

УДК 624.131.41

Прогнозирование долговременных изменений пресноводных региональных систем рыбного хозяйства Арктики

В.А. Даувальтер^{1,2}, Н.А. Кашулин¹

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН*

² *Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии*

Аннотация. Проведены исследования экологического состояния озер северо-запада Мурманской области и приграничных районов Норвегии и Финляндии. Выявлена тенденция усиления антропогенной нагрузки на водосборы озер и на сами озера, несмотря на снижение в последние 20 лет выбросов и стоков загрязняющих веществ комбинатом "Печенганикель". Высокая степень накопления тяжелых металлов в наземных и водных экосистемах и длительность периода их самоочищения позволили сделать прогноз: интенсивное поступление тяжелых металлов в водоемы будет продолжаться даже при условии резкого снижения или полного прекращения выбросов комбинатом в окружающую среду вредных веществ, что отрицательно скажется на воспроизводстве рыбных запасов.

Abstract. Researches of ecological status of lakes of Northwest of the Murmansk region and frontier areas of Norway and Finland have been carried out. Despite of decrease of emissions and drainages of polluting substances by the "Pechenganickel" Company for last 20 years the tendency of amplification of anthropogenic loading on watersheds of lakes has been revealed. The high degree of accumulation of heavy metals in terrestrial and aquatic ecosystems and the length of their self-cleaning have led to the prediction: an intense flow of heavy metals in the water will continue even if a sharp decrease or complete cessation of hazardous substances' emissions in the environment take place. These emissions will negatively affect on reproduction of fish stocks.

Ключевые слова: прогнозирование, пресноводные экосистемы, накопление, тяжелые металлы, озера, донные отложения, ихтиофауна
Key words: forecasting, freshwater ecosystems, accumulation, heavy metals, lakes, sediments, ichthyofauna

1. Введение

Европейский Север всегда ассоциировался с большим количеством рек и озер с чистой водой, в которых обитают ценные виды рыб и беспозвоночных. Водные ресурсы Севера играют важнейшую роль в экономике региона и жизни коренных народов. Однако глобальные изменения, происходящие на нашей планете, ухудшают качество северных водоемов. Бурный рост промышленности в XX столетии обусловил процессы глобального загрязнения окружающей среды. Для арктических и субарктических регионов приобретает все большую актуальность проблема оценки последствий и прогноз долговременного антропогенного загрязнения водоемов, расположенных как в импактных зонах промышленных предприятий, так и в фоновых районах.

В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии, в приполярные области переносится большая часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями более южных индустриально развитых регионов. Выбрасываемые в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на значительные расстояния, и выпадая, они медленно накапливаются непосредственно в водоемах и на территории их водосбора. Существенную роль играют и местные источники загрязнения: осаждаемая из атмосферы, вредные вещества постепенно накапливаются в наземных и пресноводных экосистемах и приводят к их деградации. Это относительно медленные процессы с точки зрения продолжительности человеческой жизни, но в геологическом плане это чрезвычайно стремительные процессы. За несколько десятилетий произошли существенные изменения гидрохимического режима поверхностных вод, химического состава донных отложений, структурно-функциональной организации биотических сообществ. Вместе с тем, в силу различий временных масштабов этих процессов, их регистрация вызывает определенные трудности.

Мурманская область является одним из наиболее индустриализованных районов Арктики. Трансграничный перенос загрязняющих веществ воздушными массами из индустриальных центров Европы, Америки и Азии, экстенсивное развитие местных источников загрязнения (горнодобывающие и горно-перерабатывающие, металлургические, энергетические предприятия, транспорт и т.д.) привели к резкому увеличению количества загрязняющих веществ, осаждающихся из атмосферы как непосредственно на водную поверхность, так и на территорию их водосборов. Водоемы являются своеобразными коллекторами загрязнений. Большая часть попадающих на территорию водосбора загрязняющих веществ в конечном итоге оказываются в водных экосистемах, даже если они и были включены в биогеохимические циклы наземных экосистем. Среди различных видов антропогенного

воздействия на окружающую среду выбросы металлургических комбинатов, несущие огромное количество кислотных окислов и различных металлов, представляют наибольшую опасность для пресноводных экосистем Арктики и Субарктики. Низкая минерализация вод этого региона обуславливает их высокую уязвимость к данному виду воздействия (Мoiseenko и др., 1996; 2002; Кашулин, 2004; Кашулин и др., 1999; 2005; 2007; 2008; *State of the Environment...*, 2007; Kashulin et al., 2008). Учитывая многочисленные источники, широкое распространение, множественные эффекты воздействия металлов в биологических системах, загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами справедливо считают одним из самых опасных последствий деятельности человека. Они обладают высокой токсичностью, потенциальной способностью накапливаться в живых организмах, не разлагаются и способны длительное время циркулировать в биологических системах (Мур, Рамамурти, 1987; Зейлер, 1993; Blevins, Pancorbo, 1985; Nriagu, 1990; Sorensen, 1992).

Накопление циркулирующих в пресноводных экосистемах загрязняющих веществ приводит к их постепенной деградации. Регистрация этих процессов и оценка биологических последствий с помощью традиционных гидрохимических методов бывает затруднена в силу ряда обстоятельств (Кашулин и др., 1999). 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. Учитывая большую природную вариабельность качества поверхностных вод Кольского п-ова, довольно трудно судить о роли того или иного предприятия в формировании современного качества вод (Кашулин и др., 2005). Поэтому в настоящее время, наряду с проведением геохимических исследований вод и донных отложений для оценки качества водоемов используются биологические индикаторы, позволяющие оценить последствия долговременных субтоксичных воздействий на пресноводные экосистемы (Кашулин и др., 2005). Рыбы в силу биологических особенностей являются наиболее подходящими объектами, отражающими процессы трансформации водоемов. Ихтиологические исследования позволяют установить неблагоприятные эффекты всего комплекса различных воздействий, включая и воздействие на другие компоненты водной экосистемы (среда обитания, беспозвоночные, первичная продукция и т.д.), на основании их зависимости от этих компонентов в процессах воспроизводства, выживания и роста (Кашулин, 2004).

2. Объекты и методы исследований

Примером многолетних комплексных исследований, включающих геохимические (гидрохимия и химический состав донных отложений), гидробиологические и ихтиологические исследования, является приграничный район между Россией, Норвегией и Финляндией (Kashulin et al., 2008). Водные системы на приграничной территории разделяются на два типа: большая водная система озеро Инари – река Пасвик, а также многочисленные малые озера и реки. Водораздел этой водной системы является основной пресноводной системой в регионе, площадь озера около 1250 км², а его водосборная площадь – 18404 км². Река берет начало в Финляндии, протекает по небольшому участку российской территории, а затем служит границей между Россией и Норвегией на протяжении 120 км. Данный водораздел имеет большое природное значение и обладает богатыми природными ресурсами. Рыбные ресурсы являются объектом промышленной добычи, используются в натуральном рыбном хозяйстве, а также в рекреационном рыболовстве.

В течение более 20 лет сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН проводятся исследования экологического состояния водоемов Мурманской области и приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией (рис. 1). Эти исследования велись в три этапа с разницей примерно в 10 лет: в конце 80-х – начале 90-х гг. прошлого века, в начале 2000-х гг. и в 2010 г. В каждый период исследования проводились на 20-30 озерах, находящихся в зоне влияния стоков и выбросов комбината "Печенганикель" и подвергающихся антропогенной нагрузке различной интенсивности. В озерах производился отбор проб воды, донных отложений, гидробионтов, в том числе фито- и зоопланктон, зообентос и ихтиофауна. Методика отбора проб и проведения анализа описана ранее (Руководство..., 1977; *Standard...*, 1975; Даувальтер, 1999; Кашулин и др., 2005).

3. Результаты и обсуждение

Более чем шестидесятилетняя деятельность ГМК "Печенганикель", сопровождающаяся сбросом большого объема сточных вод с повышенным содержанием загрязняющих веществ и поступлением их аэротехногенным путем, привела к изменению естественных геохимических циклов элементов и формированию геохимических аномалий вблизи источников загрязнения природных вод. В озерах, расположенных в непосредственной близости от площадок ГМК "Печенганикель", наблюдается высокая минерализация. В их числе озера вблизи пос. Приречный (87 мг/л), озера LN2 (179 мг/л) и Куэтсьярви

(72 мг/л), расположенные вблизи г. Никель. По мере удаления от места сброса сточных вод и атмосферных выбросов происходит закономерное снижение минерализации воды. Так, в остальных водоемах отмечается природная минерализация вод, характерная для большинства водоемов Кольского п-ова (в среднем 20 мг/л, в диапазоне от 4.5 до 46.2 мг/л).

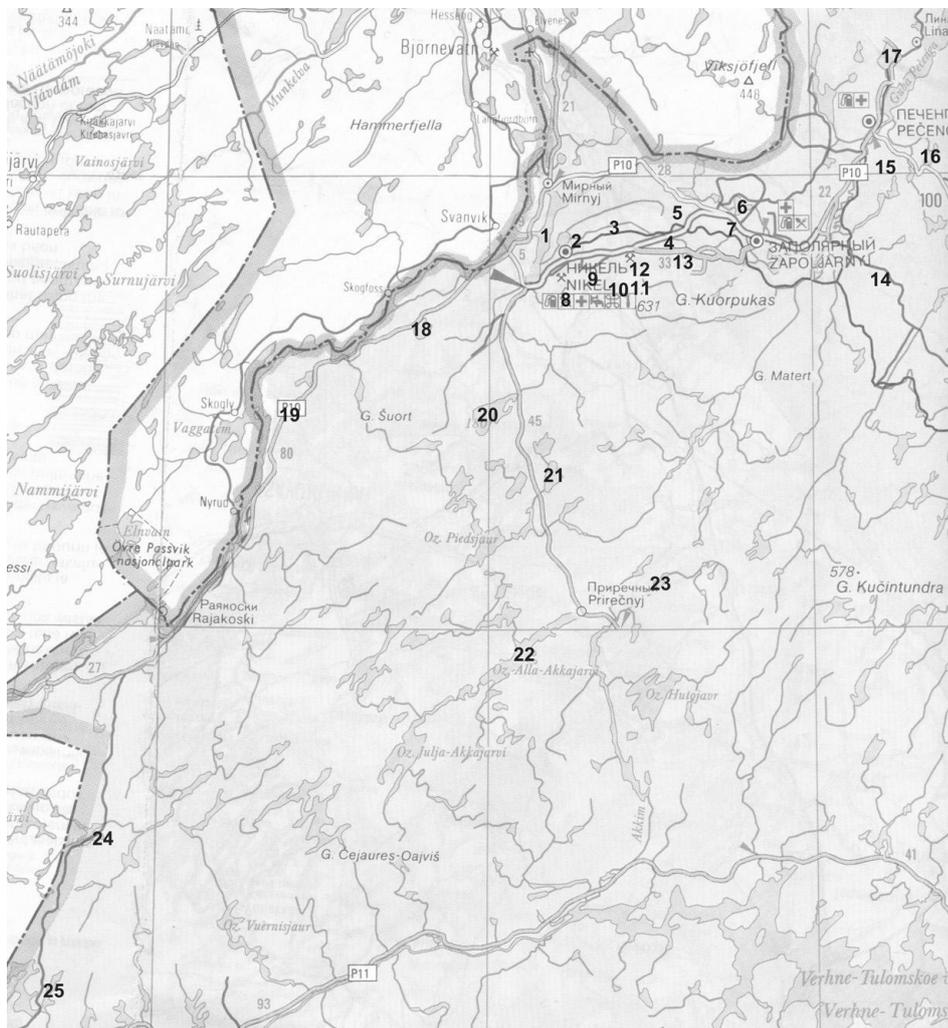


Рис. 1. Расположение исследуемых российских озер (2010 г.):

- 1 – Куэтсьярви, 2 – Великаямпиньярви, 3 – LN-2, 4 – LN-3, 5 – Степановиньярви, 6 – Палоярви, 7 – Хаукилампи, 8 – Песчаное, 9 – Хоисуярви, 10 – Куорпукасъярви, 11 – Иля-Соукерьярви, 12 – Ала-Соукенярви, 13 – Сариярви, 14 – Пику-Хейниярви, 15 – Кирикованьярви, 16 – Сантаярви, 17 – Трифонарви, 18 – Пороярви, 19 – Нилиярви, 20 – Шуонияур, 21 – Кеудшерьяур, 22 – Алла-Аккаярви, 23 – Мауньявр, 24 – Виртуовощьяур, 25 – Кочьяур

Поступление промышленных сточных вод в водоем не только увеличивает общее содержание солей в водоеме, но может привести к перераспределению содержания основных ионов. Для природных вод Кольского Севера типичен следующий порядок распределения главных ионов: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$ (Моисеенко и др., 1996). 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.

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 Ca^{2+} и на его долю приходится от 16 до 71 % в катионном составе. Значительно меньшая вариабельность наблюдается по Na^+ (0.79-4.69 мг/л), Mg^{2+} (0.2-9.68 мг/л), K^+ (0.19-3.09 мг/л). В распределении главных ионов в воде исследуемых озер отмечается увеличение содержания по мере приближения к комбинату

"Печенганикель".

В исследуемом районе водородный показатель воды изменялся от 4.64 до 7.21 единиц рН. Реакция вод в большинстве водоемов слабкокислая. Наименьшие значения отмечены в озерах вблизи пос. Приречный, который расположен в 40 км на юг от Никеля, и в придонном слое оз. Виртуовошъяур. С удалением от комбината "Печенганикель" значения рН уменьшаются, т.е. пылевые выбросы комбината оказывают подщелачивающее влияние на воду исследуемых озер вследствие большого содержания в составе пыли щелочных и щелочноземельных металлов.

Основными 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 ПДК_{рбхз}.

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. Концентрация Cu в воде исследуемых водоемов составляет 0.2-46 мкг/л. Максимальные концентрации отмечены в озере вблизи пос. Приречный и в озерах LN3 и Куэтсьярви. В весенний период из оз. Куэтсьярви 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. Концентрации практически всех тяжелых металлов (кроме Pb) в воде исследуемых озер снижаются по мере удаления от комбината "Печенганикель". Алюминий, как и практически все тяжелые металлы, поступает в водоемы в составе сточных вод промышленных предприятий и хозяйственно-бытовых стоков. Для этих металлов отмечается иная картина распределения. Высокие концентрации Al наблюдаются как на значительном расстоянии, так и вблизи комбината. Максимальные значения отмечены в озерах Куэтсьярви (до 221 мкг/л) и Хаукилампи (178 мкг/л). В среднем концентрация Al в исследованных водоемах составляет 45.1 мкг/л. Содержание Sr 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.

Долговременная антропогенная нагрузка на водосборы озер привела к изменению природных условий формирования химического состава донных отложений. Результаты исследований толщи донных отложений позволяют восстановить историю событий, происходящих на территории водосбора конкретного озера. Средние скорости осадконакопления в озерах северо-запада Мурманской области и северных районов Норвегии и Финляндии за последние полтора столетия довольно постоянны и находятся в пределах 0.3-0.6 мм/год. Скорость осадконакопления в оз. Куэтсьярви находится в пределах от 1 до 2 мм/год. Отмечается увеличение содержания Ni, Cu и Co в донных отложениях озер – преимущественно в слоях, возраст которых по результатам проведенного датирования оценивается 20-ми – 30-ми гг. XX в., временем начала металлургической деятельности в регионе (рис. 2).

С увеличением расстояния от металлургических комбинатов уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях донных отложений, и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX вв. С увеличением расстояния от металлургических комбинатов Pb становится одним из основных загрязнителей. Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат также As и Cd. 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. Резкое повышение концентраций As (на порядок по сравнению с фоновыми слоями) и Cd в середине XX в. связано с развитием промышленности в послевоенные годы.

Поверхностные слои донных отложений отражают аккумулярующий эффект аэротехногенной нагрузки металлов на водосборы, которые зачастую могут не регистрироваться 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 антропогенном источнике их поступления и сходных путях миграции.

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

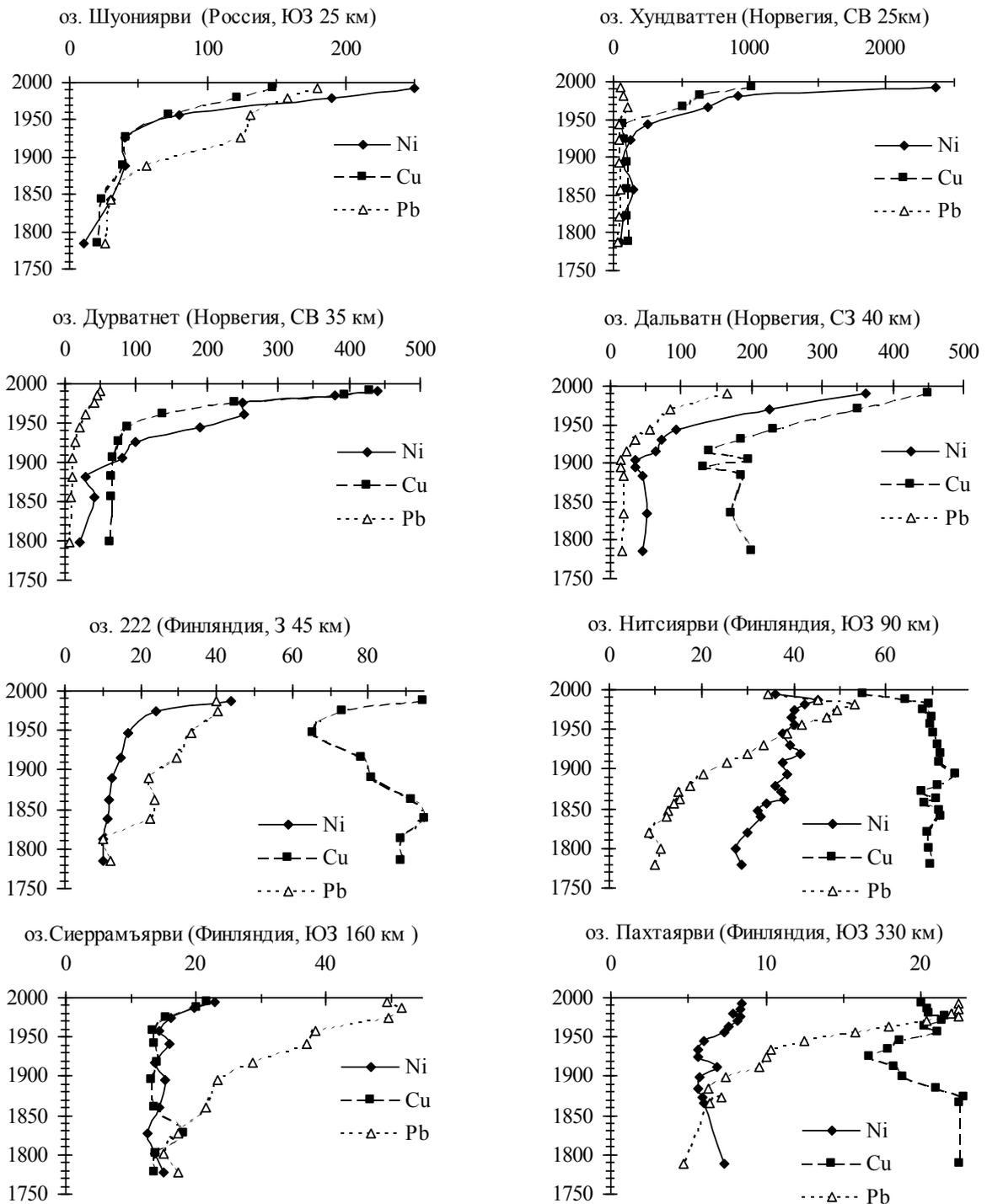


Рис. 2. Концентрации (мкг/г) Ni, Cu, Pb в датированных ДО озерах на различном удалении от комбината "Печенганикель"

В распределении Co и Cd наблюдается аналогичная закономерность (рис. 3). 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. Подобная закономерность наблюдается в распределении As и Hg. В распределении Pb по результатам исследований 2010 г. впервые отмечена тенденция увеличения содержания в поверхностных слоях ДО по мере приближения к комбинату. Ранее в региональном распределении Pb была отмечена отличная от всех ТМ картина – увеличение концентраций с востока на запад. В целом по результатам исследований 2010 г. отмечено увеличение концентраций практически всех загрязняющих ТМ в

поверхностных слоях ДО озер Мурманской области и приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией в сравнении с результатами исследований 2002-2004 и 1989-1993 гг. Данный факт свидетельствует об усилении антропогенной нагрузки на водосборы озер.

Для оценки экологического состояния поверхностных вод нами была выбрана методика определения коэффициента и степени загрязнения, предложенная шведским ученым Л. Хокансоном (*Håkanson*, 1980), и адаптирована для условий Европейской субарктики с учетом выявленных закономерностей формирования химического состава ДО, фоновых содержаний элементов в ДО.

Коэффициент загрязнения (C_f^i) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению. В этом подходе придерживались следующей классификации: C_f^i : $C_f^i < 1$ – низкий; $1 \leq C_f^i < 3$ – умеренный; $3 \leq C_f^i < 6$ – значительный; $C_f^i \geq 6$ – высокий коэффициент загрязнения.

Степень загрязнения (C_d) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех элементов. При характеристике степени загрязнения 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.

По результатам исследований ДО озер в 2010 г. очень высокие значения степени загрязнения (C_d) отмечены на расстоянии до 30 км от источников загрязнения, а значительные значения – до 60 км (рис. 4). В озерах, расположенных до 30 км от комбината "Печенганикель", основной составляющей величины C_d являются металлы, выбрасываемые в атмосферу комбинатом в больших количествах (Ni, Cu, Co), а в более удаленных озерах – Pb, Cd, Hg и As – элементы, которые в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих веществ. Исследованиями 2010 г. были получены результаты, подобные исследованиям 2002-2004 гг., но в последние годы выявлено усиление загрязнения, особенно в ближайшей 30-км зоне от комбината. По результатам исследований 1989-1993 гг. в озерах, находящихся в зоне влияния комбината "Печенганикель", очень высокие значения C_d отмечены на расстоянии до 10 км от источников загрязнения, значительные значения – до 15 км, а умеренные – до 40 км.

Атмосферные выпадения аэрозолей являются главной причиной загрязнения, в том числе и ТМ, наземных и водных экосистем, поверхностных и подземных вод (*Яхнин и др.*, 1997). В фоновых территориях, где в балансе атмосферных выпадений значительная роль принадлежит растворимым формам металлов, с поверхностным стоком выносятся до 5 % поступлений Pb и около 30 % поступлений Zn и Cd (*Елпатьевский*, 1993; *Кабата-Пендиас, Пендиас*, 1989). В условиях техногенного загрязнения, когда существенно увеличивается роль твердофазных выпадений, поверхностный вынос сокращается до 1-3 % поступлений Pb и до 10 % Zn и Cu (*Елпатьевский*, 1993). Остальная часть металлов накапливается в почве. Миграция металлов по почвенному профилю происходит со скоростью 0.1-0.4 см/год и характеризуется быстрым падением концентраций с увеличением глубины (*Елпатьевский*, 1993; *Саем и др.*, 1990; *Cernic et al.*, 1994). Возможности самоочищения почв от антропогенных накоплений металлов признаются весьма ограниченными (*Fridland et al.*, 1992; *De Vries, Banker*, 1996; *Miller, Fridland*, 1994). Совокупный вынос металлов (поверхностный сток, почвенные растворы, биологические процессы и др.) при условии прекращения новых поступлений из антропогенных источников обеспечит в зоне умеренного климата самоочищение загрязненных почв от Pb за период от 150-200 до 400-500 лет, от Zn, Cd – за 100-200 лет. В условиях субарктического региона этот период значительно больше. Таким образом, период естественного самоочищения почв и наземных экосистем от загрязняющих металлов можно оценить величиной порядка $n \cdot 10^2$ лет (т.е. сотни лет).

Функционирование горно-металлургического комплекса в Печенгском районе в течение более 70 лет привело к загрязнению озер сточными водами и атмосферными выбросами, содержащими газовые и пылевые составляющие, в том числе и тяжелые металлы, в повышенных концентрациях. Анализ антропогенной нагрузки на водоемы в этом районе 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. Куэтсьярви, р. Пасвик). Их поступление в водоемы сопровождается загрязнением хозяйственно-бытовыми стоками, что активизирует адсорбцию и седиментацию тяжелых металлов.

2. Аэротехногенное загрязнение пылеватыми 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 в ионные, наиболее токсичные формы из донных отложений, в водную толщу. Несмотря на низкие концентрации, токсичные эффекты тяжелых металлов в кислой среде увеличиваются.

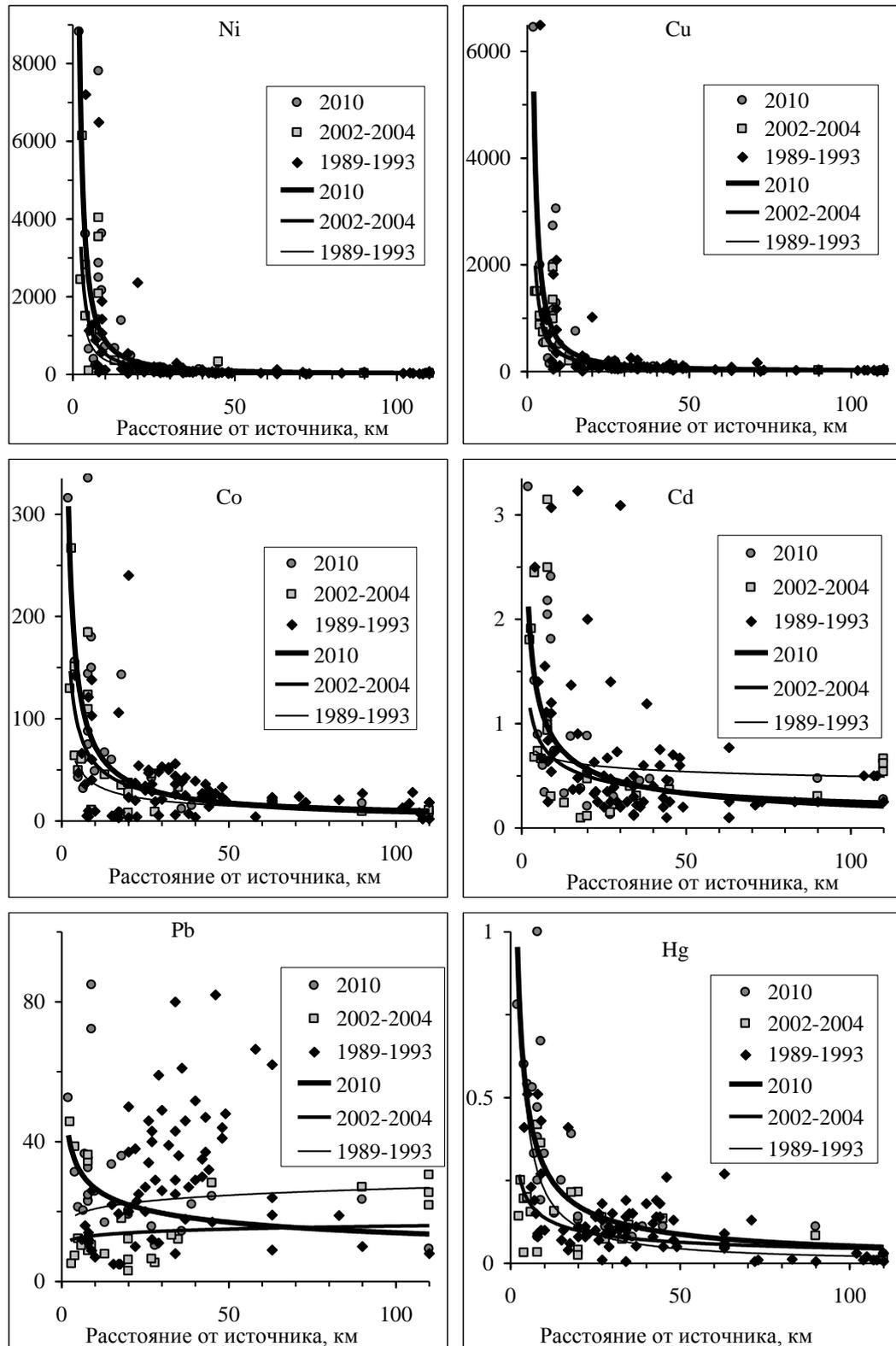


Рис. 3. Распределение концентраций ТМ (мкг/г сухого веса) в поверхностном слое (0-1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от комбината "Печенганикель" в разные годы

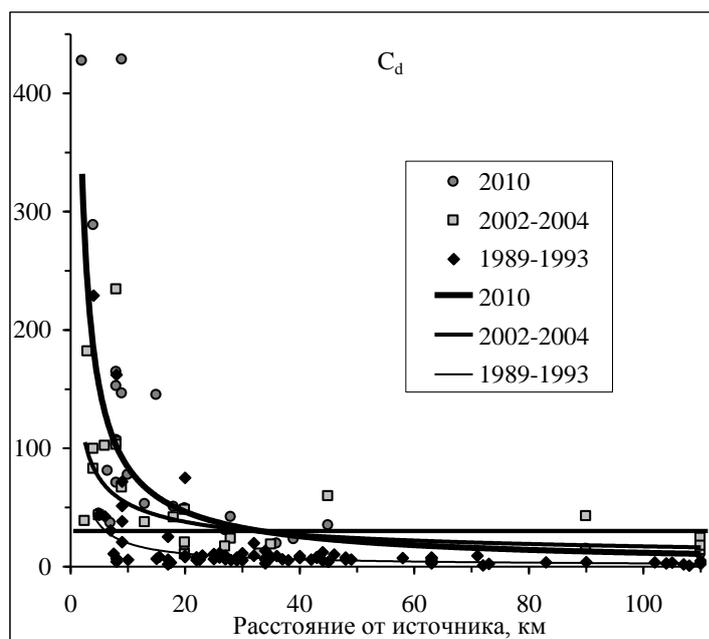


Рис. 4. Распределение значений степени загрязнения (C_d) в озерах на различном расстоянии от комбината "Печенганикель" в разные годы. Прямая линия соответствует высокой степени загрязнения ($C_d \geq 32$)

В составе ихтиофауны оз. Инари и системы р. Пасвик (Скрюккебухта, Бьернватен, Ваггетем, Хестефосс, Раякоски) распространены средне- и малотычинковый сига. Ряпушка, интродуцированная в оз. Инари, практически повсеместно распространена по всей р. Пасвик.

Размерно-весовые характеристики средне- и малотычинковых сегов р. Пасвик имеют тенденцию к росту в последовательности: Инари – Раякоски – Ваггетем, то есть вниз по течению реки. В дальнейшем вблизи предприятия "Печенганикель" в оз. Куэтсьярви размерно-весовые показатели снижаются и далее вновь возрастают по мере удаления водоема от источника загрязнения (Скрюккебухта). Анализ размерно-весовых распределений двух форм сига оз. Куэтсьярви, водохранилища Ваггетем и Скрюккебухта за последние годы демонстрирует снижение показателей массы и линейных размеров рыб в настоящее время по сравнению с результатами исследований 2005 г. В малых озерах также происходят изменения. Сравнение размерно-весовых показателей сига оз. Кочеяур за более чем десятилетний период показывает снижение массы и размеров особей. У сига оз. Виртуовошъявр также было зарегистрировано снижение показателей линейных размеров и массы особей.

Максимальный возраст сегов в популяциях варьирует в достаточно значительных пределах. В малых лесных озерах Финляндии и приграничного района России предельный возраст сига изменялся от 4+ (Суоваселькярви) до 17+ (Кочеяур). Для оз. Инари и водоемов системы р. Пасвик аналогичные показатели среднетычинкового сига за весь период исследований варьировали от 3+ (Раякоски, 2002) до 9+ (Хестефосс, 2002 и Ваггетем, 2005), а у малотычинкового лежали в пределах 6+ (Инари, 2004) – 14+ (Скрюккебухта, 2004, Раякоски, 2004 и Ваггетем, 2008). Обычно особи старше восьми лет отмечаются единично.

У рыб отмечают снижение возраста полового созревания и вступления в нерестовое стадо. В ряде озер и водохранилищ было отмечено чрезвычайно раннее созревание сига в возрасте 1+ при минимальных размерах рыб: масса 6-14 г, длина 8.9-12.1 см (Куэтсьярви, Бьернватн, Скрюккебухта, Инари). У сига, обитающего в водоемах, значительно удаленных от источников промышленного загрязнения, впервые созревающие особи также были зарегистрированы в возрастных классах 2+ (Кочеяур, Виртуовошъяур).

Среди исследованных малых лесных озер, Кочеяур и Виртуовошъяур наиболее удалены от источников аэротехногенного загрязнения. Вместе с тем, для них регистрировалась наиболее высокая численность рыб с поражениями почек, печени и жабр. Однако степень данных изменений можно охарактеризовать как начальную. Для сига, обитающего в лесных озерах Финляндии (Айттоярви, Кантоярви, Меллаломпола и Суоваселькярви), наиболее часто среди патологий внутренних органов встречались поражения печени, характеризующиеся бледной окраской, мозаичностью и вытянутой формой органа. Патолого-анатомический анализ рыб, а также сравнительная динамика патологий

органов и тканей сига системы р. Пасвик показали, что наиболее распространенными изменениями остаются поражения почек, печени и жабр рыб. Общая оценка патологических изменений сига исследованных водоемов показала, что частота встречаемости нарушений органов и тканей рыб была ниже у сига водохранилища Ваггетем. Развитие патологий рыб здесь носит начальный характер. Водоемы нижнего течения р. Пасвик – Скрюккебукта и Бьернватн – испытывают более высокие уровни антропогенной нагрузки. Встречаемость патологий рыб здесь была выше. Необходимо отметить, что среди сига Скрюккебукты в 60 % случаев регистрировались внешние изменения, выражающиеся в снижении тургора мышечных тканей, бледной окраске кожных покровов и депигментации покровов черепа. Ожирение сердца встречалось в единичных случаях и не превышало 8 %. В оз. Куэтсъярви практически все выловленные рыбы имели интенсивное развитие патологий.

Было отмечено, что Си в наиболее высоких концентрациях накапливается в печени у всех исследованных видов рыб. Для Ни органом-мишенью являлась почка. Максимальные содержание металла в почках сига Куэтсъярви может достигать 74 мкг/г сух. веса. Кроме того, было обнаружено, что накопление Ни в организмах рыб ряда водоемов, в особенности в малых лесных озерах, в большей степени происходит в скелете. Более высокие по сравнению с другими органами содержания Sr отмечаются в скелете рыб, а Zn и Mn – в жабрах и костной ткани. Содержания Hg во всех органах рыб исследованных водоемов демонстрируют тенденцию к неуклонному росту за последние годы, причем данная особенность отмечается для всех анализируемых видов рыб водоемов с различным уровнем антропогенной нагрузки. Депонирование избытка металлов в мышечной ткани согласуется с общепринятыми представлениями о накоплении Hg по трофическим цепям (в особенности у хищных видов рыб).

Содержания Си в печени и Ни в почках рыб являются рекомендуемыми показателями для оценки уровней азротехногенной нагрузки на водоемы исследованного района. Вместе с тем, накопление Ни в скелете сига, окуня и щуки можно использовать для действительной оценки уровня азротехногенного поступления металла в водоемы, расположенные на значительном удалении от источника эмиссии. Регистрируемая практически повсеместно тенденция к увеличению уровней накопления Hg в органах и тканях рыб в настоящее время требует повышения внимания к изучению и постоянному контролю над содержанием данного элемента в природных средах.

4. Заключение

В результате проведенных исследований экологического состояния озер северо-запада Мурманской области и приграничных районов Норвегии и Финляндии выявлена тенденция усиления антропогенной нагрузки на водосборы озер и на сами озера, несмотря на снижение выбросов и стоков загрязняющих веществ комбинатом "Печенганикель" в последние 20 лет. Средние выбросы Ni и Си комбинатом составляли 300 и 200 т/год соответственно, а стоки 5 и 0.2 т/год. За почти 80-летний период деятельности горно-металлургического комплекса в звеньях окружающей среды (главным образом в наземных экосистемах – в почвах и растениях, а также в донных отложениях и гидробионтах водоемов) накопилось огромное количество тяжелых металлов, которое после отмирания живых организмов и разложения органических остатков со склоновым стоком, почвенными и подземными водами в виде органических и неорганических соединений постепенно поступает в водотоки и водоемы.

Высокая степень накопления тяжелых металлов в наземных и водных экосистемах и длительность периода их самоочищения позволили сделать прогноз: интенсивное поступление тяжелых металлов в водоемы будет продолжаться даже при условии резкого снижения или полного прекращения выбросов комбинатом "Печенганикель" в окружающую среду вредных веществ. Исследования показали: наличие у рыб изменений размерно-весовой структуры, снижение у них возраста полового созревания и вступления в нерестовое стадо являются прямым следствием усиления загрязнений и увеличения антропогенной нагрузки на водные экосистемы.

Кроме того, отмечена тенденция неуклонного роста содержания тяжелых металлов, в том числе и высокотоксичной Hg, во всех органах рыб исследованных за последние годы водоемов. Данная особенность характерна для всех анализируемых видов рыб, обитающих в водоемах с различным уровнем антропогенной нагрузки.

Усиление антропогенной нагрузки на водоемы отрицательно скажется на воспроизводстве рыбных ресурсов Мурманской области.

Литература

Blevins R.D., Pancorbo O.C. Metal concentrations in muscle of fish from aquatic systems in East Tennessee, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, v.29, p.361-371, 1985.

- Cernic M., Federer P., Borcovec M., Sticher H.** Modeling of heavy metal transport in a contaminated soil. *J. Environ. Qual.*, v.23, p.1239-1248, 1994.
- De Vries W., Banker D.J.** Manual for calculating critical load of heavy metals for soils and surface water. *DLO Winland Staring Centre, Wageningen, The Netherlands*. Report N 114, 133 p., 1996.
- Fridland A.J., Craig B.M., Miller E.K., Herrick G.T., Siccama T.G., Johnson A.N.** Decreasing lead levels in the forest floor of the northeastern USA. *AMBIO*, v.21, p.400-430, 1992.
- Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Res.*, v.14, p.975-1001, 1980.
- Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S., Terentjev P.M., Koroleva I.M.** Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian border area. *Jyvaskyla, Finland: Kopijyva Oy*, 313 p., 2008.
- Miller E.K., Fridland A.J.** Lead migration in forest soil. Response to changing atmospheric inputs. *Environ. Sci. Technol.*, v.28, p.662-672, 1994.
- Nriagu J.O.** Global metal pollution. *Environment*, v.32, p.6-9, 1990.
- Sorensen E.M.** Metal poisoning in fish. USA. Texas, *CRC Press*, 362 p., 1992.
- Standard method for examination for water and wastewater. 14th edition, ALHA-AWWA-WPCF. *Washington, American Public Health Association*, 1195 p., 1975.
- State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area. *Eds. Stebel K., Chritinsen G., Derome J., Crekela I. The Finnish Environment*, N 6, 98 p., 2007.
- Даувальтер В.А.** Закономерности осадконакопления в водных объектах европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы). *Дис. ... докт. геогр. наук, Анапиты*, 398 с., 1999.
- Елпатьяевский П.В.** Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных системах. *М., Наука*, 253 с., 1993.
- Зейлер Г.** Некоторые проблемы анализа биологических материалов на содержание токсичных элементов в следах. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. *М., Мир*, с.246-269, 1993.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях. *М., Мир*, 439 с., 1989.
- Кашулин Н.А.** Рыбы малых озер северной Фенноскандии в условиях аэротехногенного загрязнения. *Анапиты, КНЦ РАН*, 130 с., 2004.
- Кашулин Н.А., Лукин А.А., Амундсен П.-А.** Рыбы пресных вод Субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. *Анапиты, КНЦ РАН*, 142 с., 1999.
- 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. *Анапиты, КНЦ РАН*, 234 с., 2005.
- Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Раткин Н.Е., Терентьев П.М., Королева И.М., Вандыш О.И., Кудрявцева Л.П.** Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 2: Озерно-речная система реки Чуна в условиях аэротехногенного загрязнения. *Анапиты, КНЦ РАН*, 238 с., 2007.
- Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П.** Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). *Анапиты, КНЦ РАН*, т.1, 250 с., т.2, 282 с., 2008.
- 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). *Анапиты, КНЦ РАН*, 263 с., 1996.
- Мур Дж.В., Рамамурти С.** Тяжелые металлы в природных водах. *М., Мир*, 285 с., 1987.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. *Л., Гидрометеиздат*, 541 с., 1977.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш.** Геохимия окружающей среды. *М., Недра*, 335 с., 1990.
- Яхнин Э.Я., Томилина О.В., Деларов Д.А.** Атмосферные выпадения тяжелых металлов и их влияние на экологическое состояние почв. *Экологическая химия*, № 6 (4), с.253-259, 1997.