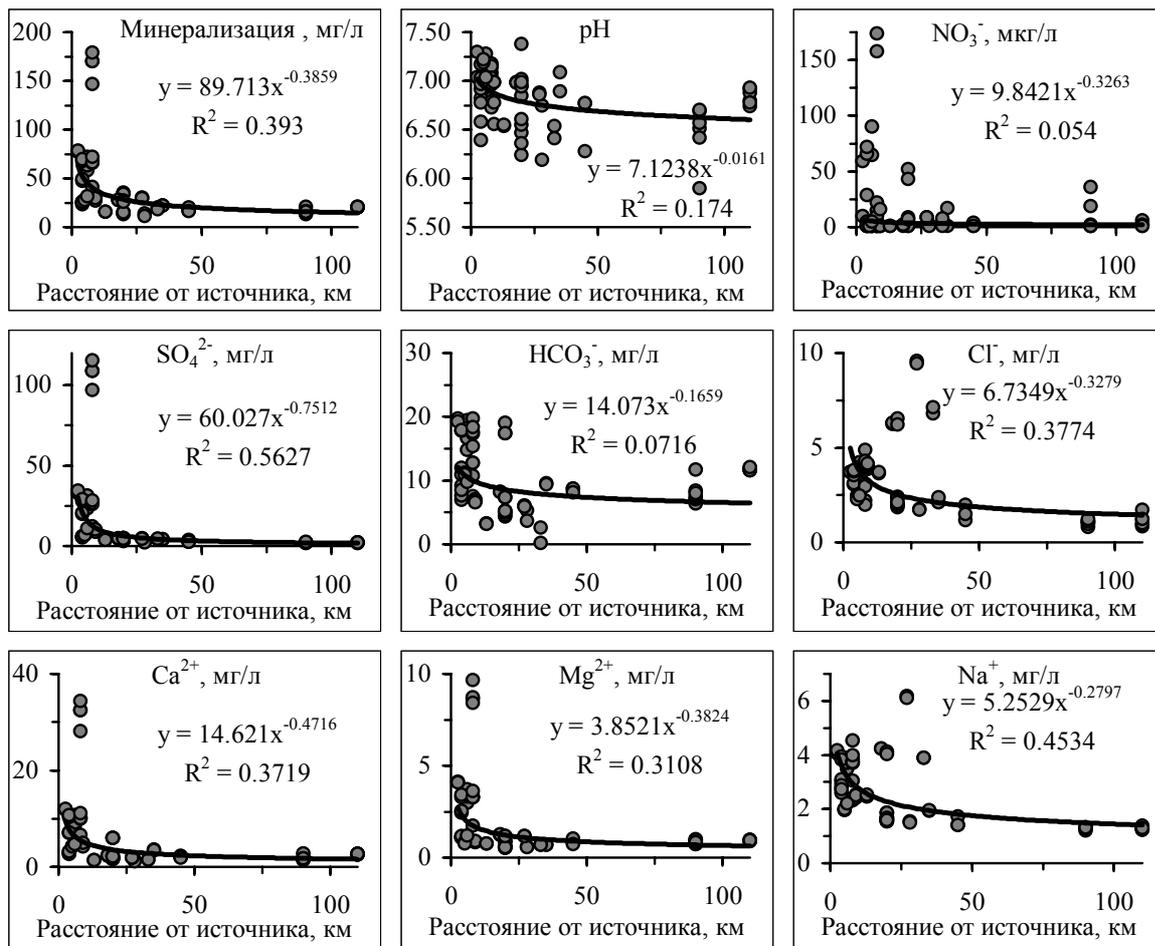


Рис. 1. Распределение величин общей минерализации, pH и содержания главных ионов (мг/л) в воде исследуемых озер по мере удаления от комбината "Печенганикель"

**Биогенные элементы.** Азот и фосфор, относящиеся к биогенным элементам, являются составной частью всех клеток живых организмов. Концентрации этих элементов в воде и их режим целиком или частично зависят от интенсивности биохимических и биологических процессов, происходящих в водоемах, и в значительной мере определяют биологическую продуктивность водоема (Моисеенко, 2002).

В природных водах фосфор присутствует в виде растворенных неорганических и органических соединений, а также в виде взвесей неорганического и органического происхождения. Анализ данных по содержанию общего фосфора в водоемах показал, что содержание этого элемента соответствует природному во всех районах исследования, кроме озера вблизи пос. Приречный и оз. Куэтсъярви, где средняя концентрация фосфора достигает 65 и 31 мкг/л соответственно.

Азот в поверхностных водах содержится в виде ряда неорганических (нитритные, нитратные и аммонийные ионы) и разнообразных органических соединений. Для олиготрофных водоемов содержание общего азота находится обычно в пределах 300-700 мкг/л. Колебания значений общего азота в исследуемых водоемах составляют 83-422 мкг/л, в среднем 206 мкг/л. Вблизи комбината "Печенганикель" отмечается увеличение содержания азотных соединений (рис. 1), что связано не только с атмосферными выбросами, но также и с поступлением хозяйственно-бытовых стоков населенных пунктов и промышленных предприятий в исследуемые водоемы.

**Органическое вещество.** Содержание органического вещества в водной среде оценивалось по показателю перманганатной окисляемости, характеризующей легкоокисляемое органическое вещество и обеспечивающей наибольшую степень окисления в воде. Для исследуемого района величина перманганатной окисляемости изменяется в пределах от 2.4 до 16.5 мг/л. Высокие значения характерны для озер вблизи пос. Приречный. Среднее содержание органического вещества в период исследований составляло 6.2 мг/л.

**Цветность.** Цветность вод в озерах, являющаяся косвенным показателем привнесенного с водосбора аллохтонного органического вещества, изменяется в пределах от 3 до 63°Pt.

**Металлы.** Приоритетными загрязняющими веществами с токсичным эффектом для исследуемых водоемов являются тяжелые металлы. Поступление сточных вод промышленных предприятий, содержащих значительные количества загрязняющих веществ, привело к тому, что в настоящее время содержание этих элементов в некоторых водоемах Печенгского района превышает принятые условно-фоновые значения и предельно допустимые концентрации для воды водоемов рыбохозяйственного назначения (ПДК<sub>рбхз</sub>).

**Тяжелые металлы** являются одними из главных компонентов сточных вод и воздушных выбросов медно-никелевого комбината "Печенганикель". Принятые в России ПДК<sub>рбхз</sub> для Ni и Cu – 10 и 1 мкг/л соответственно. Исследования показали, что наибольшие концентрации Ni наблюдались в водоемах, расположенных в непосредственной близости к городам Никель и Заполярный (80-340 мкг/л) и пос. Приречный (до 1400 мкг/л). В водоемах, удаленных от комбината, содержание Ni в воде изменяется от 0.2 до 34 мкг/л (рис. 2). Концентрация Cu в воде исследуемых водоемов составляет 0.2-46 мкг/л. Максимальные концентрации отмечены в озере вблизи пос. Приречный и озерах LN3 и Куэтсъярви. В весенний период из оз. Куэтсъярви в р. Пасвик Ni и Cu поступает в 2 раза больше, чем в летний и осенний периоды (Моисеенко и др., 1996). Содержание таких элементов, как Co, Zn, Pb, Cr, Cd, незначительно и очень редко превышает ПДК<sub>рбхз</sub>. Концентрации практически всех тяжелых металлов (кроме Pb) в воде исследуемых озер снижаются по мере удаления от комбината "Печенганикель" (рис. 2).

**Алюминий** поступает в водоемы, как и практически все тяжелые металлы, в составе сточных вод промышленных предприятий и хозяйственно-бытовых стоков. Для этого металла отмечается иная картина распределения. Высокие концентрации Al наблюдаются как на значительном расстоянии, так и вблизи комбината. Максимальные значения отмечены в оз. Куэтсъярви (до 221 мкг/л) и озере вблизи г. Заполярный (178 мкг/л). В среднем концентрация Al в исследованных водоемах составляет 45.1 мкг/л, что незначительно превышает ПДК<sub>рбхз</sub> (40 мкг/л).

**Железо.** В большинстве водоемов среднее содержание Fe изменяется в пределах 12.7-314 мкг/л. Максимальные концентрации Fe (510-520 мкг/л) отмечены в придонных горизонтах оз. Виртуовошъяур и в оз. Куэтсъярви. В весенний период в реках концентрации Fe превышают установленные для России ПДК<sub>рбхз</sub> (100 мкг/л) за счет значительного поступления с водосборной площади. В период весеннего половодья концентрации Al и Fe в оз. Куэтсъярви в 5 раз превышают концентрации в летний период.

**Марганец.** Содержание Mn также изменяется в широких пределах (1.1-94.4 мкг/л). Максимальные концентрации Mn наблюдаются в придонных горизонтах оз. Виртуовошъяур, удаленного на юго-запад от комбината "Печенганикель" на расстояние 90 км. Средняя концентрация Mn в исследуемых озерах равна 17 мкг/л, что превышает значение ПДК<sub>рбхз</sub> для Mn (10 мкг/л).

**Стронций.** Содержание этого щелочноземельного металла находится в пределах от 2 до 214 мкг/л. Максимальные концентрации отмечены в водоемах, расположенных в районе п. Никель и г. Заполярный. Вероятно, Sr выбрасывается в атмосферу в составе пылевых выбросов. Средняя концентрация Sr в воде исследуемых водоемов равна 40 мкг/л. Этот металл в силу своего сродства с Ca при повышенных концентрациях в воде способен замещать его в скелете гидробионтов, что приводит к различным патологиям, таким как сколиоз (искривление позвоночника) у рыб (Кашулин и др., 1999).

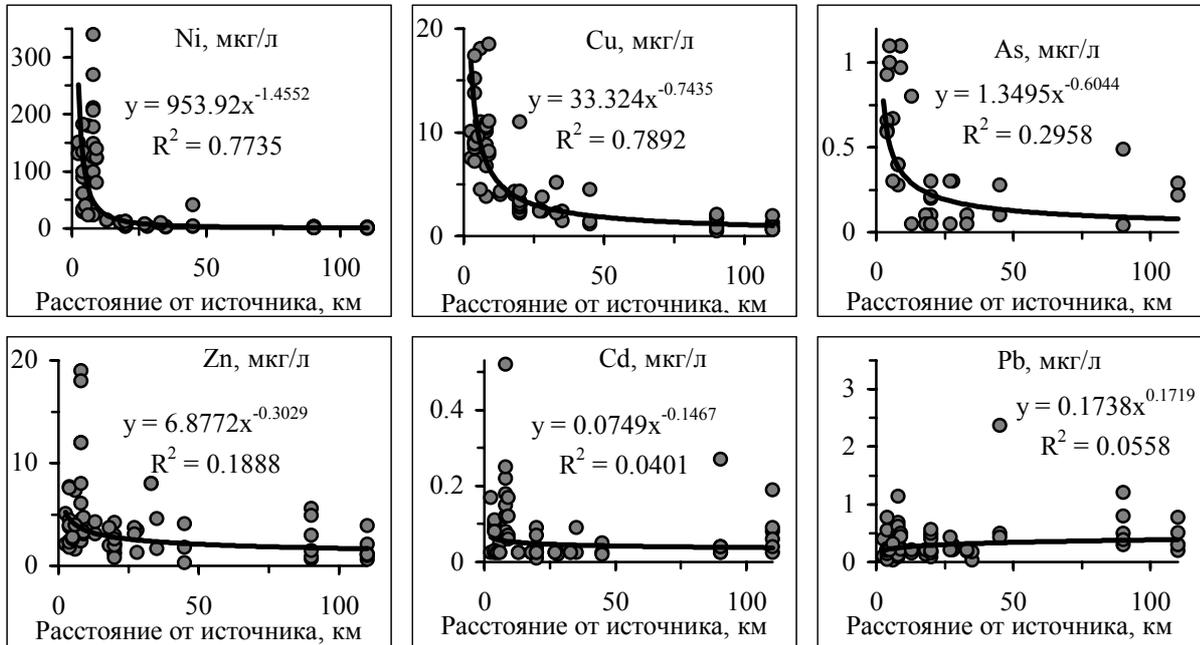


Рис. 2. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов (мкг/л) в воде исследуемых озер по мере удаления от комбината "Печенганикель"

### 3.2. Химический состав донных отложений водоемов

Для оценки аккумуляции и распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер Печенгского района рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации; 2) вертикальное распределение; 3) концентрации в поверхностных донных отложениях; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, создаваемого тяжелыми металлами, накопленными в донных отложениях.

**Фоновые концентрации тяжелых металлов в донных отложениях.** Изучение фоновых концентраций тяжелых металлов в донных отложениях является одним из центральных вопросов при исследовании загрязнения озер. Образцы донных отложений, отобранные из самых глубоких слоев колоннок (обычно более 20 см), позволяют получить фоновые концентрации тяжелых металлов при исследовании загрязнения озер. Эти слои, согласно ранее проведенным исследованиям (Rognerud et al., 1992), образовались более двух столетий назад, т.е. до начала индустриального развития Северной Фенноскандии.

Фоновые концентрации тяжелых металлов отражают геохимические особенности территории водосбора, позволяют получить количественные значения степени загрязнения водных объектов и определить аномалии с целью поисков месторождений полезных ископаемых.

Максимальные фоновые значения тяжелых металлов отмечены в донных отложениях озер Куэтъярви, Сальмиярви и других озерах, расположенных вблизи месторождений медно-никелевых руд (территория комбината "Печенганикель"). Фоновые концентрации Cu, Ni, Zn, Co в этих озерах в 2-10 раз больше, чем в других. Эти повышенные концентрации, вероятно, связаны с геохимическими и морфометрическими особенностями как водосборов, так и самих озер.

В озерах, расположенных в непосредственной близости к городу Заполярный и пос. Приречный, также зафиксировано значительное увеличение фоновых концентраций Cu, Ni, и Zn, что связано с разнообразием геологического строения коренных и четвертичных пород, слагающих водосборы озер.

В основном средние фоновые концентрации изучаемых металлов в водоемах Печенгского района (табл.) подобны средним фоновым концентрациям для озер Кольского полуострова (Даувальтер, 2006). Фоновые концентрации тяжелых металлов в донных отложениях исследуемых озер довольно непостоянны, что отражает значительные вариации в геохимии коренных и четвертичных пород и покрывающих их почв, т.е. всех условий формирования химического состава донных отложений озер.

Таблица. Средние, минимальные, максимальные фоновые концентрации тяжелых металлов (в мкг/г сухого веса) и стандартное отклонение в донных отложениях исследуемых озер

Значение	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	33.2	41.2	96.5	16.3	0.168	3.2	4.6	0.040
Минимальное	9.0	11.9	47.4	4.3	0.055	0.7	0.7	0.003
Максимальное	67.9	214	161	40.3	0.400	9.2	13.7	0.111
Стандартное отклонение	18.2	44.8	31.1	10.5	0.088	2.5	4.2	0.025

Долговременная антропогенная нагрузка на водосборы озер привела к изменению природных условий формирования химического состава донных отложений. Следовательно, фоновые концентрации тяжелых металлов играют важную роль при определении влияния индустриальной деятельности на водные экосистемы.

**Вертикальное распределение тяжелых металлов в донных отложениях.** Исследования толщи донных отложений позволяют восстановить историю событий, происходивших на территории водосбора конкретного озера. Они помогают проводить обоснованную оценку изменений поступлений элементов за большой промежуток времени. Эти исследования крайне актуальны для территорий с высокоразвитой горно-металлургической промышленностью, где существует аномальное распределение тяжелых металлов вследствие геохимических особенностей и влияния загрязнения (Даувальтер, 1997).

Поверхностные слои донных отложений отражают аккумулирующий эффект аэротехногенной нагрузки металлов на водосборы, которая зачастую может быть не зарегистрирована гидрохимическими методами. Пылевые выбросы в атмосферу плавильных цехов металлургических комбинатов являются главным источником повышенных концентраций Ni, Cu и Co (в 10-380 раз больше фоновых значений) в поверхностных слоях донных отложений на расстоянии до 30-40 км. Данные элементы имеют тесную положительную корреляцию между собой, что свидетельствует о едином источнике их поступления и сходных путях миграции.

Вариации содержания микроэлементов в донных отложениях водоемов за последние 60-70 лет могут быть обусловлены, главным образом, изменениями в атмосферных выпадениях элементов. Увеличение концентраций Ni и Cu в донных отложениях озер северной Финноскандии датируется 30-40-ми годами XX столетия и связано с началом горно-металлургической деятельности на территории Печенгского района (рис. 3). С увеличением расстояния от металлургических комбинатов уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях донных отложений, и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Более высокие концентрации Pb в донных отложениях, в основном, не связаны с выбросами плавильных. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX вв. С увеличением расстояния от металлургических комбинатов Pb становится одним из основных загрязнителей. Co, Cu и Ni поступают в атмосферу с выбросами металлургических комбинатов и далее выпадают на территорию водосборов озер.

Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат As и Cd (рис. 3). Начало загрязнения As и Cd датируется серединой XIX в. Это загрязнение связано с развитием промышленности в Европе и России и воздушным трансграничным переносом загрязняющих веществ в высокие широты. Освоение северных территорий и дальнейшее развитие промышленности в Европе сказалось в следующем увеличении концентраций As и Cd в начале текущего столетия. Резкое повышение концентраций As (на порядок по сравнению с фоновыми слоями) и Cd в середине XX в. связано с развитием промышленности в послевоенные годы.

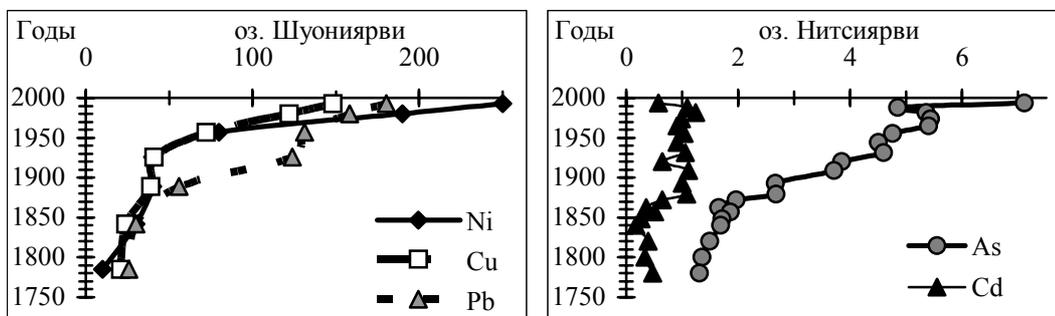


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций Ni, Cu, Pb, As и Cd (мкг/г сухого веса) в датированных донных отложениях оз. Шуониярви (20 км юго-западнее комбината "Печенганикель") и оз. Нитсиярви (90 км юго-западнее комбината "Печенганикель")

Концентрации Ni, Cu и Co в верхних 3-7 см донных отложений значительно выше, чем фоновые значения. Начиная с глубины 7 см, наблюдается увеличение содержаний глобальных загрязнителей окружающей среды Европейской субарктики – Pb и Cd. По мере удаления от источников концентрации в верхних слоях значительно уменьшаются, и разница между содержаниями в верхних и нижних слоях становится меньше. Выявлено уменьшение содержания тяжелых металлов в колонках донных отложений озер с увеличением глубины слоев донных отложений в озерах, расположенных на расстоянии до 50 км от комбината "Печенганикель".

**Распределение тяжелых металлов в поверхностных слоях донных отложений.** Большая часть тяжелых металлов, входящих в состав выбросов и стоков промышленных предприятий, связывается и остается в донных отложениях. Пылевые выбросы в атмосферу комбината "Печенганикель" и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников являются главными источниками повышенных концентраций Ni, Cu, Co, Cd, Zn и Hg в поверхностных слоях донных отложений озер Печенгского района. Вода в большинстве водоемов района относится к слабокислым, что усиливает токсичные свойства металлов.

Наибольшие концентрации Ni и Cu, превышающие фоновые значения в 10-25 раз отмечены в озерах на расстоянии до 10 км от комбината (рис. 4). Значительное уменьшение концентраций до 3-7 фоновых значений наблюдается на расстоянии до 20-30 км от источника загрязнения.

В распределении Zn, Co и Cd наблюдается аналогичная закономерность. Наиболее интенсивно загрязняется зона до 10 км. Здесь отмечено превышение концентраций металлов над фоновыми значениями от 2 до 5 раз. По мере удаления от комбината на 20-30 км наблюдается уменьшение концентраций металлов до 2-3 фоновых значений. В распределении As и Hg наблюдается та же закономерность.

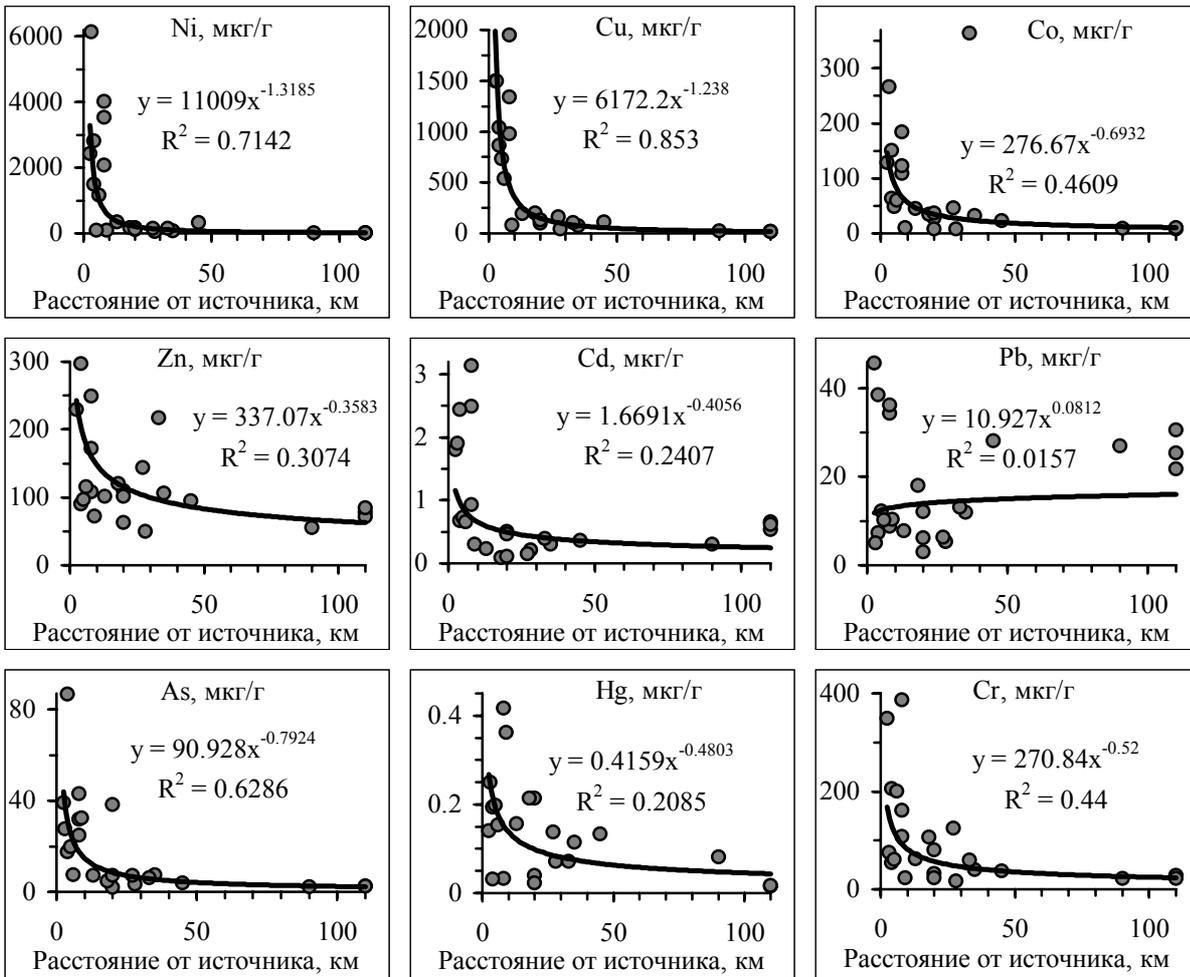


Рис. 4. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов (мкг/г сухого веса) в поверхностном слое (0-1 см) донных отложений исследуемых озер по мере удаления от комбината "Печенганикель"

В распределении Pb отмечена отличная от всех тяжелых металлов картина – небольшое увеличение концентраций в поверхностных донных отложениях по мере удаления от комбината, что свидетельствует о том, что ГМК "Печенганикель" – не единственный источник загрязнения свинцом.

В целом, наиболее загрязненными являются озера, расположенные непосредственно вблизи комбината "Печенганикель". Это озера Куэтсьярви, LN2, LN3, расположенные в 10-км зоне, получающие основную часть стоков комбината и характеризующиеся максимальными концентрациями Ni, Cu, Co, Cd и Hg в поверхностных слоях донных отложений.

Далее по мере удаления от комбината на 20-25 км отмечается уменьшение концентраций Ni, Cu, Co и других металлов. Озера Каскамаярви, Пороярви, Кеудшерьяур и Трифоноярви характеризуются умеренным и значительным загрязнением.

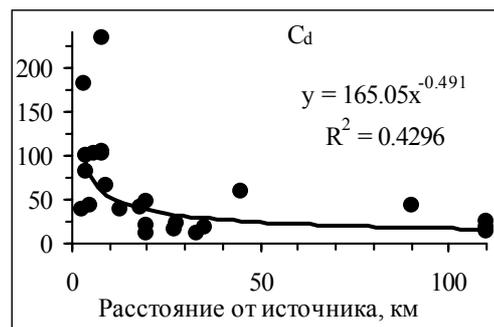
Анализ территориального распределения тяжелых металлов в поверхностных донных отложениях исследуемых озер показал, что ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg совпадают и ограничиваются 40-км локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержания Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, Cd также является глобальным загрязнителем.

**Оценка геоэкологического состояния водоемов.** Для оценки геоэкологического состояния поверхностных вод нами была выбрана методика определения коэффициента и степени загрязнения, предложенная шведским ученым Л. Хокансоном (Håkanson, 1980). Методика была адаптирована для условий Европейской субарктики с учетом выявленных закономерностей формирования химического состава донных отложений, фоновых содержаний элементов в донных отложениях. Коэффициент загрязнения ( $C_f^j$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента или соединения в поверхностном сантиметровом слое к доиндустриальному фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих веществ.

В этом подходе придерживались следующей классификации  $C_f^j$ :  $C_f^j < 1$  – низкий;  $1 \leq C_f^j < 3$  – умеренный;  $3 \leq C_f^j < 6$  – значительный;  $C_f^j \geq 6$  – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемую коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации (из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам: Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg):  $C_d < 8$  – низкая;  $8 \leq C_d < 16$  – умеренная;  $16 \leq C_d < 32$  – значительная;  $C_d \geq 32$  – высокая степень загрязнения, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Высокие значения  $C_d$  отмечены в исследуемых озерах на расстоянии до 30 км от источников загрязнения, а значительные значения – до 50 км (рис. 5), причем озера, расположенные по преобладающему направлению господствующих ветров (к северо-западу от комбината), имеют большие значения  $C_d$ . В озерах, расположенных до 30 км, основной вклад в величину  $C_d$  вносят металлы, в больших количествах выбрасываемые в атмосферу комбинатом "Печенганикель" (Ni, Cu, Co), а в более удаленных озерах основными загрязняющими элементами становятся Pb, Cd, Hg и As, которые в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов.

Рис. 5. Распределение значений степени загрязнения ( $C_d$ ) в озерах на различном расстоянии от комбината "Печенганикель"



#### 4. Заключение

Функционирование горно-металлургического комплекса в Печенгском районе в течение более 70 лет привело к загрязнению озер сточными водами и атмосферными выбросами, содержащими газы и пылевые составляющие, в том числе и тяжелые металлы в повышенных концентрациях. Анализ антропогенной нагрузки в этом районе на водоемы позволяет выделить три основных блока, влияющих на изменение гидрохимического состава и аккумуляцию элементов, главным образом тяжелых металлов, в донных отложениях:

1. Сточные воды предприятий горно-металлургического комплекса (оз. Куэтсъярви, р. Пасвик). Их поступление в водоемы сопровождается загрязнением хозяйственно-бытовыми стоками, что активизирует адсорбцию и седиментацию тяжелых металлов.

2. Аэротехногенное загрязнение аэрозольными выбросами медно-никелевых производств, содержащих тяжелые металлы. Пылеватые выбросы выпадают вблизи промышленных центров, их растворение в воде сопровождается повышением уровня тяжелых металлов в воде и донных отложениях.

3. Воздушное загрязнение кислотообразующими веществами (сернистым газом и окисями азота) и ионными формами металлов, распространяющимися на значительные расстояния. Закисление водоемов способствует переходу металлов из донных отложений в водную толщу, в наиболее токсичные ионные формы. Несмотря на низкие концентрации, токсичные эффекты тяжелых металлов в кислой среде увеличиваются.

## Литература

- Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Researches*, v.14, p.975-1001, 1980.
- Rognerud S., Norton S.A., Dauvalter V.** Heavy metal pollution in lake sediments in border areas between Russia and Norway. *Oslo, NIVA*, Report 522/93, 20 p., 1993.
- Skogheim O.K.** Rapport fra Arungenprosjektet. *Oslo, As-NLH*, Report 2, 7 p., 1979.
- Даувальтер В.А.** Влияние воздушных выбросов Воркутинского промышленного района на химический состав озерных донных отложений. *Водные ресурсы*, т.31, № 6, с.721-725, 2004.
- Даувальтер В.А.** Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, № 6, с.43-53, 1997.
- Даувальтер В.А.** Оценка экологического состояния поверхностных вод по результатам исследований химического состава донных отложений. *Мурманск, МГТУ*, 88 с., 2006.
- Даувальтер В.А.** Факторы формирования химического состава донных отложений. *Мурманск, МГТУ*, 75 с., 2002.
- Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Сандимиров С.С., Раткин Н.Е., Кудрявцева Л.П., Королева И.М., Вандыш О.И., Мокротоварова О.И.** Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Часть 1: Ковдорский район. *Апатиты, КНЦ РАН*, 234 с., 2005.
- Кашулин Н.А., Лукин А.А., Амундсен П.-А.** Рыбы пресных вод субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. *Апатиты, КНЦ РАН*, 142 с., 1999.
- Лурье Ю.Ю.** Аналитическая химия промышленных сточных вод. *М., Химия*, 446 с., 1984.
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильяшук Б.П., Ильяшук Е.А., Сандимиров С.С., Каган Л.Я., Вандыш О.И., Шаров А.Н., Шарова Ю.Н., Королева И.М.** Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. *М., Наука*, 487 с., 2002.
- Моисеенко Т.И., Родюшкин И.В., Даувальтер В.А., Кудрявцева Л.П.** Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера). *Апатиты, КНЦ РАН*, 263 с., 1996.