УДК 550.4 (471.21)

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ПРИГРАНИЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРАН

В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Аннотация

На основе исследований, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, установлены основные закономерности распределения тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской обл. и приграничной территории сопредельных стран. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в донных отложениях озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–1930-ми гг., а максимальных значений достигает в 1970–1980-е гг., как результат металлургической деятельности в этом регионе. Заметный рост концентраций Pb в донных отложениях озер зафиксирован в начале XVIII века. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для озер Финляндии и Норвегии. Заметное увеличение содержания халькофильных Pb, Hg, As и Cd в донных отложениях озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Великой Отечественной войны, в том числе со всё усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе.

Ключевые слова:

донные отложения, озера, Мурманская обл., тяжелые металлы, загрязнение.

Введение

Европейский Север всегда ассоциировался с громадным количеством озер и рек с чистейшей водой, в которых обитают ценные виды рыб и беспозвоночных. Водоемы северо-запада Мурманской обл. в целом включают два различных типа – крупные озерно-речные системы основных рек и систему многочисленных малых озер и рек. Такие водоемы, изначально обладая высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Водные ресурсы Севера играют важнейшую роль в жизни коренных народов и экономике региона в целом. Однако глобальные изменения, происходящие на нашей планете, бросают качеству северных водоемов серьезный вызов. Бурный рост промышленности в XX веке обусловил процессы глобального загрязнения окружающей среды.

Для арктических регионов приобретает все большую актуальность проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных как в импактных зонах промышленных предприятий, так и фоновых районах. В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии, в приполярные области переносится огромная часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями более южных индустриально развитых регионов [1]. Попадающие в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению непосредственно в водоемах и на территории их водосбора.

Пресноводные экосистемы принимают и накапливают загрязняющие вещества с обширных территорий водосборных поверхностей. Территория северо-запада Мурманской обл. подвержена

серьезному антропогенному воздействию, связанному главным образом с деятельностью металлургического комбината «Печенганикель». Основные загрязняющие вещества, поступающие в водоемы, – соединения серы и тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd, Co, As, Hg и др.), полициклические ароматические углеводороды и устойчивые органические соединения.

Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят и многочисленные местные источники загрязнения – котельные, энергетические установки, двигатели внутреннего сгорания и т.д. Осаждающиеся из атмосферы загрязнения постепенно накапливаются в наземных и пресноводных экосистемах, приводя к их деградации. С точки зрения человека, это относительно медленные процессы, но в геологическом плане они чрезвычайно стремительны. За несколько десятилетий произошли существенные изменения гидрохимического режима поверхностных вод, химического состава донных отложений (ДО), структурно-функциональной организации биотических сообществ.

Наибольшую опасность при этом представляют загрязняющие вещества, способные накапливаться и длительное время циркулировать в экосистемах. Мурманская обл. – один 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 – своеобразные коллекторы загрязнений. Большая часть попадающих на территорию водосбора загрязняющих веществ в конечном итоге оказывается в водных экосистемах, даже если они и были включены в биогеохимические циклы наземных экосистем, что определяет лишь временную задержку.

Для пресноводных экосистем Арктики и Субарктики чрезвычайно опасны выбросы предприятий металлургического и энергетического комплексов, несущие огромное количество кислотных окислов и различных металлов. Низкая минерализация вод этого региона обусловливает их высокую уязвимость к данному виду воздействия [2–4]. Учитывая многочисленные источники, широкое распространение и множественные влияния металлов на биологические системы, загрязнение окружающей среды ТМ справедливо считают одним из самых опасных последствий деятельности человека. Они обладают высокой токсичностью, имеют потенциальное свойство накапливаться в живых организмах, не разлагаются и способны длительное время циркулировать в биологических системах [5–9].

Тяжелые металлы постоянно присутствовали и присутствуют в окружающей нас природной среде. Они находятся в горных породах, почве, природных водах, растениях и животных. Роль этих элементов в сложных взаимодействиях биоты и окружающей среды весьма неоднозначна. С одной стороны, за редким исключением, они необходимы и в микроколичествах входят в состав всех живых организмов. Их недостаток может привести к различным функциональным нарушениям в организме, с другой стороны, при повышенном содержании они становятся высокотоксичными веществами.

Наибольший вклад в загрязнение арктического региона, как и наибольшую опасность, вносят Hg, Cd, Pb, которые, как полагают биологи и экологи, не имеют никакой известной биологической функции, но способны к биоаккумуляции, могут быть токсичны даже в малых количествах. В настоящее время они присутствуют в больших количествах даже в районах, удаленных от антропогенных источников. Другие металлы, например, Ni и Cu, распространены сравнительно более локально и приурочены, как правило, к районам действия металлургических предприятий.

Несмотря на снижение поступлений SO_2 от комбината «Печенганикель» практически на треть (от максимальных уровней конца 1970-х – начала 1980-х гг.), выпадение серы в районе воздействия в настоящее время представляет серьезную опасность. Концентрации сульфатов

в озерах и реках вблизи предприятия «Печенганикель» выше по сравнению с другими районами. Вместе с тем, значительные показатели буферной емкости указанных водоемов за счет высоких значений содержания основных катионов в коренных горных породах являются мощным фактором, препятствующим закислению водоемов. Это отчетливо отражается на качестве вод данного района: озера с относительно высокими концентратами сульфатов в воде также имеют повышенные содержания основных катионов и высокую щелочность [2, 10–12].

Исторически сложилось так, что оценка содержания элементов в водных системах проводилась только на основании анализа образцов воды. Она включала определение общих и растворенных концентраций элементов и соединений посредством отбора и анализа соответственно нефильтрованной и фильтрованной воды. Концентрации взвешенных веществ (взвесей, сестона) определялись по разнице между общими и растворенными концентрациями. Естественно, что при таком подходе достоверность результатов химических анализов взвешенных веществ вызывала сомнение. В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних слоях ДО намного выше, чем концентрации элементов, растворенных в водной толще. Следовательно, невозможно получить достоверные результаты по распределению, геохимической миграции и доступности для живых организмов элементов и веществ, находящихся в водных объектах, а также определить или предсказать их влияние на окружающую среду только посредством отбора проб воды.

Донные отложения – «хранилища» многих загрязняющих веществ, поэтому их следует тщательно исследовать при оценке качества воды водоемов, которые предполагается использовать в различных целях, например для питьевого водоснабжения или рыборазведения, по следующим причинам [13]:

• во-первых, участки накопления ненарушенных ДО водоемов фиксируют все изменения геохимических условий на территории водосбора. Если будет обнаружен достаточно большой и стабильный участок накопления ДО, это позволит изучить изменения геохимических условий во времени и установить фоновые уровни, с которыми можно будет сравнивать и сопоставлять существующие условия;

• во-вторых, под влиянием изменения физико-химических условий в водоеме (например, дефицит растворенного кислорода, усиление биологической и бактериальной активности) связанные с ДО элементы могут переходить в водную толщу, поступать в пищевую цепь и оказывать существенное влияние на окружающую среду;

• в-третьих, некоторые относительно инертные или безвредные для окружающей среды неорганические вещества могут разрушаться в ДО или реагировать с другими, образуя растворимые и потенциально токсичные формы (например, переход элементарной ртути в метил ртути);

• в-четвертых, ДО можно рассматривать как один из главных источников загрязнения. Следовательно, их необходимо исследовать для определения путей потенциальной геохимической миграции загрязняющих веществ. Под влиянием изменения гидрологических условий (например, сильный шторм или весенний паводок), вероятность загрязнения водных объектов за счет аккумулированных в ДО соединений может увеличиться; что приведет к значительному негативному воздействию на гидробионты, в конечном счете и на человека.

Все вышеуказанные сведения подтверждают то, что информация о ДО, как и данные о концентрациях элементов и веществ в растворенной и взвешенной форме, необходимы для понимания того, какое влияние они оказывают на качество воды. В результате использования таких данных можно установить источники поступления загрязняющих веществ (в том числе ТМ), изучить их миграцию и определить потенциальное токсичное действие (в повышенных содержаниях) на водные организмы. Данные о химическом составе ДО требуются также для моделирования процессов переноса загрязняющих веществ в водных системах и окружающей среде в целом, для оценки геохимических циклов и установления доступности различных элементов в экологической системе.

Материалы и методы

Настоящая статья написана на основе исследований, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая работы в рамках международных проектов (Interreg IIIA Kolarctic project «Development and implementation of an environmental monitoring and assessment programme in the joint Finnish, Norwegian and Russian border area»), а также тем НИР Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Авторы использовали материалы ранних публикаций [4, 14–23] и исследований, проведенных в последние годы. Северо-Запад Мурманской обл. – наиболее изучаемый район вследствие наличия очень мощного источника загрязнения ТМ – комбината «Печенганикель». Имеются результаты химического состава ДО для более чем 50 озер этого района Мурманской обл., 20 норвежских и 10 финляндских озер. Район исследованных озер показан на рис. 1.

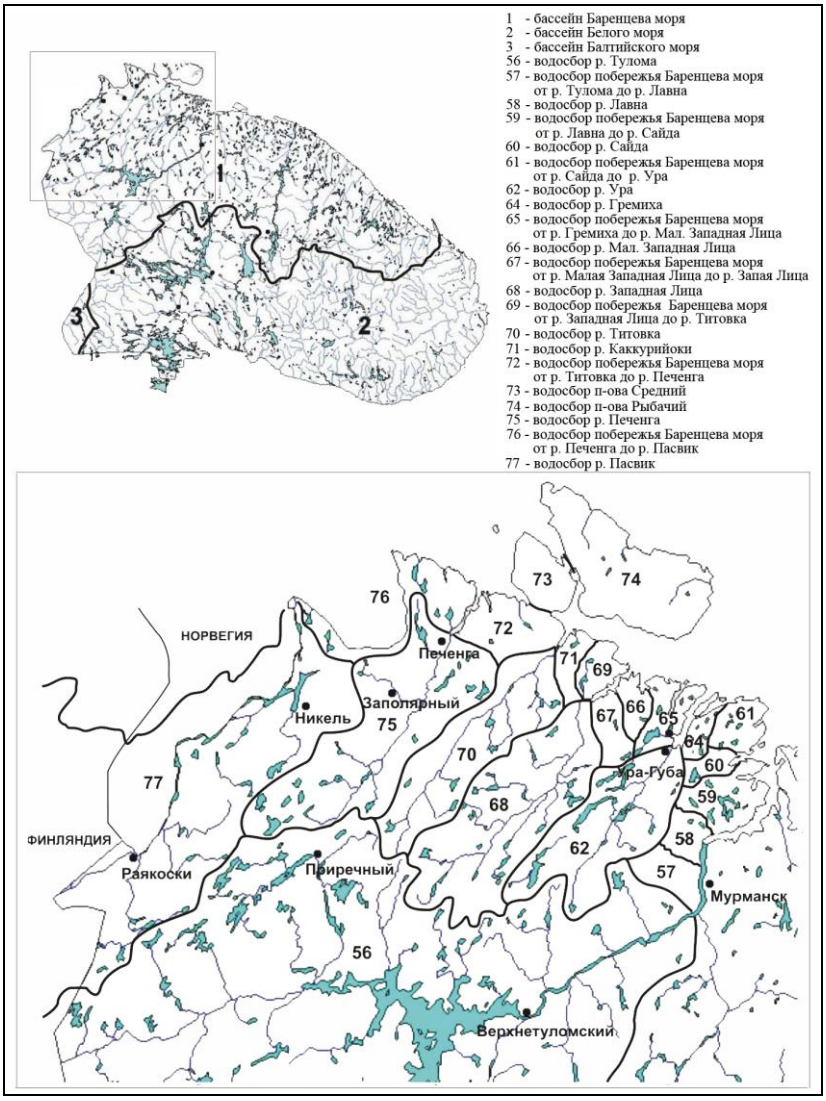

Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер северо-запада Мурманской обл. и приграничных территорий Финляндии и Норвегии

Для оценки экологического состояния озер производился отбор колонок ДО и определялись содержания ТМ в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [24, 25].

Результаты и их обсуждение

Для оценки аккумуляции и распределения ТМ в ДО исследуемых озер рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации; 2) вертикальное распределение; 3) концентрации в поверхностных ДО; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, создаваемого ТМ, накопленными в ДО.

Фоновые концентрации тяжелых металлов

Изучение фоновых концентраций ТМ в ДО – один из центральных вопросов при исследовании загрязнения озер. Образцы ДО, отобранные из самых глубоких слоев колонок (обычно более 20 см), позволяют получить фоновые концентрации ТМ при изучении загрязнения озер. Эти слои, согласно ранее проведенным работам [26], образовались более двух столетий назад, т.е. до индустриального развития Северной Фенноскандии. Фоновые концентрации ТМ отражают геохимические особенности территории водосбора, дают возможность оценить количественные значения степени загрязнения водных объектов и выявить аномалии с целью поисков месторождений полезных ископаемых.

Максимальные фоновые значения ТМ отмечены в ДО озер Куэтсъярви, Сальмиярви и других озер, 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. Настолько повышенные концентрации, вероятно, связаны с геохимическими и морфометрическими особенностями как водосборов, так и самих озер.

В озерах, находящихся в непосредственной близости к г. 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. 1.) подобны средним фоновым концентрациям для озер Мурманской обл. [27], немного превышая последние по всем ТМ, что, вероятно, вызвано геохимическими особенностями этого района, главным образом наличием месторождений и залежей сульфидных медно-никелевых руд Печенгского района. Фоновые концентрации ТМ в ДО исследуемых озер довольно непостоянны, что отражает значительные вариации в геохимии коренных и четвертичных пород и покрывающих их почв, растительности, рельефа и др., т.е. всех условий формирования химического состава ДО озер.

Таблица 1

Средние, минимальные, максимальные фоновые концентрации ТМ (мкг/г сух. веса) и стандартное отклонение в ДО исследуемых озер

Значение	Тяжелые металлы							
	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	35.5	34.2	105.2	18.3	0.261	4.6	4.2	0.044
Медиана	30.1	28.0	102.2	14.9	0.202	4.3	2.5	0.040
Минимальное	2.5	4.3	33.0	2.5	0.030	0.5	0.5	0.003
Максимальное	86.8	101.0	250.5	69.1	1.702	15.0	13.7	0.112
Средние по Мурманской обл.*	27	27	96	13	0.23	4.4	3.2	0.035
Стандартное отклонение	21.7	20.5	40.4	12.3	0.242	3.1	3.7	0.027

* По работе [27].

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

Вертикальное распределение элементов в донных отложениях

Исследования толщи ДО позволяют восстановить историю событий, происходящих 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 ТМ вследствие геохимических особенностей и влияния загрязнения [18].

Поверхностные слои донных ДО отражают аккумулирующий эффект аэротехногенной нагрузки металлов на водосборы, которые зачастую могут не регистрироваться гидрохимическими исследованиями. Пылевые выбросы в атмосферу плавильных цехов металлургических комбинатов – главные источники повышенных концентраций Ni, Cu и Co (в 10–380 раз больше фоновых значений) в поверхностных слоях ДО на расстоянии до 30–40 км [16]. Указанные элементы имеют тесную положительную корреляцию между собой, что свидетельствует о едином антропогенном источнике их поступления и сходных путях миграции.

Вариации содержания микроэлементов в ДО водоемов за последние 60–70 лет могут быть обусловлены, главным образом, изменениями в атмосферных выпадениях элементов. Co, Cu и Ni поступают в атмосферу с выбросами металлургических комбинатов и далее выпадают на территорию водосборов озер. Увеличение концентраций Ni и Cu в ДО озер Северной Фенноскандии датируется 1930–1940-ми гг., что связано с началом горно-металлургической деятельности на территории Печенгского района (рис. 2). С увеличением расстояния от металлургических комбинатов уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке.

Более высокие концентрации Pb в ДО не вызваны выбросами плавилен. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX вв. С увеличением расстояния от металлургических комбинатов Pb, а также As, Hg и Cd становятся основными загрязнителями.

Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат As и Cd (рис. 2). Начало загрязнения As и Cd датируется серединой XIX в., это обусловлено 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 последующем 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.

Выявлено уменьшение содержания ТМ в колонках ДО озер, расположенных на различном расстоянии от источников загрязнения, с увеличением глубины слоев ДО в озерах на расстоянии до 50 км от источников загрязнения. Концентрации Ni, Cu и Co в верхних 3–7 см ДО 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.

Средние скорости осадконакопления, рассчитанные с помощью определения возраста по хронологии ^{210}Pb с использованием модели датирования CRS и CIC [28], в исследуемых озерах довольно постоянны и находятся в пределах 0.7–1.6 мм/год. Максимальная скорость осадконакопления отмечена в оз. Кочеяур. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер,

в которых проведено датирование, обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920-ми и 1930-ми гг., а максимальных значений достигает в 1970–1980-е гг., как результат металлургической деятельности в этом регионе. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Наиболее интересными получились результаты по длинной колонке из норвежского оз. Раббватнет (рис. 3): первое заметное увеличение содержания Ni и Cu датируется серединой XVII в., что, вероятно, связано с началом промышленной революции в европейских странах, увеличением выбросов ТМ в окружающую среду, а также с их воздушной миграцией в направлении Арктики.

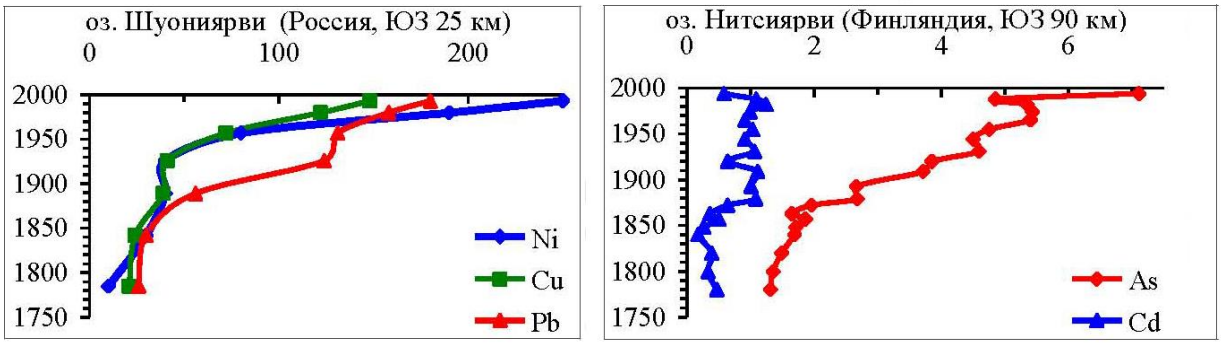

Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Ni, Cu, Pb, As и Cd (мкг/г сух. веса) в датированных ДО оз. Шуониярви (Россия, 20 км юго-западнее комбината «Печенганикель») и оз. Нитсиярви (Финляндия, 90 км юго-западнее комбината «Печенганикель»)

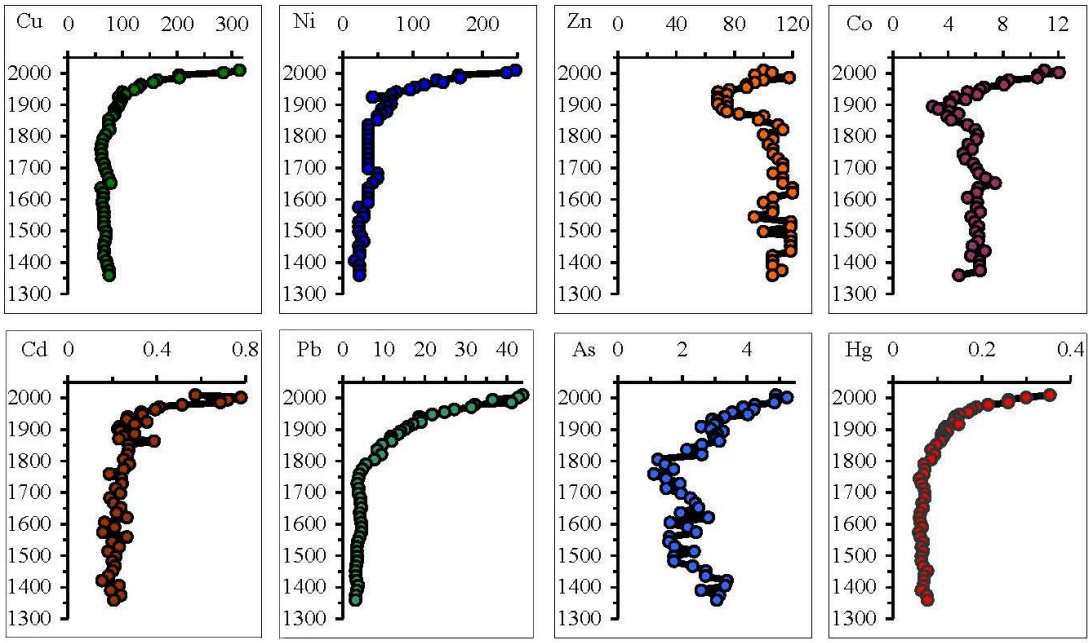

Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г сух. веса) в датированных ДО оз. Раббватнет (Норвегия, 30 км северо-восточнее комбината «Печенганикель»)

Заметный рост концентраций Pb в датируемых ДО оз. Раббватнет отмечен в начале XVIII в. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных

загрязнителей. Особенно это характерно для озер Финляндии. Заметное увеличение содержания халькофильных Pb, Hg, As и Cd в ДО всех исследованных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Великой Отечественной войны, в том числе со все усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства на комбинате. Снижение содержания халькофильных элементов в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями, что вызвано осознанием высокой опасности этих токсичных металлов и уменьшением их глобального выброса.

Распределение элементов в поверхностных слоях донных отложений

Большая часть ТМ, входящих в состав выбросов и стоков промышленных предприятий, связывается и остается в ДО. Пылевые выбросы в атмосферу комбината «Печенганикель» и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников – главные источники повышенных концентраций Ni, Cu, Co, Cd, Zn и Hg в поверхностных слоях ДО 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, замечены 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.

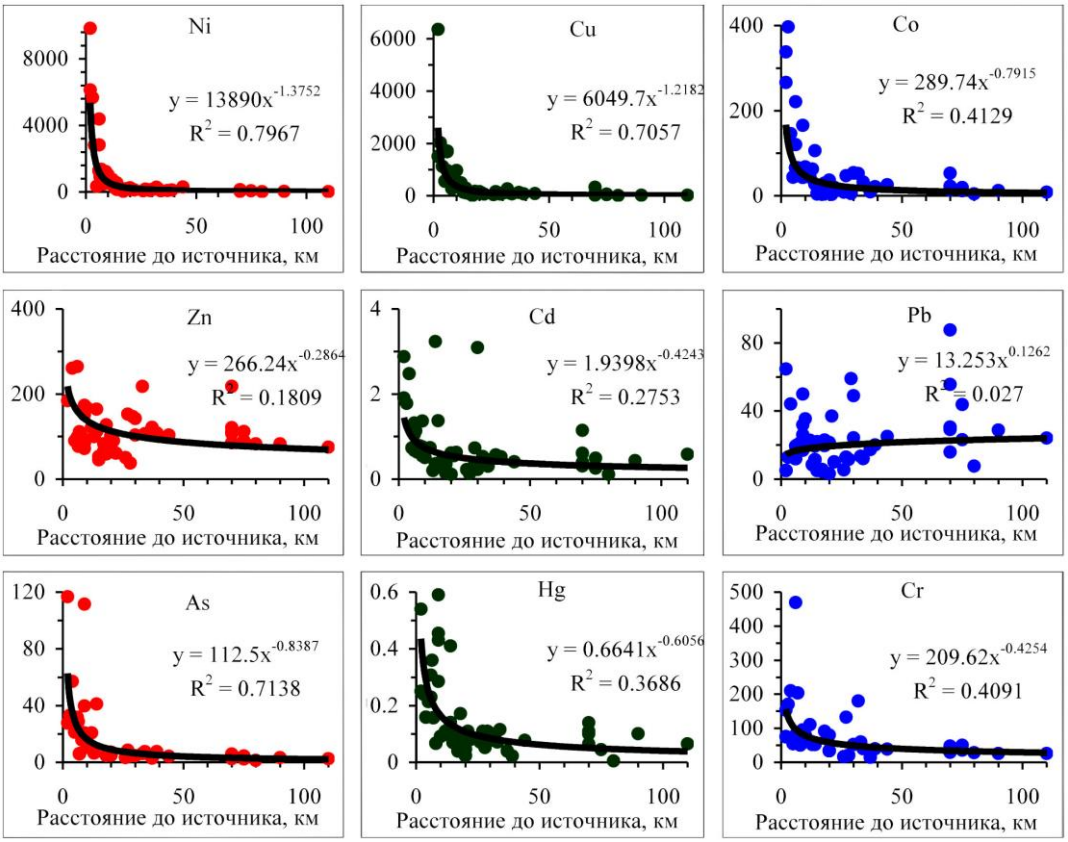

Рис. 4. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов (мкг/г сух. веса) в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от комбината «Печенганикель»

Распределение Zn, Co и Cd имеет аналогичную закономерность. Наиболее интенсивно загрязняется зона до 10 км. Здесь концентрации металлов превышают фоновые значения от 2 до 5 раз. При удалении от комбината на 20–30 км концентрации металлов уменьшаются до 2–3 фоновых значений. As и Hg распределены аналогично Ni, Cu, Co и другим металлам.

В распределении Pb отмечена отличная от всех ТМ картина – небольшое увеличение концентраций в поверхностных ДО по мере удаления от комбината, это свидетельствует, что ГМК «Печенганикель» – не единственный источник загрязнения свинцом.

В целом наиболее загрязнены озера, находящиеся вблизи комбината «Печенганикель», – Куэтсъярви, LN2, LN3, расположенные в 10-км зоне, получающие основную часть стоков комбината и характеризующиеся максимальными концентрациями Ni, Cu, Co, Cd, Cr и Hg в поверхностных слоях ДО.

По мере удаления от комбината на 20–25 км зарегистрировано уменьшение концентраций Ni, Cu, Co и других металлов. Озера Каскамаярви, Пороярви, Кеудшеръяур и Трифоноярви имеют умеренное и значительное загрязнение. Анализ территориального распределения ТМ в поверхностных ДО исследуемых озер выявил совпадение ареалов высоких значений концентраций тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg, они ограничиваются 40-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержаний Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb глобальными загрязнителями являются также и Cd, Hg и As.

Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Для оценки экологического состояния поверхностных вод нами выбрана методика определения коэффициента и степени загрязнения, предложенная шведским ученым Л. Хокансоном [29], она адаптирована для условий Европейской Субарктики с учетом выявленных закономерностей формирования химического состава ДО и фоновых содержаний элементов в ДО. Коэффициент загрязнения C_f^i подсчитывался как частное от деления концентрации элемента или соединения в поверхностном сантиметровом слое на доиндустриальное фоновое значение. Степень загрязнения C_d определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих веществ.

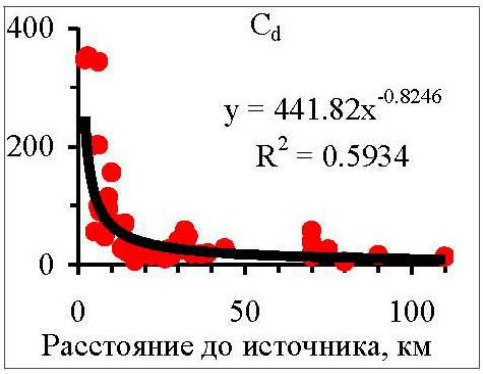

Рис. 5. Распределение значений степени загрязнения C_d в озерах на различном расстоянии от комбината «Печенганикель»

В этом подходе придерживались следующей классификации C_f^i: $C_f^i < 1$ – низкий, $1 \le C_f^i < 3$ – умеренный, $3 \le C_f^i < 6$ – значительный, $C_f^i \ge 6$ – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались следующей 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, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Очень 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 превалирующему направлению господствующих ветров (к северо-западу от комбинатов), имеют бóльшие значения C_d. В озерах, расположенных ближе 40 км, основной вклад в величину C_d вносят металлы, выбрасываемые в атмосферу комбинатом «Печенганикель» в больших количествах (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.

Заключение

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 ТМ, 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 ТМ, в ДО:

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 ТМ;

2) аэротехногенное загрязнение пылеватыми выбросами медно-никелевых производств, содержащих ТМ. Пылеватые выбросы выпадают вблизи индустриальных центров, их растворение в воде вызывает повышение уровня ТМ в воде и ДО;

3) воздушное загрязнение кислотообразующими веществами (сернистым газом и окисями азота) и ионными формами металлов, распространяющимися на значительные расстояния. Закисление водоемов способствует переходу металлов в ионных (наиболее токсичных) формах из ДО в водную толщу. Несмотря на низкие концентрации, токсичные эффекты ТМ в кислой среде увеличиваются.

Образцы ДО озер дают хорошую возможность оценить экологическое состояние озер и влияние загрязнения местного и глобального характера. Анализ территориального распределения ТМ в ДО озер северо-запада Мурманской обл. показал, что ареалы высоких концентраций загрязняющих элементов, таких как Ni, Cu, Co и Hg, совпадают и ограничены 50-километровой местной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержания Pb прослежено с востока на запад, что отражает общий поток загрязнения веществ от центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, глобальными загрязняющими элементами являются также другие халькофильные элементы – Cd, As и Hg. Максимальные концентрации Ni и Cu, которые превышают их фоновое содержание в 10–130 раз, зарегистрированы в пределах 10-километровой от комбината «Печенганикель». На расстояниях 10–30 км от источника загрязнения эти концентрации только в 3–7 раз превышали фоновое содержание. Концентрации Co были в 4–10 раз больше фонового содержания в пределах 15 км от источника загрязнения и до 3 раз больше в других озерах на бóльшем расстоянии, что указывает на загрязнение атмосферных выбросов плавильными цехами комбината «Печенганикель». Озера Куэтсъярви, LN-2, LN-3, LN-4 получают основную часть выбросов комбината «Печенганикель», в поверхностных слоях ДО этих озер отмечены максимальные концентрации Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Hg и As. Высокие концентрации Cd, Pb, Hg и As найдены также в ДО некоторых озер, удаленных от комбината «Печенганикель», что связано с глобальным загрязнением этими элементами в последние 20–30 лет.

В результате исследований химического состава ДО озер северо-запада Мурманской обл. 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 Cu комбинатом составляли 300 и 200 т/год соответственно, а стоки – 5 и 0.2 т/год. За 70-летний период деятельности комбината «Печенганикель» в компонентах окружающей среды (главным образом в наземных экосистемах – в почвах и растениях) накопилось огромное количество ТМ, которые после отмирания растений и разложения органических остатков со склоновым стоком, почвенными и подземными водами в виде органических и неорганических соединений постепенно поступают в водотоки и водоемы. С учетом накопленных ТМ в наземных экосистемах и многолетнего периода их самоочищения, интенсивное поступление ТМ в водоемы будет продолжаться еще не один десяток лет, даже если резко снизятся их выбросы в окружающую среду.

Значительная часть ТМ, попадающих в озера в составе сточных вод и выпадающих на территории водозабора из атмосферы, сорбируется на взвешенных частицах, затем оседает на дно озер и накапливается в ДО. Поэтому их содержание в ДО характеризует полную антропогенную погрузку на водосбор и само озеро, позволяет определять источники загрязнения и установить исторические тренды в нагрузке и изменении содержания загрязняющих элементов в воде и ДО. В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних нескольких сантиметрах ДО намного выше, чем их концентрации в водной толще. Тесная связь микроэлементов (например, ТМ) во взвешенном материале и в ДО означает, что распределение, транспорт и доступность этих элементов водным организмам нельзя правильно оценить только посредством отбора образцов воды и анализа растворимой фазы, при оценке экологического состояния озер и интенсивности их загрязнения необходимо осуществлять отбор проб ДО и исследование их химического состава, особенно содержания основных загрязняющих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Морецкий В.Н.* О некоторых характеристиках долгопериодного крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой Северного полушария // Тр. ААНИИ. Л., 1976. Т. 319. С. 4–23. **2.** *Моисеенко Т.И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с. **3.** *Кашулин Н.А.* Рыбы малых озер Северной Фенноскандии в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. 130 с. **4.** Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area / *N.A. Kashulin, V.A. Dauvalter, S.S. Sandimirov, I.M. Koroleva* // Finland. Kuopio: Kopijyva Oy, 2008. 141 p. **5.** *Мур Дж.В., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 285 с. **6.** *Зейлер Г.* Некоторые проблемы анализа биологических материалов на содержание токсичных элементов в следах // Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир, 1993. С. 246–269. **7.** *Blevins R.D., Pancorbo O.C.* Metal concentrations in muscle of fish from aquatic systems in east Tennessee, U.S.A. // Water, Air and Soil Pollution. 1985. No. 29. P. 361–371. **8.** *Nriagu J.O.* Global metal pollution // Environment. 1990. Vol. 32. P. 6–21. **9.** *Sorensen E.M.* Metal poisoning in fish, U.S.A. Texas: CRC Press, 1992. 362 p. **10.** *Моисеенко Т.И.* Закисление и загрязнение тяжелыми металлами поверхностных вод Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1991. 48 с. **11.** Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / *Т.И. Моисеенко, И.В. Родюшкин, В.А. Даувальтер, Л.П. Кудрявцева.* Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 263 с. **12.** *Моисеенко Т.И.* Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М: Наука, 2003. 276 с. **13.** *Horowitz A.J.* A primer on trace metal-sediment chemistry. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 2nd rew. ed. 1991. 136 p. **14.** Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран: в 2 ч. / Н.А. Кашулин, С.С. Сандимиров, В.А. Даувальтер, П.М. Терентьев, Д.Б. Денисов. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с.; Ч. 2. 262 с. **15.** *Даувальтер В.А.* Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): дис. … докт. геогр. наук. Апатиты, 1999. 399 с. **16.** *Dauvalter V.* Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61. **17.** *Даувальтер В.А.* Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 24–35. **18.** *Даувальтер В.А.* Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. 1997. № 6. С. 43–53. **19.** *Даувальтер В.А.* Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500. **20.** *Даувальтер В.А.* Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002. № 4. С. 65–73. **21.** *Dauvalter V., Rognerud S.* Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **22.** *Dauvalter V.* Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in

sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215. **23.** Airborne contamination by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) / *T.I. Moiseenko, L.P. Kudryavtseva, I.V. Rodyushkin [et al.]* // Sci. Tot. Environ. 1995. Vol. 160/161. P. 715–727. **24.** *Даувальтер В.А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с. **25.** *Даувальтер В.А., Кашулин Н.А.* Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 106–121. **26.** *Rognerud S., Norton S.A., Dauvalter V.* Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p. **27.** Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н.А. Кашулин и др. // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №1. С. 98–107. **28.** *Appleby P.G., Oldfield F.* The calculation of the ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to sediments // Catena. 1978. Vol. 5. P. 1–8. **29.** *Håkanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

Сведения об авторах

Даувальтер Владимир Андреевич – д.г.н., профессор, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Кашулин Николай Александрович – д.б.н., профессор, зав. лабораторией водных экосистем, зам. директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; e-mail: nikolay@inep.ksc.ru