

УДК 624.131.41

Эколого-экономическая оценка необходимости извлечения донных отложений оз. Нюдъявр Мончегорского района Мурманской области

В.А. Даувальтер^{1,2}, Н.А. Кашулин¹

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН*

² *Апатитский филиал МГТУ, кафедре геоэкологии*

Аннотация. Проведена эколого-экономическая оценка накопления тяжелых металлов в донных отложениях оз. Нюдъявр за более чем 70-летний период деятельности предприятия горно-металлургического комплекса (ГМК "Североникель"). Определены объемы накопленных металлов. Стоимость заключенных в донных отложениях оз. Нюдъявр только никеля и меди по средневзвешенным ценам за сентябрь 2011 г. составляет примерно 75 млн долларов. Рекомендованы способы очистки водоема и получения дополнительного сырья для металлургической промышленности.

Abstract. The ecological-economical estimation of heavy metals' accumulation in sediments of the Lake Njudjavr for more than 70 years of activity of the mining enterprise ("Severonickel") has been carried out. The volumes and cost of the accumulated metals have been determined. The methods of lake treatment and extracting additional raw materials for metal manufacture have been recommended.

Ключевые слова: эколого-экономическая оценка, накопление, тяжелые металлы, озеро, донные отложения

Key words: ecological-economical estimation, accumulation, heavy metals, lake, sediments

1. Введение

Мурманская область является промышленно развитым заполярным регионом. Местные горнодобывающие и горноперерабатывающие предприятия являются одними из основных водопотребителей и загрязнителей окружающей среды сточными водами и атмосферными выбросами (Кашулин и др., 2005). При этом внутренние водоемы служат приемниками сточных вод, и в них аккумулируется значительное количество долгоживущих загрязнений, выпавших на территорию их водосбора за продолжительный период времени (Кашулин и др., 2005; 2007). Тяжелые металлы (ТМ) являются одними из наиболее опасных загрязняющих веществ, способных накапливаться и длительное время циркулировать в экосистемах, из-за их высокой токсичности и потенциальной биоаккумуляции в живых организмах, в том числе и гидробионтах. Обоснование возможности сброса сточных вод в природные водоемы основывается на концепции их самоочищения, подразумевающей возможность снижения до безопасных уровней концентрации вредных веществ за счет разбавления и осаждения их на биогеохимических барьерах (Россолимо, 1977).

Комбинат "Североникель", входящий в состав ОАО "Кольская ГМК", был построен в конце 1938 г. в Мончегорске и является крупнейшим металлургическим предприятием Мурманской области (Pozniakov, 1993). С 1940 г. комбинат сбрасывает в оз. Нюдъявр сточные воды, которые затем поступают в северо-западную часть оз. Имандра – губу Монче (Моисеенко и др., 1996). В настоящее время оз. Нюдъявр представляет собой элемент техногенно-модифицированного ландшафта. Как само озеро, так и придаточные водоемы и водотоки, а также территория водосбора полностью утратили свойства природных комплексов. В них накоплено значительное количество ТМ. Загрязнение вод оз. Нюдъявр происходит как вследствие прямого поступления сточных и рудничных вод, так и в результате миграции загрязняющих веществ с территории водосбора и ремобилизации из донных отложений (ДО).

Целью работы являлась эколого-экономическая оценка необходимости использования ДО оз. Нюдъявр для получения ТМ и оптимизации природоохранных мероприятий на комбинате "Североникель".

2. Объекты и методы исследований

Город Мончегорск расположен в центральной части Мурманской области. В соответствии с сильно расчлененным гористым рельефом гидрография Монче-тундры (максимальная высота в исследуемом районе 795.7 м) представлена сетью рек, ручьев и рядом озер. Самым крупным внутренним водоемом исследуемого района является оз. Нюдъявр с площадью водосбора около 80 км². Озеро

занимает впадину с заболоченными берегами к северу от окружающих его сопок Монче-тундры (рис. 1). Дамбой озеро разделено на Северную и Южную части. Уровень Южной части озера выше, и вода по трубам поступает в Северную часть. Площадь водной поверхности Северной части составляет 2.91 км^2 , Южной части – 1.06 км^2 . В настоящее время озеро отличается небольшими глубинами, преобладающими являются глубины 1.5-1.7 м, наибольшая (2.0 м) расположена в центральной части озера и в районе стока с дамбы. Длина Северной части озера – около 2.3 км, ширина – около 1.8 км. В результате выброса большого количества сернистого газа и тяжелых металлов в атмосферу в окрестностях озера образовались обширные зоны деградации почвенно-растительного покрова, от угнетения лишайников до полного разрушения почв и образования техногенных пустошей. Велика степень застройки берегов озера промышленными объектами, жилыми зданиями и гаражами. Лес, представленный елью и березой, занимает незначительные площади на юго-востоке водосбора озера. Водная растительность развита слабо. На заторфованных берегах озера встречаются заросли осоки. Остальной берег в основном сложен из песка и мелких камней с участками гальки.

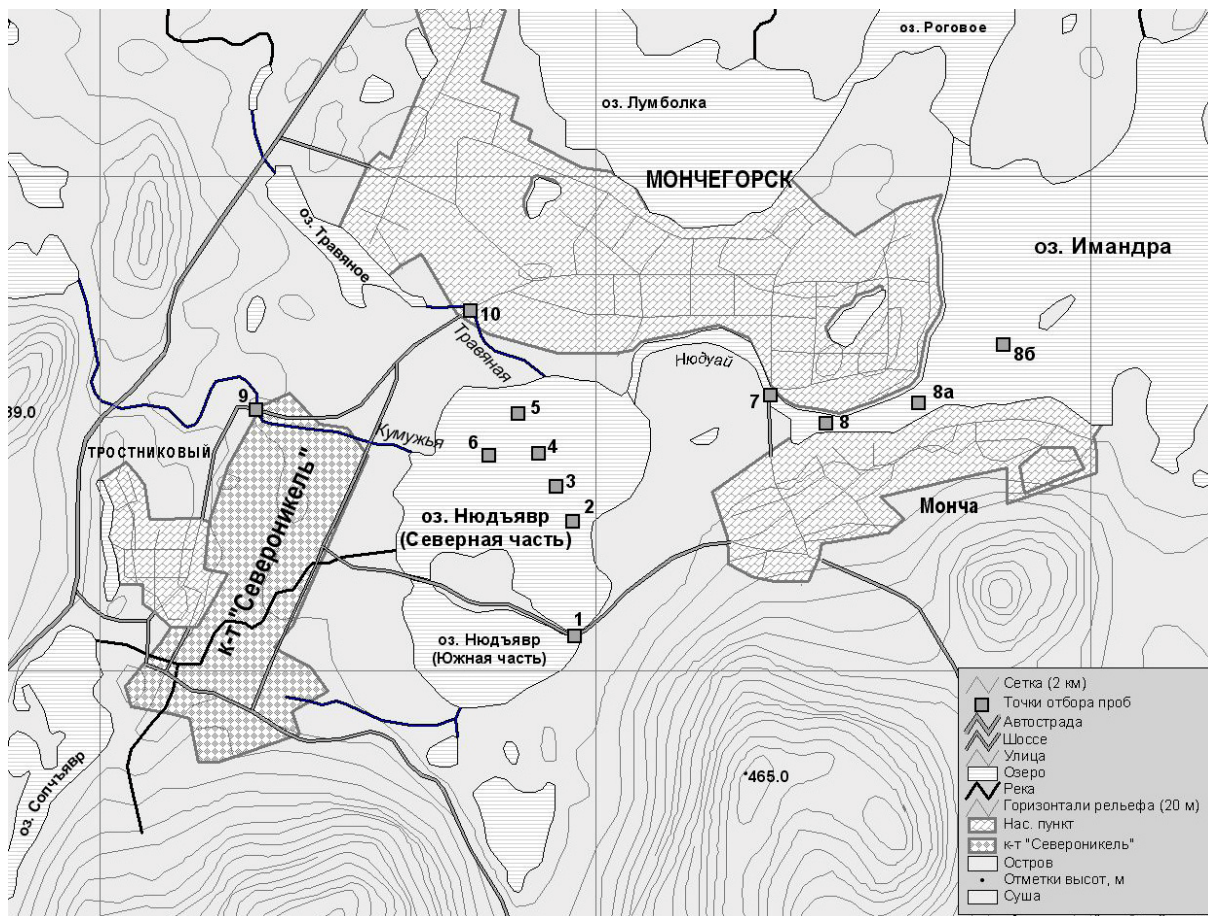


Рис. 1. Схема точек отбора проб в районе оз. Нюдъявр: 1 – сток с Южной части оз. Нюдъявр; 2-6 – оз. Нюдъявр; 7 – река Нюдуаи (сток с оз. Нюдъявр в оз. Имандра); 8-8а-8б – оз. Имандра; 9 – река Кумужья; 10 – река Травяная

Наблюдения за состоянием поверхностных вод в 2006 г. проводились на акватории Северной и Южной частей оз. Нюдъявр (5 станций), 3 реках и оз. Имандра. Пробы воды из поверхностных слоев ручьев и озер отбирались ежемесячно и в основные гидрологические фазы. Все аналитические методики определения основных гидрохимических параметров приведены в соответствие с международными стандартами (*Руководство...*, 1977; *Standard...*, 1975).

Для оценки современного состояния поверхностных вод, изучения истории развития и загрязнения территории водосбора и расчета накопленных в оз. Нюдъявр ТМ были отобраны колонки ДО в Северной части озера: станции Нюд-2 – Нюд-6 (рис. 1). Глубина озера в месте отбора колонок составляла 1.7-2.0 м. Пробы отбирались отборником колонок ДО открытого гравитационного типа (внутренний диаметр 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник изготовлен из плексигласа и позволяет транспортировать колонки в лабораторию ненарушенными для дальнейшего

использования (Skogheim, 1979). Колонки ДО были разделены на слои по 1 см, помещены в полиэтиленовые контейнеры и отправлены в лабораторию для анализа. Концентрации ТМ в ДО определялись методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Подробнее методика отбора проб, пробоподготовки и проведения анализа описана ранее (Даувальтер, 1999).

Для оценки загрязнения оз. Нюдъявр использовалась методика определения коэффициента загрязнения (Håkanson, 1980), адаптированная для условий Европейской субарктики (Даувальтер, 1999). Коэффициент загрязнения (C_f) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном слое ДО (0-1 см) к фоновому значению в самой глубокой части колонки:

$$C_f = C_{0-1} / C_n,$$

где C_{0-1} – содержание металла (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As, Hg) в поверхностном слое (0-1 см) колонки ДО, отобранной из наиболее глубокой части акватории (зоны аккумуляции); C_n – фоновое значение для данного металла, определяемое как содержание этого металла в самом глубоком слое колонки ДО.

Обоснование вышеназванного спектра элементов для определения интенсивности загрязнения основано на том, что они являются приоритетными загрязнителями территории Кольского п-ова и имеются результаты анализа по всем этим элементам. Коэффициент загрязнения (C_f) подсчитывается для каждого отдельного металла. Если $C_{0-1} > C_n$, мы можем определить это вещество как загрязняющее или обогащенное. Если $C_{0-1} < C_n$, тогда вещество не может являться загрязняющим. В этом подходе придерживались следующей классификации значений коэффициента загрязнения: $C_f^i < 1$ – низкий (свидетельствующий о низком загрязнении ДО изучаемым элементом); $1 \leq C_f^i < 3$ – умеренный; $3 \leq C_f^i < 6$ – значительный; $C_f^i \geq 6$ – высокий.

Степень загрязнения (C_d) определялась как сумма всех коэффициентов загрязнения (C_f) для данной станции или озера:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i = \sum_{i=1}^n (C_{0-1} / C_n).$$

Данный подход позволил определить коэффициент загрязнения (C_f^i), который характеризует загрязнение данной акватории или отдельного озера как отдельными веществами, так и их суммарного вклада на основе установления степени загрязнения C_d , которое определяет общее загрязнение исследуемыми веществами бассейна.

Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации значений C_d , предложенной (Håkanson, 1980), из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам: $C_d < 8$ – низкая степень; $8 \leq C_d < 16$ – умеренная; $16 \leq C_d < 32$ – значительная; $C_d \geq 32$ – высокая, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

3. Результаты и обсуждение

Водоемы Кольского п-ова в природном состоянии относились к классу гидрокарбонатов, из катионов преобладали натрий и кальций. Многолетнее поступление сточных вод и поверхностного стока с водосбора не только увеличило общее содержание солей воды в водоемах, но и привело к изменению соотношения основных ионов – вода поверхностных вод Северной части оз. Нюдъявр в настоящее время по классификации О.А. Алекина (1953) соответствует классу сульфатов ($\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$), группе натрия ($\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$).

Северная часть оз. Нюдъявр характеризуется высокой проточностью с выраженными русловыми течениями. В зимний период в центре Северной части оз. Нюдъявр (где происходит основной сток вод, поступающих из Южной части) наблюдается превышение в 10 и более раз показателей ионного состава (до 2197 мг/л) по сравнению с окраинными частями акватории озера (100 мг/л). В летний период озеро характеризуется открытостью к ветровому воздействию, форма озерной котловины и незначительная глубина (до 2.0 м) обуславливают нестабильность водных масс. В летний период особенности морфометрии определяют значительное выравнивание ионного состава вод по всей акватории Северной части озера. Cu и Ni за счет поступления сточных вод и аэротехногенного переноса от комбината "Североникель", расположенного к западу от озера, во всех точках отбора проб имеют значительные концентрации, до 400 и 598 мкг/л соответственно. В содержании Cu прослеживаются сезонные изменения – в период половодья концентрации увеличиваются в 4 раза. Для Ni характерны постоянные средние концентрации в течение всех исследуемых периодов с резкими изменениями на отдельных станциях Северной части оз. Нюдъявр. В оз. Имандра, в районе впадения реки Нюдуай, содержание металлов соответствует концентрациям в реке, снижение значений наблюдается при удалении от устья. В летний период на удалении 2 км концентрация Cu составляет 15.1 мкг/л, Ni – 38 мкг/л. Анализ распределения элементов по формам миграции показывает, что для большинства элементов

преобладающей формой миграции является взвешенная, то есть связанная с минеральным или органическим веществом в устойчивые структурные образования. Исключение составляют только такие ТМ, как Ni, Co и Mn, в которых растворенная и взвешенная формы находятся в равных пропорциях.

ДО депонируют многие микроэлементы и другие загрязняющие вещества, поэтому могут рассматриваться в качестве информативного показателя качества вод и, одновременно, источника вторичного загрязнения. В оз. Нюдъявр за период деятельности комбината сформированы мощные пласты техногенных ДО. Их толщина, по данным комбината "Североникель", достигает 6 м. Для определения значений коэффициента и степени загрязнения ДО оз. Нюдъявр использовались данные по фоновым концентрациям элементов Монче-губы оз. Имандра (Моисеенко и др., 2002), потому что отобранные колонки ДО в оз. Нюдъявр не захватывали доиндустриальных фоновых слоев, по которым можно было бы судить о загрязнении этого озера.

В самых глубоких слоях колонки ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр содержания Ni (191-468 мкг/г) примерно на порядок больше средних фоновых концентраций Ni в ДО Кольского п-ова. Далее по мере приближения к поверхности ДО происходит постепенное увеличение концентраций Ni (рис. 2) до максимального значения (130000 мкг/г или 13 %) в слое 5-6 см. В распределении концентраций Ni в толще ДО со станции Нюд-6 оз. Нюдъявр отмечается разделение – колонка делится на три части. Нижняя часть (15-23 см) с относительно низкими концентрациями Ni, средняя часть (5-15 см), где происходит увеличение концентраций Ni до 13 %, и верхняя часть (0-5 см), где концентрации Ni снижаются до 4.8 % (47800 мкг/г). Значение коэффициента загрязнения для Ni в колонке ДО станции Нюд-5 оз. Нюдъявр составляет 1036 (табл. 1). Повышенные содержания Ni в поверхностных слоях ДО отмечаются также и на станциях Нюд-6 (11.5 %), Нюд-2 (2.3 %), Нюд-4 (2 %), Нюд-3 (0.14 %).

Таблица 1. Фоновые концентрации элементов (в мкг/г сух. веса) в слое 19-20 см донных отложений Монче-губы оз. Имандра (Монче¹) и рассчитанные значения коэффициентов (C_f) и степени (C_d) загрязнения донных отложений оз. Нюдъявр

Станция	Показатель	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Fe	Sr	Cr	Al	Hg	C _d
Монче ¹	Фон	29	46	19	11	0.066	2.0	119	9215	5	62	12584	0.018	
Нюд-2	C_f	104.5	504.2	5.1	44.6	55.9	7.9	2.3	2.8	16.6	3.9	1.3	6.7	732.9
Нюд-3	C_f	9.1	29.9	1.4	3.1	4.9	1.9	1.4	1.1	14.9	1.0	0.9	20.9	72.2
Нюд-4	C_f	127.0	438.5	5.4	62.6	33.8	9.7	3.9	2.3	10.8	6.7	1.1	33.9	717.5
Нюд-5	C_f	350.9	1035.8	10.7	61.0	217.8	25.6	10.0	2.8	149.7	2.9	1.1	26.5	1731.2
Нюд-6	C_f	390.3	2494.1	6.7	54.8	61.2	27.6	5.1	2.1	27.1	2.3	0.6	22.6	3059.5

¹ – данные (Моисеенко и др., 2002).

Содержание Cu (34-67 мкг/г) в самых глубоких слоях колонки ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр примерно равно среднему фоновому содержанию в ДО озер Кольского п-ова. В слое 5-6 см ДО происходит (ранее отмеченное для Ni) увеличение концентраций Cu до 2.2 % (21700 мкг/г) (рис. 2). В распределении концентраций Cu в колонке ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр отмечается разделение, аналогичное значениям Ni – колонка делится на три части. Нижняя часть (15-23 см) – с низкими концентрациями Cu, средняя часть (5-15 см) – с увеличивающимися до максимального значения концентрациями, и верхняя часть (0-5 см) – с относительно высокими концентрациями, уменьшающимися до 1 % (10200 мкг/г). Значение коэффициента загрязнения для Cu в колонке ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр составляет 351 (табл. 1). На других станциях оз. Нюдъявр также отмечаются повышенные содержания Cu в поверхностных слоях ДО, на станциях Нюд-6 – 1.1 %, Нюд-4 – 0.37 %, Нюд-2 – 0.3 % и Нюд-3 – минимальная концентрация в поверхностном слое (0.0265 % или 265 мкг/г).

Концентрации Co в нижних слоях колонки ДО со станции Нюд-5 (12-20 мкг/г) примерно равны среднему значению фоновых концентраций Co в ДО малых озер Кольского п-ова. В слое 5-6 см ДО происходит (ранее отмеченное для Ni и Cu) увеличение концентраций Co до 0.15 % (рис. 2). В распределении концентраций Co в колонке ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр отмечается разделение, аналогичное значениям Ni и Cu – колонка делится на три части. Нижняя часть (15-23 см) с низкими концентрациями Co, средняя часть (5-15 см) с постепенным нарастанием содержания Co до максимального значения, и верхняя часть (0-5 см) с уменьшением концентраций по направлению к поверхности ДО до 660 мкг/г (рис. 2). Значение коэффициента загрязнения для Co в колонке ДО со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр составляет 61 (табл. 1). Повышенное содержание Co в поверхностных слоях ДО отмечаются также и на станциях Нюд-6 – около 600 мкг/г, Нюд-4 – 680 мкг/г, Нюд-2 – 480 мкг/г и Нюд-3 – наименьшее значение 33 мкг/г.

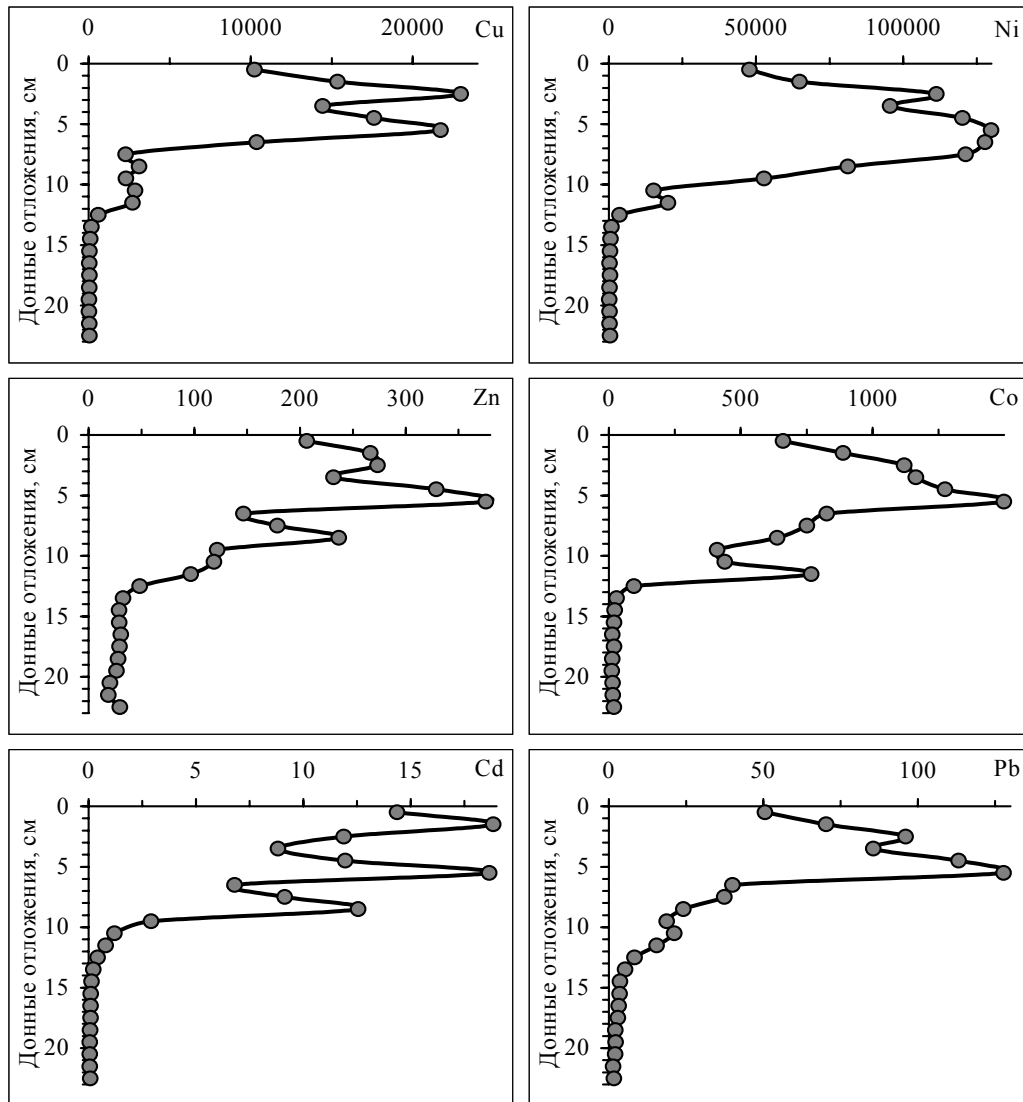


Рис. 2. Вертикальное распределение элементов в колонке донных отложений станции Нюд-5

Содержание Zn в нижней части колонки ДО со станции Нюд-5 (19-30 мкг/г) примерно в 3-4 раза меньше среднего значения фоновых концентраций в ДО озер Кольского п-ова. В слое 5-6 см ДО со станции Нюд-5 происходит увеличение концентрации Zn до 380 мкг/г. В распределении концентраций Zn в колонке ДО со станции Нюд-5 отмечается разделение, аналогичное значениям Ni, Cu и Co – колонка делится на три части. Нижняя часть (15-23 см) с низкими концентрациями, средняя часть (5-15 см) с постепенным нарастанием содержания Zn до максимального значения, и верхняя часть (0-5 см) с уменьшением концентраций по направлению к поверхности до 200 мкг/г (рис. 2). Значение коэффициента загрязнения для Zn в колонке ДО станции Нюд-5 составляет 11 (табл. 1). На других станциях оз. Нюдъявр также отмечается подобное повышение содержания Zn в поверхностных слоях ДО, что и на станции Нюд-5. На станции Нюд-6 концентрации Zn увеличиваются до 129 мкг/г, Нюд-4 – до 104 мкг/г, Нюд-2 – до 99 мкг/г, и минимальные концентрации в поверхностном слое обнаружены на станции Нюд-3 – до 27 мкг/г, что более чем в 3 раза меньше среднего значения фоновых концентраций в донных отложениях озер Кольского п-ова.

Концентрации Cd в самых глубоких слоях (14-23 см) колонки ДО со станции Нюд-5 (рис. 2) примерно на порядок меньше, чем среднее значение фоновых концентраций Cd в ДО озер Кольского п-ова. Затем происходит резкое увеличение содержания Cd до максимальных значений в слоях 5-6 см и 1-2 см до 19 мкг/г. В слое 3-4 см отмечается небольшое снижение концентраций Cd до 9 мкг/г. Значение коэффициента загрязнения для Cd в колонке ДО со станции Нюд-5 составляет 218 (табл. 1). Повышенное содержание Cd в поверхностных слоях ДО отмечаются также и на станциях Нюд-6 (4 мкг/г), Нюд-2 (3.7 мкг/г), Нюд-4 (2.2 мкг/г). Наименьшие концентрации в поверхностных слоях отмечены на станции Нюд-3 – 0.32 мкг/г, что примерно в 3 раза меньше, чем среднее значение фоновых концентраций Cd в ДО озер Кольского п-ова.

Среднее значение фоновых концентраций Pb для малых озер Кольского п-ова в 2-5 раз меньше содержания Pb в нижней части колонки (14-23 см) ДО на станции Нюд-5 (рис. 2). Далее идет увеличение концентраций Pb, и максимальное содержание (128 мкг/г) отмечено в слое 5-6 см ДО. В поверхностной части ДО (0-5 см) происходит снижение концентрации Pb до 50.5 мкг/г. Значение коэффициента загрязнения для Pb в колонке ДО станции Нюд-5 довольно высокое и составляет 26 (табл. 1). На станции Нюд-6 оз. Нюдъявр также отмечаются повышенные содержания Pb в поверхностном слое ДО (до 54 мкг/г). Увеличение концентраций Pb в поверхностном слое ДО происходит также на станциях Нюд-4 до 19 мкг/г, Нюд-2 до 16 мкг/г и Нюд-3 до 3.8 мкг/г.

Концентрации Hg в самых глубоких частях колонки ДО (9-23 см) со станции Нюд-5 оз. Нюдъявр меньше, чем среднее значение фоновых концентраций Hg в ДО малых озер Кольского п-ова. В средней части ДО (5-9 см) со станции Нюд-5 происходит (ранее отмеченное для многих ТМ) увеличение концентраций Hg до 0.76 мкг/г (рис. 2). В поверхностных слоях ДО отмечается небольшое снижение содержания Hg до 0.47 мкг/г. Значение коэффициента загрязнения Hg (классифицируемое как очень высокое) в ДО со станции Нюд-5 равно 27 (табл. 1). На станции Нюд-4 также отмечаются повышенные содержания Hg в поверхностном слое ДО (до 0.6 мкг/г). Увеличение концентраций Hg в поверхностном слое ДО происходит также на станциях Нюд-6 до 0.4 мкг/г, Нюд-3 до 0.37 мкг/г и Нюд-2 до 0.12 мкг/г.

Таким образом, в ДО происходит захоронение значительного количества ТМ, поступающих в оз. Нюдъявр. Наблюдается превышение их концентраций в поверхностных слоях ДО по сравнению с фоновыми значениями в несколько сотен (и даже тысяч) раз. Среди ТМ наибольшие коэффициенты загрязнения зафиксированы для Ni, Cu и Co, т.е. для тех металлов, которые производятся на комбинате. Очень высокие степени загрязнения имеют также такие высокотоксичные халькофильные металлы, как Cd, Pb и Hg. Коэффициенты загрязнения по этим элементам достигают несколько десятков и даже сотен.

Оценка количества поступивших и аккумулированных в ДО ТМ за период антропогенного влияния на оз. Нюдъявр проводилась с использованием результатов исследования вертикального распределения концентраций ТМ в толще ДО на станции Нюд-5 (табл. 2). На этой станции был произведен послыйный отбор проб ДО (по 1 см) в интервале от 0 до 23 см. Такая же методика использовалась, при оценке накопления ТМ в ДО оз. Имандра за период деятельности предприятий горно-металлургического комплекса, главным образом комбината "Североникель" (Даувальтер и др., 2000).

Объем ДО оз. Нюдъявр с повышенными концентрациями ТМ определялся умножением площади озера на мощность загрязненных ДО, которую определили равной 12 см. Глубже 12 см на станции Нюд-5 лежат относительно незагрязненные ДО (рис. 2), хотя концентрации таких металлов как Ni, Cu, Co, Zn в нижнем слое значительно больше фоновых концентраций в Монче-губе оз. Имандра (Моисеенко и др., 2002).

Масса загрязненных ДО оз. Нюдъявр рассчитывалась путем умножения объема на плотность ДО, которая в среднем принята равной 1.15 г/см³ (1.15 т/м³). Это значение получено по результатам исследований ДО оз. Имандра (Даувальтер и др., 2000).

Масса каждого загрязняющего элемента в оз. Нюдъявр рассчитывалась умножением массы загрязненных ДО на концентрации этого загрязняющего элемента во влажных ДО. Для этого концентрации элементов во влажных ДО рассчитывались путем умножения содержания в сухом состоянии на величины (1 - H₂O), где H₂O – значение влажности для каждого слоя ДО в колонке со станции Нюд-5. Общая масса каждого загрязняющего элемента в целом для озера определялась суммированием результатов по отдельным слоям.

За более чем 60-летний период деятельности предприятий горно-металлургического комплекса на территории водосбора крупнейшего водоема Кольского п-ова оз. Имандра в ДО накоплено 4600, 960, 120, 250, 11 и 200 т Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Pb соответственно (Даувальтер и др., 2000). В соответствии с проведенными расчетами, за этот же период в ДО оз. Нюдъявр, значительно меньшего по площади, накоплено 3400, 420, 35, 8.5, 0.38, 2.3, 0.017 и 10 т Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Hg и Cr соответственно (табл. 2). Содержание ТМ в ДО оз. Нюдъявр достигло очень высоких концентраций. Ni в них накопилось примерно столько же, сколько в ДО крупнейшего водоема Кольского п-ова оз. Имандра, Cu – меньше в 2 раза, Co – меньше в 4 раза, Zn и Cd – меньше почти в 30 раз, Pb – меньше почти в 90 раз.

Исследования показали, что площадь дна оз. Имандра, занятого иловыми отложениями, составляет >57 % общей площади зеркала озера (812.53 км²) – 464 км² (Даувальтер и др., 2000), тогда как площадь северной части оз. Нюдъявр, на которой производилась оценка накопления ТМ в ДО, составляет 2.47 км², т.е. меньше почти в 200 раз. Вследствие того, что концентрации ТМ в ДО оз. Нюдъявр на один – два порядка выше, чем в среднем в оз. Имандра, масса аккумулированных Ni, Cu и Co в ДО оз. Нюдъявр сопоставима с массой в оз. Имандра, а Zn, Cd и Pb меньше в десятки раз.

Таблица 2. Подсчет объема, массы загрязненных ДО и массы ТМ, аккумулированных в оз. Нюдъявр. Оз. Имандра¹ – масса ТМ, аккумулированных в ДО оз. Имандра (Дауальтер и др., 2000)

Слой	Площадь, м ²	Мощность, м	Объем, м ³	Масса, т	H ₂ O	Ni, т/т	Ni, т	Cu, т/т	Cu, т	Co, т/т	Co, т
0-1	2470000	0.01	24700	28400	93	0.048	91	0.0102	19.4	0.00066	1.3
1-2	2470000	0.01	24700	28400	89	0.065	205	0.0154	48.6	0.00089	2.8
2-3	2470000	0.01	24700	28400	89	0.111	355	0.0230	73.2	0.00112	3.6
3-4	2470000	0.01	24700	28400	89	0.096	289	0.0144	43.6	0.00116	3.5
4-5	2470000	0.01	24700	28400	90	0.120	327	0.0176	47.9	0.00127	3.5
5-6	2470000	0.01	24700	28400	85	0.130	544	0.0217	91.0	0.00150	6.3
6-7	2470000	0.01	24700	28400	84	0.128	580	0.0104	47.1	0.00083	3.75
7-8	2470000	0.01	24700	28400	88	0.121	410	0.0023	7.8	0.00075	2.54
8-9	2470000	0.01	24700	28400	88	0.081	279	0.0031	10.7	0.00064	2.19
9-10	2470000	0.01	24700	28400	89	0.053	165	0.0023	7.2	0.00041	1.3
10-11	2470000	0.01	24700	28400	87	0.015	55	0.0029	10.3	0.00044	1.6
11-12	2470000	0.01	24700	28400	87	0.020	72	0.0027	9.7	0.00077	2.7
Сумма	2470000	0.12	296400	340800			3400		420		35
оз. Имандра ¹							4600		960		120

Таблица 2. Продолжение

Слой	Zn, т/т	Zn, т	Cd, т/т	Cd, т	Pb, т/т	Pb, т	Hg, т/т	Hg, т	Cr, т/т	Cr, т
0-1	0.00021	0.39	0.000014	0.027	0.000051	0.096	0.00000047	0.00089	0.00018	0.347
1-2	0.00027	0.84	0.000019	0.060	0.000070	0.222	0.00000047	0.00148	0.00024	0.748
2-3	0.00027	0.87	0.000012	0.038	0.000096	0.306	0.00000055	0.00175	0.00016	0.506
3-4	0.00023	0.70	0.000009	0.027	0.000086	0.259	0.00000068	0.00205	0.00015	0.464
4-5	0.00033	0.90	0.000012	0.033	0.000113	0.308	0.00000038	0.00103	0.00014	0.390
5-6	0.00038	1.57	0.000019	0.078	0.000128	0.535	0.00000076	0.00320	0.00016	0.689
6-7	0.00015	0.67	0.000007	0.031	0.000040	0.182	0.00000064	0.00290	0.00023	1.039
7-8	0.00018	0.60	0.000009	0.031	0.000037	0.126	0.00000068	0.00230	0.00025	0.845
8-9	0.00024	0.81	0.000013	0.043	0.000024	0.083	0.00000043	0.00147	0.00034	1.178
9-10	0.00012	0.38	0.000003	0.009	0.000019	0.058	0.00000005	0.00015	0.00032	0.991
10-11	0.00012	0.43	0.000001	0.004	0.000021	0.076	0.00000003	0.00009	0.00047	1.690
11-12	0.00010	0.35	0.000001	0.003	0.000015	0.055	0.00000002	0.00006	0.00032	1.137
Сумма		8.5		0.38		2.3		0.017		10
оз. Имандра ¹		250		11		200				

Стоимость заключенных в ДО оз. Нюдъявр только Ni и Cu по средневзвешенным ценам за сентябрь 2011 г. составляет примерно 75 млн американских долларов.

4. Заключение

По данным комбината "Североникель", в оз. Нюдъявр за годы работы комбината накопилось до 6 м техногенного ила с повышенными концентрациями ТМ. По нашим расчетам, в ДО оз. Нюдъявр накоплено 3400, 420, 35, 8.5, 0.38, 2.3, 0.017 и 10 т Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Hg и Cr соответственно. Ориентировочная стоимость заключенных в ДО только первых двух металлов (Ni и Cu) по средневзвешенным ценам за сентябрь 2011 г. составляет примерно 75 млн американских долларов. Для более точного подсчета накопившихся в ДО озера ТМ необходимы дополнительные исследования. Вероятно, что количество ТМ в несколько раз больше, а соответственно, выше и стоимость металлов, заключенных в донных отложениях.

По данным проведенных исследований, глубина озера практически по всей его акватории составляет 1.5-2 м, дно выровнено, озеро уже не работает как отстойник взвешенных частиц, содержащих очень высокие концентрации ТМ, которые транзитом поступают в Монче-губу оз. Имандра, где осаждаются либо уносятся далее по акватории оз. Имандра. Возможно, что такая мера, как извлечение технического ила (для его переработки на комбинате) со дна озера и, как следствие, увеличение его глубины будет способствовать оседанию большего количества загрязненного взвешенного материала, и, следовательно, меньшему загрязнению Монче-губы и оз. Имандра в целом.

Вместе с тем перевод сульфатов и ионов ТМ в нерастворимое состояние не означает окончания

очистки вод, сбрасываемых в оз. Имандра. Нерастворимая фаза, конгломерированная в частицы различных размеров, может находиться в водной толще достаточно длительное время, и для их осаждения необходимо время и специфические условия. На эффективность осаждения взвесей отрицательное влияние оказывает турбулентность потока, особенно в зимний период, когда за счет промерзания резко сокращается толщина и, соответственно, объем водного слоя. Проведенный анализ концентраций ряда веществ вдоль поперечного разреза в северной части оз. Нюдъявр в зимний период показывает наличие четко выраженных русловых явлений. Воды, сбрасываемые через трубы перетока, напрямую транспортируются к истоку р. Нюдауй и сбрасываются в оз. Имандра. Быстрое прохождение в оз. Нюдъявр и высокая турбулентность потока не дают возможности отстаиваться нерастворимой фазе. Препятствием служит и минимальный объем водной массы. Приведенные факторы позволяют утверждать: любые рекомендуемые сегодня мероприятия по снижению содержания вредных веществ в воде малорезультативны. Эффекты вторичного загрязнения вод веществами, накопленными в ДО, будут превышать эффекты по снижению их содержания в воде.

Проведенные исследования показали: на сегодняшний день емкость оз. Нюдъявр по накоплению техногенных ДО достигла своего предела. Самоочищающие возможности водоема полностью исчерпаны.

Решение данной проблемы мы видим в проведении ряда мероприятий по извлечению накопленных ДО, изменению расположения и формы выпуска, структуризации внутриводоемного пространства фильтрующими дамбами и созданию фильтро-сорбционного каскада в долине р. Нюдауй. Опасность взмучивания донных отложений во время строительства исключается проведением первоначального строительства системы выпускных фильтрующих дамб и извлечения ДО. Для их добычи рекомендуется гидронасосный способ.

Реализация такого комплекса мер позволит очистить дно озера, увеличить объем водной массы, избавиться от источника вторичного загрязнения, создать условия для эффективного осаждения нерастворимой фазы. Учитывая значительность запасов металлов, накопленных в ДО, проведение данных мероприятий даст не только ощутимый экологический эффект, но и существенную экономическую выгоду.

Литература

- Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Res.*, v.14, p.975-1001, 1980.
- Pozniakov V. Ya.** The "Severonickel" smelter complex: History of development. In: *Aerial pollution in Kola Peninsula*. Eds. Kozlov M.V., Haukioja E., Yarmishko V.T. *Proceedings of the International Workshop. April 14-16, 1992, Saint-Petersburg*, p.16-19, 1993.
- Skogheim O.K.** Rapport fra Arungenprosjektet. *Oslo, As-NLH*, N 2, 7 p., 1979.
- Standard method for examination for water and wastewater. 14th edition, *ALHA-AWWA-WPCF. Washington, American Public Health Association*, 1195 p., 1975.
- Алексин О.А.** Основы гидрохимии. Л., *Гидрометеиздат*, 296 с., 1953.
- Даувальтер В.А.** Закономерности осадконакопления в водных объектах европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы). *Дис. ... докт. геогр. наук, Апатиты*, 398 с., 1999.
- Даувальтер В.А., Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Сандимиров С.С.** Накопление тяжелых металлов в оз. Имандра в условиях его промышленного загрязнения. *Водные ресурсы*, т.27, № 3, с.279-287, 2000.
- 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., 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. *Апатиты, КНЦ РАН*, 238 с., 2007.
- 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.
- 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.
- Россолимо Л.Л.** Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. *М., Наука*, 205 с., 1977.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л., *Гидрометеиздат*, 541 с., 1977.