

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СИСТЕМЫ РЕКИ ПАСВИК В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО И ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Аннотация

Колонки донных отложений (ДО) озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик были отобраны в семи озерах для оценки влияния деятельности горно-металлургического комбината на состояние водной системы. Максимальные концентрации исследованных тяжелых металлов (ТМ) (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Hg, As) в поверхностных слоях ДО отмечены в оз. Куэтсьярви, принимающем стоки комбината «Печенганикель». Вниз по течению р. Пасвик от места поступления сточных вод наблюдается снижение содержания ТМ в поверхностных слоях ДО, хотя загрязнение остается достаточно высоким. В озерах, загрязняемых только воздушным путем и коммунально-бытовыми сточными водами, в поверхностных слоях ДО не отмечено увеличения содержания ТМ, выбрасываемых в атмосферу в значительных количествах комбинатом «Печенганикель» (Ni, Cu, Co, Zn), но обнаружено значительное увеличение (до 5–10 раз по сравнению с фоновыми содержаниями) концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As). Средняя скорость осадконакопления в исследованных озерах оказалась немного больше (1–3 мм/год), чем в среднем для озер северной Фенноскандии (менее 1 мм/год). В некоторых озерах отмечено увеличение содержания фосфора по направлению к поверхности ДО, что может говорить о развитии процессов эвтрофирования.

Ключевые слова:

донные отложения, река Пасвик, тяжелые металлы, загрязнение.



Введение

Самую большую водную систему в северной части Фенноскандии образуют оз. Инари и р. Пасвик (рис. 1). Ее водосбор расположен на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии. Антропогенное влияние на наземные и водные экосистемы вызвано главным образом выбросами ТМ, сернистого газа, пыли, щелочных и щелочноземельных металлов плавильными цехами комбината "Печенганикель", а также хозяйственно-

бытовыми сточными водами населенных пунктов, расположенных на водосборе этой системы.

Озеро Инари – третье по величине озеро в Финляндии. Оно расположено на высоте 119 м над уровнем моря, севернее полярного круга в северной части Лапландии (рис. 1). Его площадь 1040.28 км², глубина – до 92 м, объем – 15.9 км³.

Река Пасвик (длина 167 км) вытекает из оз. Инари и впадает в Баренцево море. Площадь водосбора реки – 20 890 км², из которых 69.8% принадлежит Финляндии, 27.2% – России и 5% – Норвегии [1]. Река является пограничной между Россией и Норвегией практически на всем протяжении российско-норвежской границы, за исключением крайней северной ее части (рис. 1). Влияние приливов сказывается на протяжении 4 км выше устья реки до плотины Борисоглебской ГЭС. Река состоит из речных отрезков и озер, общая протяженность озер – 61.7 км. Наибольшие озера – Ваггатем (35 км²), Лангватн (10 км²), Сванватн (32.5 км²) и Бьерневатн (15 км²). На реке расположены семь электростанций – Кайтокоски, Янискоски, Раякоски, Хевоскоски, Борисоглебская, Скогфосс и Мелькефосс. Первые пять принадлежат России, последние две – Норвегии. Все водоемы зарегулированы. Регулирование стока оз. Инари и р. Пасвик началось в 1951 г. с максимальной установленной амплитудой 2.36 м. Уровень воды оз. Инари понижается в течение зимы, а летом – повышается. Следовательно, регулирование стока увеличивает поток воды в течение зимы и уменьшает в течение весны и лета [2].

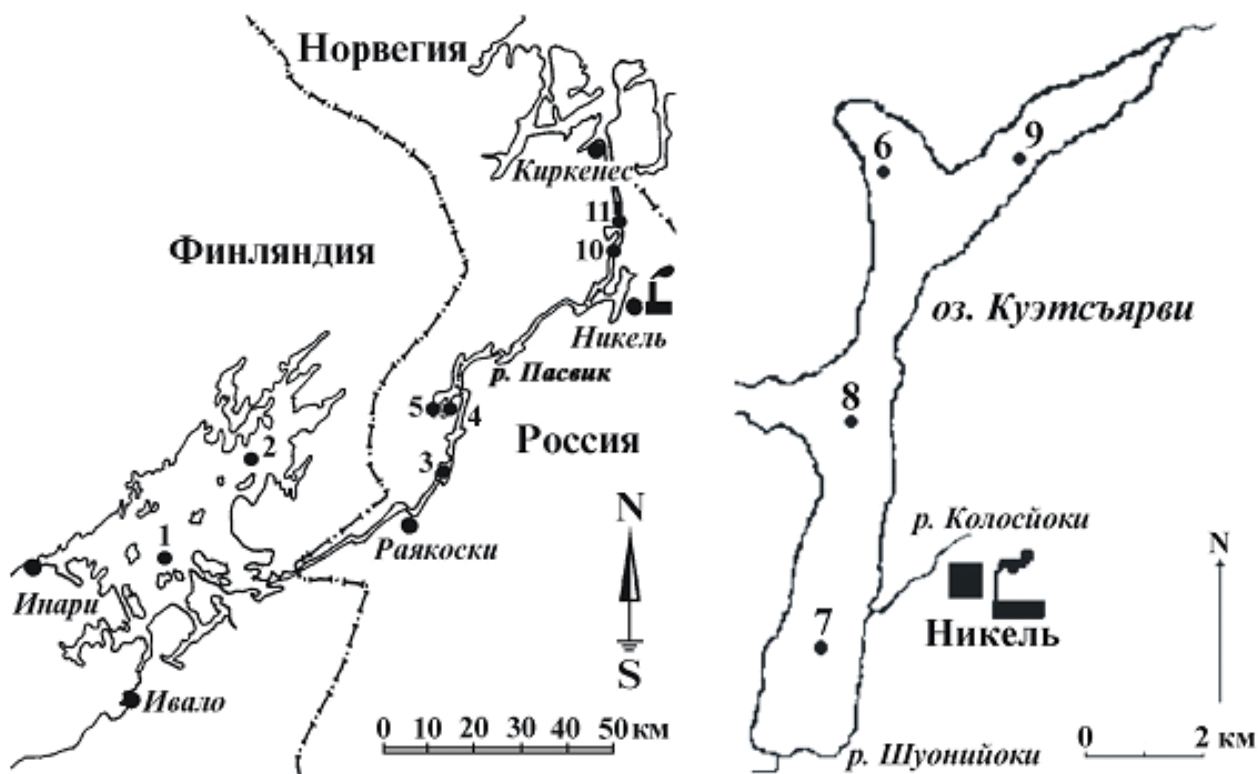


Рис. 1. Схема отбора проб ДО в водной системе р. Пасвик. Номера станций в этом и других рисунках соответствуют порядковым номерам в таблицах 1, 2 и 3.

Озеро Куэтсьярви расположено в 4.5 км ниже выпуска сточных вод комбината "Печенганикель" в р. Колосйюки (рис. 1). Длина озера с юга на север 11.5 км, ширина колеблется от 1 до 2 км, максимальная глубина – 32 м. Площадь водного зеркала 18 км². Самые крупные притоки озера – р. Шуонийюки (50% стока в озеро) и р. Колосйюки (30% стока). Из озера вытекает одна протока, соединяющая его с р. Пасвик. Длина протоки 2.7 км, ширина – до 600 м, расход воды – 7–11 м³/сек. Годовой объем стока в оз. Куэтсьярви изменяется от 218 до 350 млн м³ [3]. На берегу озера расположен довольно крупный промышленный центр – пос. Никель, административный центр Печенгского района Мурманской обл. Вследствие относительно больших размеров оз. Куэтсьярви имеет рекреационное значение. На его берегах размещены базы отдыха предприятий района, летние домики и огороды, лодочные и автомобильные гаражи жителей поселка, которые дополнительно вносят в озеро загрязняющие вещества.

Разработка Печенгских медно-никелевых месторождений начата в 1932 г. канадско-финской компанией (после Октябрьской революции территория нынешнего Печенгского района отошла к Финляндии, а после советско-финской войны 1939–1940 гг. вошла в состав СССР). Комбинат "Печенганикель" функционирует с 1946 г., когда в пос. Никель возобновилась переработка местных сульфидно-никелевых руд. В 1959 г. развернулась добыча руд Ждановского месторождения и их переработка на заводе в г. Заполярный. В состав выбросов комбината входят сернистый газ, Ni, Cu, пыль, а также окислы азота и окись углерода от котельных. Общие закономерности переноса воздуха в пограничном слое атмосферы (до 1500 м) обуславливают преобладающее распространение выбросов медно-никелевых комбинатов на дальние расстояния с запада на восток, т.е. не в направлении сопредельных западных государств [4]. Следовательно, можно предположить, что именно стоки, а не атмосферные выбросы комбината "Печенганикель" оказывают наибольшее влияние на загрязнение акватории р. Пасвик, особенно ниже впадения сточных вод в речную систему.

Для системы р. Пасвик характерны две главные экологические проблемы – загрязнение ТМ и эвтрофирование [1]. Первая проблема связана с выбросами и стоками комбината

«Печенганикель». Вторая вызвана регулированием стока оз. Инари и р. Пасвик, а также поступлением хозяйственно-бытовых стоков населенных пунктов, расположенных на водосборе р. Пасвик.

Металлы поступают в водные объекты с территории водосбора и с атмосферными осадками. Содержание растворенных форм ТМ в воде озер невелико. Они усваиваются гидробионтами и адсорбируются взвешенными частицами, оседающими на дно и образующими ДО озер. Металлы могут также захватываться и непосредственно ДО [5]. Следовательно, ДО, особенно в глубоких частях озер, характеризуют степень загрязнения окружающей среды ТМ.

Цель исследований – оценка степени загрязнения водных объектов системы р. Пасвик с учетом фоновых концентраций ТМ, распределения ТМ в толще и поверхностных слоях ДО.

Материалы и методы

Содержание и поведение металлов в ДО оз. Инари и р. Пасвик исследовалось в рамках проекта Интеррег ША Коларктик «Развитие и реализация мониторинга окружающей среды и программа оценки в приграничном районе между Финляндией, Норвегией и Россией». Колонки ДО отбирались в период 2002 – 2004 гг. на двух станциях оз. Инари глубиной 15 и 42 м (ст. 1 и 2), на пяти водоемах системы р. Пасвик: Хестефосс (ст. 3, глубина 10.5 м), Рускебукта (ст. 4, 15 м), Ваггате (ст. 5, 19 м), Бьерневатн (ст. 10, 23 м) Скруккебукта (ст. 11, 37 м) и на четырех станциях оз. Куэтсъярви: ст. 6 – Гольфстрим (23 м), ст. 7 – Колосйоки (12 м), ст. 8 – Салмиярви (10 м), ст. 9 – Белый Камень (32 м) (рис. 1).

Колонки ДО на исследуемых водоемах взяты отборником колонок ДО открытого гравитационного типа (внутренний диаметр – 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой. Колонки ДО были разделены на слои по 1 см. Толщина анализируемого слоя ДО – один из важных параметров в силу следующих причин. Достаточно сложно отобрать представительные и подходящие по массе для проведения химических анализов образцы, если используются слои менее 1 см, поскольку поверхностные слои ДО в зонах аккумуляции очень рыхлые и мягкие и характеризуются влажностью более 90%. С другой стороны, концентрации элементов, определенные в более мощных слоях, менее точны и некорректно оценивают состояние загрязнения современных ДО, особенно, если скорость седиментации низкая (для пресноводных систем севера Фенноскандии ~1 мм/год [6]) и существует интенсивное биологическое перемешивание ДО донными организмами.

Пробы ДО помещались в полиэтиленовые контейнеры и отправлялись в лабораторию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН для анализа, где хранились при температуре 4 °С. Образцы (примерно 5 г) высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 6 ч., далее определялась влажность образца. Затем образцы прокаливались в муфельной печи при температуре 450–500 °С в течение 4 ч. для определения потерь при прокаливании (ППП) как косвенного показателя содержания органического вещества. После этого образцы растирались в яшмовой ступе и сохранялись при температуре 4 °С до химического анализа. Для определения валовых концентраций металлов 0.4-граммовая навеска образца обрабатывалась 4 мл концентрированной азотной кислотой (HNO₃) класса ОСЧ (особой чистоты) в автоклаве с тефлоновым вкладышем при температуре 140 °С в течение 4 ч, после чего содержимое автоклава охлаждалось до комнатной температуры, и 2 мл аликвота перемещались в пластиковую бутылочку (60 мл) и разбавлялись деионизированной водой до объема 25 мл. Результирующий раствор анализировался атомно-абсорбционным спектрофотометром (AAS-3, Perkin-Elmer). Все концентрации ТМ выражены в микрограммах на грамм (мкг/г) сухого веса. Подробно метод пробоподготовки и химического анализа описан в [7, 8].

Антропогенное влияние на экосистемы озер мы определяли с помощью коэффициента загрязнения (C_f) каждого приоритетного загрязняющего ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, Hg, As). Значения C_f находили путем деления концентраций ТМ в поверхностном 1-см слое на его фоновое содержание (метод Л. Хокансона [9, 10]). Степень загрязнения (C_d) вычисляли суммированием всех значений C_f восьми ТМ для данного озера. В этом подходе придерживались следующей классификации C_fⁱ: C_fⁱ < 1 – низкий; 1 ≤ C_fⁱ < 3 – умеренный; 3 ≤ C_fⁱ < 6 –

значительный; $C_f^i \geq 6$ – высокий коэффициент загрязнения. При характеристике C_d исходили из расчета суммы значений C_f по восьми элементам: $C_d < 8$ – низкая; $8 \leq C_d < 16$ – умеренная; $16 \leq C_d < 32$ – значительная; $C_d \geq 32$ – высокая степень, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Результаты и их обсуждение

Водоемы (и их ДО как хранилище физических и химических продуктов разрушения широкого круга химических веществ) служат коллекторами всех веществ, поступающих на территорию водосборов. ДО – важные источники информации о климатических, геохимических, экологических условиях на водосборе и в самом водоеме – отражают современное экологическое состояние воздушной и водной сред. Концентрации ТМ в ДО позволяют оценить интенсивность и историю загрязнения исследуемых озер. ДО рассматриваются как источник экологической информации, которую можно использовать для различных обобщений.

Фоновые концентрации тяжелых металлов

Пробы ДО, отобранные из самых глубоких слоев колонки (обычно между 20 и 30 см), позволяют определить фоновые концентрации ТМ при исследовании загрязнения озер. Возраст этих слоев несколько сотен лет, т.е. они образованы до индустриального развития северной части Фенноскандии. Эти слои отражают природные геохимические особенности водосбора и позволяют оценить степень загрязнения водных объектов, а также выявить аномалии концентраций металлов с целью поисков месторождений полезных ископаемых [11].

Фоновые концентрации элементов и величины ППП в ДО водоемов системы р. Пасвик приведены в табл. 1. Статистические параметры определены без учета данных по ст. 7 оз. Куэтсъярви, так как в этой части озера интенсивно накапливается сильно загрязненный материал, приносимый р. Колосйоки и поступающий с комбината «Печенганикель». О том, что самые нижние слои отобранной колонки ДО на ст. 7 представлены сильно загрязненным минеральным материалом, говорят также очень незначительные величины содержания органического материала (значение ППП в слое 12–13 см менее 1%).

Максимальные фоновые концентрации большей части ТМ (Ni, Zn, Co, Cd, Hg, As) отмечены на ст. 8 оз. Куэтсъярви, что обусловлено геохимическими и морфометрическими особенностями территории водосбора и самого озера, на водосборе которого находятся медно-никелевые сульфидные залежи, представленные такими минералами, как пентландит $(Fe, Ni)_9S_8$, халькопирит $CuFeS_2$, кобальтит $(Co, Ni)AsS$, никелин $NiAs$ и другими [12]. Установлено, что фоновые концентрации вышеперечисленных элементов в ДО оз. Куэтсъярви в 2–10 раз выше, чем в других исследуемых озерах.

Вместе с тем отмечено, что фоновые концентрации ТМ (за исключением Hg) минимальны (или одни из наименьших) в ДО самой северной и самой глубокой акватории оз. Куэтсъярви – залива Питкялоукко, где была отобрана колонка ДО на ст. 9, что связано с геохимическими особенностями водосбора озера. В этот залив впадает р. Кувернеринйоки, на ее водосборе не выявлено залежей медно-никелевых руд.

В озерах Рускебукта и Скруккебукта отмечены наибольшие концентрации соответственно Cu и Pb в самых глубоких слоях колонок ДО. Фоновые концентрации ТМ в ДО озер Инари, Куэтсъярви и Имандра [7, 8, 13–19] приблизительно равны.

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 антропогенной индустриальной деятельности на водные экосистемы.

Таблица 1

Фоновые концентрации элементов (мкг/г) и потери веса при прокаливании (ППП, %) в ДЮ системы р. Паевик

№	Озеро, станция	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	Cr	Mn	Fe	K	Na	Ca	Mg	Sr	Al	P
1	Инари-1	13.14	46	48	117	22	0.11	4.6	1.77	0.030	85	4337	92193	4067	483	982	7201	30	31582	2138
2	Инари-2	12.14	48	61	91	22	0.15	4.9	1.62	0.042	94	2323	66472	3972	472	1197	7404	30	32267	1548
3	Хестефосс	4.74	36	46	100	21	0.05	6.8	3.95	0.021	84	281	32901	5630	637	1395	10584	41	31205	498
4	Рускебукта	13.96	62	63	112	26	0.09	12.4	4.37	0.038	92	310	40661	6601	711	1014	11661	39	34811	735
5	Ваггаем	8.08	55	58	126	30	0.08	9.2	6.01	0.015	112	396	52226	7005	726	2057	13723	18	44001	572
6	Куэзъярви-6	8.47	47	39	106	21	0.16	8.4	7.95	0.035	83	610	31431	5411	735	1556	10901	44	27825	497
7	Куэзъярви-7	0.93	373	1087	99	43	0.35	4.5	11.1	0.017	1007	647	65383	2303	246	1486	60684	25	29313	447
8	Куэзъярви-8	9.50	52	66	127	31	0.18	9.2	11.9	0.007	86	2112	39822	5611	1055	1719	11593	41	30821	1115
9	Куэзъярви-9	10.67	40	32	80	16	0.10	6.6	2.62	0.049	67	279	25457	5189	1017	2427	9702	31	26121	619
10	Бьерневати	9.47	42	58	100	27	0.11	11.2	3.36	0.003	81	875	52620	6100	783	2067	12247	19	31466	1105
11	Скруккесбукта	7.63	58	64	123	25	0.09	14.0	3.95	0.021	114	401	41191	9571	1328	1244	11848	59	41191	608
	Среднее	9.78	49	54	108	24	0.11	8.7	4.75	0.026	90	1192	47497	5916	794	1566	10686	35	33129	944
	Минимальное	4.74	36	32	80	16	0.05	4.6	1.62	0.003	67	279	25457	3972	472	982	7201	18	26121	497
	Максимальное	13.96	62	66	127	31	0.18	14.0	11.92	0.049	114	4337	92193	9571	1328	2427	13723	59	44001	2138
	Стандартное отклонение	2.79	8	12	16	5	0.04	3.1	3.16	0.015	14	1340	19745	1606	267	491	2074	12	5560	542

Примечание. Статистические параметры определены без учета данных по станции Куэзъярви-7.

Вертикальное распределение элементов в донных отложениях

Эти исследования особенно актуальны для регионов с высокоразвитой горно-металлургической промышленностью, где отмечено аномальное распределение ТМ вследствие геохимических особенностей и влияния загрязнения на среду обитания [20].

Значительное увеличение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As) по отношению к фоновым содержаниям обнаружено в поверхностных слоях ДО в оз. Инари

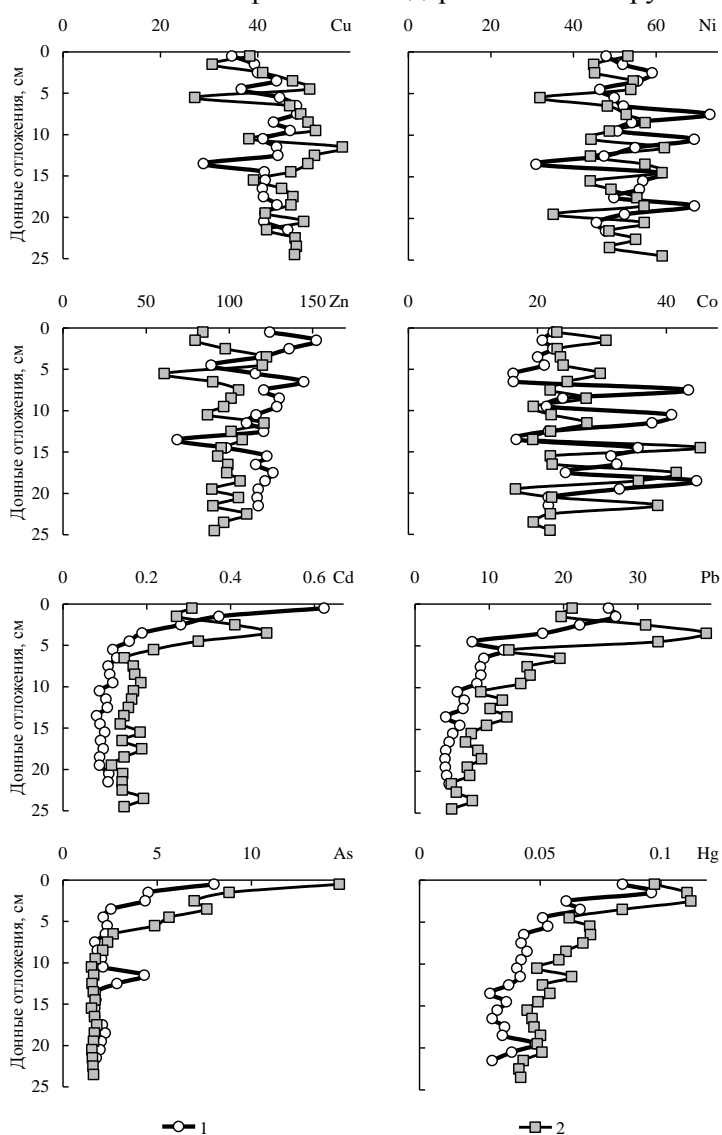


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г) в колонках ДО оз. Инари

и проявлять процессы закисления вод, приводящие к высвобождению мобильных элементов из ДО [25–27]. Меньшее количество этих элементов поступает в озеро в составе минеральных частиц, идущих на формирование ДО, вследствие уменьшения их содержания в процессе выщелачивания почв водосбора [23].

В вертикальном распределении концентраций Ni, Cu, Co и Zn в ДО водоемов Хестефосс, Рускебукта, Ваггатем, расположенных вверх по течению от места поступления загрязненных вод из оз. Куэтсьярви, не отмечено значительных изменений (рис. 3), что совпадает с результатами исследований ДО оз. Ваггатем в 1988 г. [28] и озер Раякоски и Скогфосс, расположенных также вверх по течению от оз. Куэтсьярви, в 1993 г. [15]. Однако, как и в ДО оз. Инари, обнаружено заметное увеличение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As) в поверхностных слоях озер Хестефосс, Рускебукта и Ваггатем по сравнению с фоновым содержанием. Наибольшее увеличение отмечено для Hg (Хестефосс и Рускебукта) и Cd

(рис. 2), причем заметное увеличение их концентраций отмечено с глубины 5–10 см. Увеличение скорости аккумуляции Pb, вероятно, вызвано глобальным загрязнением атмосферы северного полушария [21]. Поступление Pb во многие озера связывают также с его осаждением из атмосферы и с автомобильными выхлопами [22–24]. Запрещение использования этилированного бензина в последние десятилетия привело к уменьшению его поступления с выхлопными газами и некоторому уменьшению его содержания в самых верхних слоях ДО (рис. 2). В этих слоях также отмечается небольшое снижение концентраций Cd на ст. 2 и Hg на обеих станциях озера. Концентрации Ni, Cu, Co и Zn, в отличие от халькофильных элементов, не увеличиваются в поверхностных слоях ДО обеих станций, а наоборот, уменьшаются по сравнению с фоновыми содержаниями или остаются на уровне фоновых.

Отмечено снижение концентраций Al, Na, K и Mg в поверхностных слоях ДО оз. Инари. Этот факт можно связать с поступлением большого количества кислотных соединений, выбрасываемых в атмосферу как точечными источниками (например, комбинатами "Печенганикель" и "Североникель", котельными), так и автомобильными выхлопами. Эти соединения могут вызывать

(Хестефосс). Это увеличение, возможно, напрямую не связано с деятельностью комбината "Печенганикель", потому что эта часть водосбора р. Пасвик незначительно подвержена влиянию выбросов ТМ комбинатом [29], а подтверждает вывод многих экологов о глобальном загрязнении окружающей среды халькофильными элементами, особенно в арктической и субарктической зонах Северного полушария [30]. В результате исследований химического состава ДО озер водосбора Белого моря в пределах Кольского п-ова установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) во всех исследуемых водных объектах вне зависимости от того, испытывают ли они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [31].

В ДО озер Бьерневатн и Скруккебукта, расположенных ниже по течению от места поступления загрязненных вод из оз. Куэтсъярви, максимальные концентрации ТМ (за исключением Pb в оз. Бьерневатн) отмечены

в верхнем 1-см слое ДО (рис. 3). Содержание Pb уменьшается в поверхностных 3-см ДО оз. Бьерневатн, а максимальные концентрации выявлены в слое 3–7 см. Значительное увеличение концентраций ТМ по отношению к фоновому отмечено с глубины 8 и 3 см ДО озер Бьерневатн и Скруккебукта соответственно. Учитывая, что комбинат "Печенганикель" – главный источник загрязнения этого региона уже в течение 70 лет, можно оценить скорость осадконакопления как примерно 1.1 и 0.4 мм/год в озерах Бьерневатн и Скруккебукта соответственно. Рост концентраций органического материала отмечен с глубины 6 и 2 см по направлению к

поверхности ДО в озерах Бьерневатн и Скруккебукта соответственно. Отмечается снижение концентраций K, Ca, Mg и Al по направлению к поверхности ДО озер Бьерневатн и Скруккебукта, это может быть связано с поступлением большого количества сульфатов в составе сточных вод комбината «Печенганикель», вызывающих высвобождение щелочных и щелочноземельных металлов и Al из взвешенных частиц и ДО и переход их в растворимую форму. Содержание сульфатов в воде озер Бьерневатн и Скруккебукта выше в 2–3 раза всех остальных исследуемых озер системы р. Пасвик, за исключением оз. Куэтсъярви.

Повышение концентраций основных загрязняющих элементов, сбрасываемых в оз. Куэтсъярви через р. Колосйоки комбинатом «Печенганикель», отмечается на разной глубине на различных станциях озера (рис. 4). На ст. 7, ближе всех расположенной к устью р. Колосйоки, ТМ так и не достигли фоновых значений, поэтому данные по ст. 7 не учитывались при подсчете средних фоновых содержаний. Это связано с большим поступлением взвешенных минеральных веществ в составе стоков комбината и их отложением в ближайшей акватории озера. Данное предположение подтверждается также небольшим содержанием органического материала в ДО ст. 7 – не более 2% до

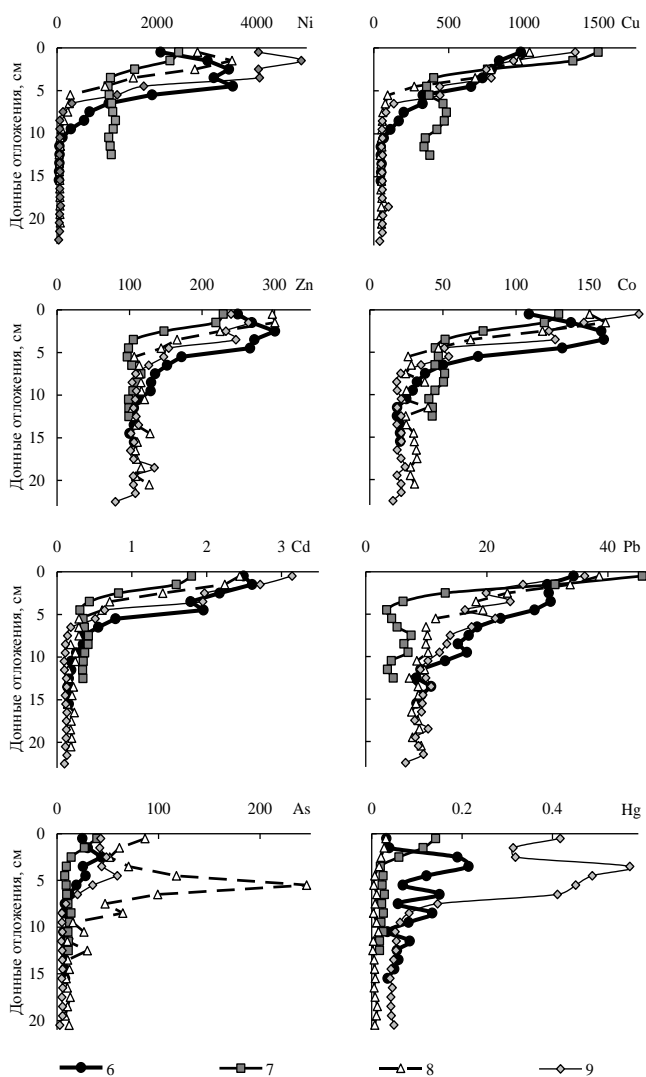


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г) в колонках ДО оз.

глубины 3 см, затем к поверхности ДО величина ППП увеличивается до 12%. Поэтому на этой акватории довольно высокая скорость осадконакопления.

На станциях 6 (Гольфстрим) и 8 (Салмиярви) повышение содержания Ni, Cu, Co и Zn фиксируется, начиная с глубины 12 см, а на ст. 9 (Белый Камень) – 8 см, следовательно, учитывая 70-летнюю историю загрязнения озера стоками комбината «Печенганикель», можно приближенно подсчитать скорость осадконакопления для вышеназванных станций – 1.7 и 1.1 мм/год соответственно. Скорость седиментации в оз. Куэтсьярви по косвенным расчетам ранее определялась равной 1.5–3 мм/год [8, 13, 15–18], что, учитывая колонку со ст. 7, где не удалось отобрать слои ДО, соответствующие фоновым значениям, совпадает с нашими расчетами.

Такие элементы, как Cu, Cd, Pb, имеют поверхностные максимумы в ДО всех станций оз. Куэтсьярви (рис. 4). Остальные исследуемые ТМ (Ni, Co, Zn, Hg и As) характеризуются максимальными концентрациями на глубине 2–6 см ДО для практически всех станций озера (рис. 4). Исключение составляет ст. 7. Подобное вертикальное распределение было отмечено в ДО оз. Рюсянярви, расположенного в 17 км северо-восточнее плавильных цехов комбината "Печенганикель" [24]. Уменьшение концентраций этих элементов в верхних 1–2 см ДО оз. Куэтсьярви можно объяснить изменениями физико-химических условий в самом озере и на территории его водосбора, а также уменьшениями сбросов ТМ комбинатом "Печенганикель" [32]. Например, сброс Ni с 1990 по 2007 гг. сократился с 12.9 до 4.4 т/год, а выбросы этого ТМ в атмосферу в указанный период остаются примерно одинаковыми и находятся в пределах 300–350 т/год (официальные данные Кольской горно-металлургической компании – <http://www.kolagmk.ru/>). На этой же глубине отмечены и максимальные концентрации Al, Ca и Mg, которые поступают в озеро со сточными водами и атмосферными выбросами.

Ранее [16, 18] было подсчитано, что за период деятельности комбината "Печенганикель" в ДО оз. Куэтсьярви было накоплено 310 т Ni, 120 т Cu, 14 т Co, 19 т Zn, 0.087 т Cd, 0.78 т Pb и 0.053 т Hg.

На рис. 5 представлено вертикальное распределение концентраций Fe и Mn в ДО озер Инари, Бьерневатн, Куэтсьярви (ст. 9 – самая глубокая акватория озера). Увеличение концентраций Fe и Mn в поверхностных слоях ДО характерно как для больших озер (Имандра [19] и Инари [15]), так и для малых (оз. Чуна водосбора оз. Имандра [19], оз. Кутсасьярви, северная Швеция [33]). Максимальные содержания Mn (превышающие кларковые и фоновые в 10–50 раз) в толще ДО исследуемых озер приурочены к поверхностному 1-см слою. Вероятная причина в том, что смена окислительных условий на восстановительные происходит именно в этом верхнем слое, и восстановление плохо растворимых окислов Mn^{4+} до растворенного иона Mn^{2+} происходит при более высоком редокс-потенциале (т.е. при более высоких концентрациях растворенного O_2), чем восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} . Значит, максимальные содержания Fe (превышающие кларковые и фоновые до 10 раз) в ДО могут отмечаться и на большей глубине, т.е. в условиях более низкого значения окислительно-восстановительного потенциала Eh (при низких концентрациях растворенного O_2). Чем лучше придонные слои воды и поверхностные слои ДО снабжаются кислородом, тем на большей глубине ДО происходит отложение трудно растворимых окислов Fe^{3+} [34]. Увеличение концентраций Fe в подповерхностных слоях ДО (рис. 5) связано с процессами молекулярной диффузии растворенных закисных форм Fe из нижележащих ДО, характеризующихся анаэробными условиями и обладающих восстановительным потенциалом, вверх к контакту с окисленной зоной водной толщи, где они, окисляясь, вновь теряют подвижность и обогащают поверхностный окисленный слой. В [34] сделано предположение, что аккумуляция Fe и Mn и образование железомарганцевых конкреций в ДО озер севера Фенноскандии может происходить при наличии следующих трех определяющих условий: 1) значения pH воды нейтрально, и процессы закисления озер не проявляются; 2) высокое содержание растворенного кислорода по всей водной толще до дна в отсутствие процессов эвтрофирования озер; 3) озера достаточно глубокие – около 15 м и глубже. Вероятно, вышеописанные озера и их акватории удовлетворяют этим требованиям.

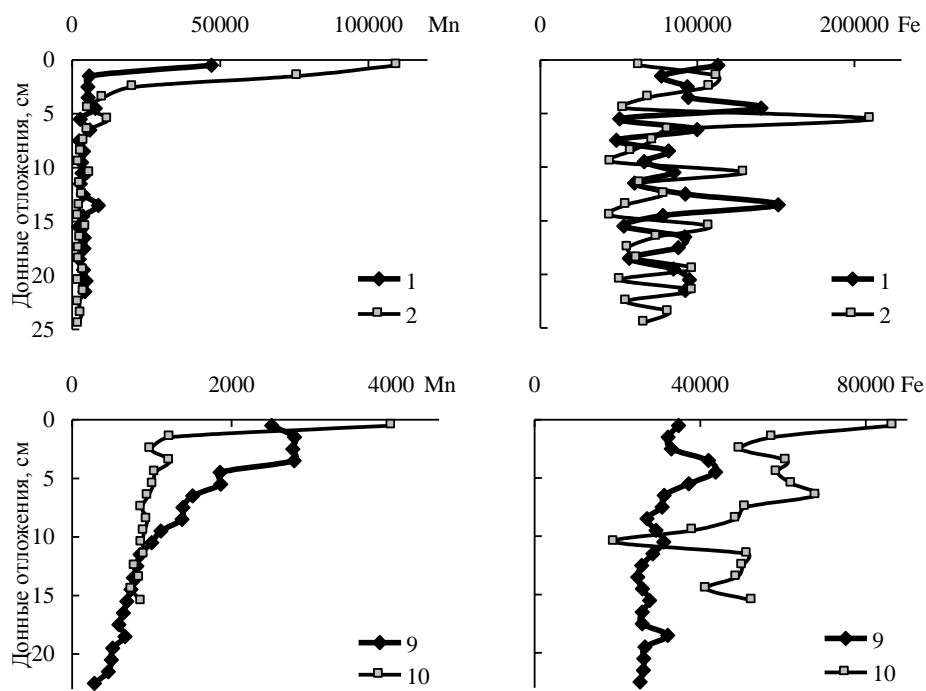


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций Fe и Mn (мкг/г) в колонках ДО водоемов системы р. Пасвик

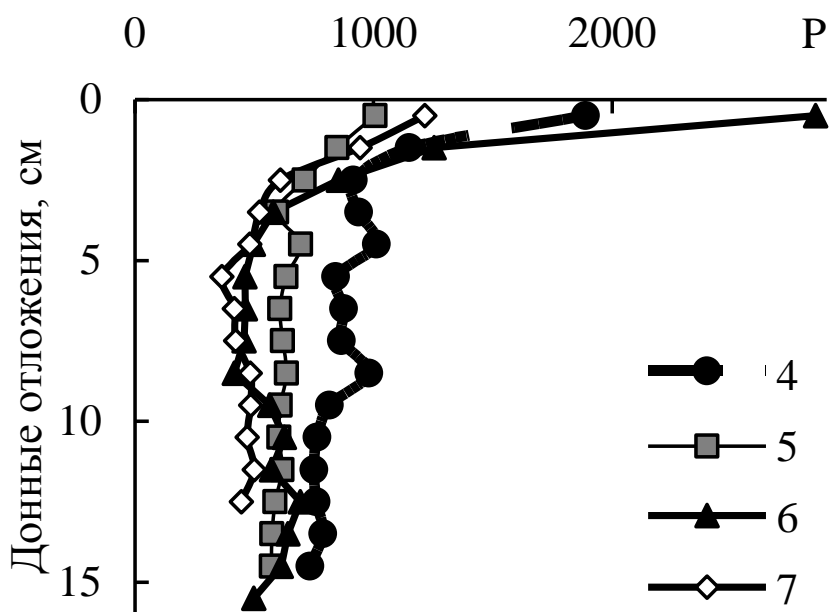


Рис. 6. Вертикальное распределение концентраций P (мкг/г) в колонках ДО водоемов системы р. Пасвик

В других озерах и станциях оз. Куэтсьярви отмечено увеличение содержания Р в поверхностных слоях ДО (рис. 6), что может говорить о проявлении эвтрофирования в этих озерах и аккумуляции биогенных элементов в экосистемах озер, в том числе и в ДО. Согласно нашим гидрохимическим данным, максимальная средневзвешенная по глубине концентрация общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) отмечена в воде оз. Рускебукта и составляет 25 мкгР/л во все периоды исследования. Содержание Р в этом относительно мелком плесе (средние глубины не превышают 3–4 м, максимальная глубина – 15 м) в значительной степени определяется уровнем развития продукционных процессов, которые, по наблюдениям авторов, находятся на постоянном уровне. Содержание $P_{\text{общ}}$ в оз. Куэтсьярви изменяется в пределах 4–31 мкгР/л, составляя в среднем 17 мкгР/л.

За период исследований концентрация $P_{\text{общ}}$ в придонных и поверхностных слоях различных акваторий речной системы р. Пасвик изменялась в пределах 3–39 мкгР/л, составляя в среднем 11 мкгР/л. Согласно исследованиям химического состава ДО, максимальные содержания фосфора в поверхностных слоях и максимальное их увеличение относительно фоновых содержаний (в 5.7 и 2.6 раз соответственно) отмечено в ДО ст. 4 и 6 (рис. 6, табл. 1 и 2). Следовательно, увеличение содержания биогенного элемента Р в поверхностных слоях ДО в некоторых озерах системы р. Пасвик может свидетельствовать о развитии процессов эвтрофирования, связанного с поступлением сточных хозяйственно-бытовых вод и регулированием стока реки, которые приводят к замедлению скоростей течения, застойным явлениям и, в конечном итоге, аккумуляции биогенных элементов в водных экосистемах. Фосфор, накопленный в ДО, может являться источником поступления этого биогенного элемента в водную толщу [35–37].

Вертикальное распределение металлов в ДО исследуемых озер позволяет изучить исторические тренды поступления ТМ под влиянием различных антропогенных факторов. Активная аккумуляция металлов связана с началом индустриальной деятельности в северной части Фенноскандии. Глобальным перемещением воздушных масс в северном полушарии обусловлено повышенное накопление халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg, As) в верхних слоях ДО озер.

Распределение элементов в поверхностных слоях донных отложений

Выбросы в атмосферу ТМ комбинатом "Печенганикель" и сточные воды плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников – главные источники повышенных концентраций ТМ в поверхностных слоях ДО водоемов системы р. Пасвик. Особенно интенсивно это проявляется в озерах Куэтсьярви и Бьерневатн. Вода системы р. Пасвик характеризуется нейтральными значениями рН и обладает значительной нейтрализующей способностью по отношению к большому объему поступающих от комбината кислотных соединений. Этот факт способствует захвату и аккумуляции в ДО мобильных ТМ (например, Ni, Cu, Cd) [38]. Преобладающие юго-западные ветры распределяют шлейф загрязнения главным образом в северо-восточном направлении (ДО в озерах на расстоянии > 20 км к югу от Никеля почти не загрязнены) [24]. Выпадения этих элементов в составе атмосферных осадков в северных районах Норвегии и Финляндии малы [39, 40]. Здесь отмечено слабое влияние выбросов комбината на содержание ТМ в поверхностных слоях ДО [7, 8, 13, 41–45]. Наибольшие концентрации Ni и Cu, превышающие фоновые значения в 10–380 раз, отмечены на расстоянии до 10 км от комбината "Печенганикель" [7, 8, 13]. Превышение фоновых концентраций уменьшается до 3–7 раз на расстоянии от 10 до 40 км от источника загрязнения. Концентрации Co были в 4–10 раз больше фоновых на расстоянии до 15 км от источника загрязнения и до 3 раз больше в других озерах, что свидетельствует о влиянии выбросов плавильных цехов.

Основная часть промышленных сточных вод комбината "Печенганикель" поступает в оз. Куэтсьярви, в поверхностных слоях ДО которого получены максимальные концентрации всех исследуемых ТМ (табл. 2). Это отмечалось также ранее проведенными исследованиями [8, 13, 46, 47]. Наибольшие концентрации ТМ выявлены на самой глубоководной ст. 9 (Ni, Co, Cd, Hg), на ст. 7 (Cu, Pb), наиболее близко расположенной к месту поступления сточных вод комбината «Печенганикель», а также на ст. 8 (Zn, As), ближе всего расположенной к протоке, соединяющей оз. Куэтсьярви и русловую часть р. Пасвик.

В нижнем течении р. Пасвик, особенно в озере Бьерневатн, зафиксирована значительная аккумуляция Ni, Cu, Co, Zn, Cd, As, что связано с поступлением загрязненной воды из оз. Куэтсъярви. В ДО оз. Инари, а также верхнего течения р. Пасвик, не отмечено превышения фоновых концентраций Ni, Cu, Co, Zn в поверхностных слоях ДО, за исключением Ni и Cu в оз. Ваггате (табл. 2).

Повышение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, As, Hg) зафиксировано в верхних слоях ДО оз. Инари и верхнего течения р. Пасвик (табл. 2). Наибольшие концентрации халькофильных элементов отмечены в оз. Инари, за исключением Hg, повышенные концентрации которой выявлены в озерах Рускебукта и Хестефосс, что, возможно, связано с регулированием стока, образованием водохранилищ и формированием в них органических соединений Hg, в первую очередь метилртути. Следовательно, атмосферные выбросы комбината «Печенганикель» не служат основными источниками загрязнения халькофильными элементами, эти источники могут находиться в северных районах Норвегии и Финляндии или в центральных индустриальных районах Европы. На содержание Pb в окружающей среде влияет тетраэтилсвинец – антидетонационная добавка в бензине.

Другое объяснение повышенных концентраций халькофильных элементов связано с их выбросами в атмосферу плавильными цехами, хотя и в относительно небольших (несколько т/год) количествах [29]. Так как халькофильные элементы имеют меньшую, чем Ni, Cu, Co и Zn, температуру плавления, они практически все переходят в состав аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу плавильными цехами, и распространяются на большее расстояние (подобно SO₂) по сравнению с другими ТМ. Значит, повышенные концентрации халькофильных элементов могут не фиксироваться вблизи комбината.

Наибольшие концентрации Fe и Mn в поверхностных слоях ДО среди исследованных озер получены в оз. Инари (табл. 2), это связано с большими размерами (площадью, глубиной, объемом воды озера), его олиготрофностью, хорошим снабжением кислородом водной толщи и верхних слоев ДО, что приводит к аккумуляции этих металлов в окисленной плохо растворимой форме в верхних слоях ДО.

Щелочноземельные металлы (Ca, Mg, Sr) в наибольших концентрациях обнаруживаются в поверхностном слое ДО оз. Куэтсъярви, причина состоит в повышенном поступлении этих металлов в составе сточных вод комбината «Печенганикель», в том числе и во взвешенном состоянии, что и сказалось на аккумуляции этих металлов в ДО (табл. 2).

Сброс хозяйственно-бытовых вод пос. Никель и производственной площадки комбината «Печенганикель», сельскохозяйственная и рекреационная деятельность на берегах оз. Куэтсъярви привели к усилению нагрузки на биогенные элементы и проявлению процессов эвтрофирования в озере, главным образом в южной мелководной части, что вызвало повышенную аккумуляцию P в ДО. В результате в поверхностных слоях ДО оз. Куэтсъярви обнаружены максимальные содержания P (табл. 2). Повышенные содержания P отмечены также и в озерах Бьерневатн и Рускебукта из-за регулирования стока и поступления хозяйственно-бытовых вод населенных пунктов на берегах озер.

Таблица 2

Концентрации элементов (мкг/г) и потеря веса при прокаливании (ППШ, %) в поверхностных ДО (0-1 см) системы р. Пасвик

№	Озеро, станция	ППШ	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	Cr	Mn	Fe	K	Na	Ca	Mg	Sr	Al	P
1	Инари-1	20.12	35	48	124	22	0.62	26.1	8.02	0.084	45	47015	113068	2064	234	1296	3736	49	16896	3181
2	Инари-2	18.18	38	53	84	23	0.31	21.2	14.7	0.097	57	109834	63158	2333	317	1427	4628	49	19308	1590
3	Хестефосс	35.68	32	37	81	19	0.18	8.8	4.45	0.143	61	435	30214	3452	387	1661	7119	50	22249	794
4	Рукебукта	19.00	67	70	95	21	0.15	17.2	8.55	0.161	90	360	54873	5683	675	1135	10161	50	31557	1889
5	Вагатам	12.55	75	87	122	28	0.11	15.6	7.56	0.042	117	400	54307	7357	680	1794	13171	19	43741	1007
6	Куэльсьярви-6	13.68	981	2075	249	109	2.49	34.3	25.0	0.033	162	1452	56363	4000	613	2382	11627	83	21475	2854
7	Куэльсьярви-7	11.83	1496	2435	229	129	1.80	45.7	39.2	0.142	349	541	59955	2383	729	2226	19166	57	20455	1215
8	Куэльсьярви-8	15.16	1039	2814	297	150	2.44	38.6	86.7	0.031	206	10024	78623	3169	550	2056	13904	79	20919	3687
9	Куэльсьярви-9	21.42	1343	4032	240	184	3.14	36.1	43.1	0.417	108	2501	34743	4227	790	2583	10490	38	22150	266
10	Бьерневатн	16.67	234	397	256	54	0.35	10.3	17.3	0.039	70	4013	86633	4440	802	1359	7991	27	23308	2268
11	Скруккебукта	11.95	169	280	127	39	0.27	26.8	6.89	0.017	116	570	45231	6852	834	1334	13643	47	34339	1309
	Среднее	17.84	501	1121	173	71	1.08	25.5	23.8	0.110	126	16104	61561	4178	601	1750	10512	50	25127	1823
	Минимальное	11.83	32	37	81	19	0.11	8.8	4.45	0.017	45	360	30214	2064	234	1135	3736	19	16896	266
	Макимальное	35.68	1496	4032	297	184	3.14	45.7	86.7	0.417	349	109834	113068	7357	834	2583	19166	83	43741	3687
	Стандартное отклонение	6.80	585	1444	81	61	1.15	12.1	24.7	0.114	88	33981	23813	1796	206	494	4506	19	8048	1069

Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Интенсивность загрязнения водных объектов можно оценить сравнением концентраций ТМ в поверхностном слое ДО и их фоновых значений. Методика определения коэффициентов и степени загрязнения водных экосистем ТМ в ДО с помощью C_f и C_d описана в [9, 10]. В [48-50] приведена методика определения коэффициента антропогенного обогащения ДО. Расчетные значения C_f и C_d показаны в табл. 3.

Максимальные значения C_f почти для всех исследуемых ТМ отмечены в ДО оз. Куэтсьярви (табл. 3), это вызвано прямым поступлением сточных промышленных вод комбината «Печенганикель». Оз. Куэтсьярви характеризуется высокими, по классификации Хакансона [8], значениями C_f для всех ТМ, за исключением Zn, для которого выявлено умеренное загрязнение.

Озеро Бьерневатн имеет высокие значения C_f для Ni и Hg, значительные для Cu, As, Cd и умеренные для остальных металлов. Вниз по течению в оз. Скруккебукта также отмечено влияние поступления сточных вод комбината «Печенганикель», проявляющееся в значительном загрязнении Ni. Значения C_f для Cu и Cd находятся на границе между умеренными и значительными, для остальных металлов отмечено умеренное загрязнение.

Для озер, расположенных вверх по течению от места поступления сточных вод комбината «Печенганикель», зафиксированы высокое и значительное загрязнение Hg (озера Хестефосс и Рускебукта соответственно), а также значительное загрязнение Cd в оз. Хестефосс. По остальным металлам в этих озерах получены низкие и умеренные значения C_f . В оз. Ваггатем отмечены умеренные значения C_f для всех металлов (табл. 3).

Таблица 3

Значения коэффициента загрязнения (C_f) и степени загрязнения (C_d) водоемов системы р. Пасвик

Озеро, станция	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	C_d
Инари-1	0.8	1.0	1.1	1.0	5.8	5.7	4.5	2.8	22.6
Инари-2	0.8	0.9	0.9	1.0	2.1	4.3	9.1	2.3	21.4
Хестефосс	0.9	0.8	0.8	0.9	3.9	1.3	1.1	6.8	16.5
Рускебукта	1.1	1.1	0.8	0.8	1.7	1.4	2.0	4.2	13.1
Ваггатем	1.4	1.5	1.0	1.0	1.5	1.7	1.3	2.9	12.1
Куэтсьярви-6	20.8	52.9	2.3	5.2	15.8	4.1	3.1	0.9	105.3
Куэтсьярви-7	4.0	2.2	2.3	3.0	5.2	10.1	3.5	8.1	38.5
Куэтсьярви-8	20.0	42.8	2.3	4.9	13.2	4.2	7.3	4.7	99.5
Куэтсьярви-9	33.5	125.7	3.0	11.6	32.1	5.5	16.4	8.5	236.2
Бьерневатн	5.6	6.9	2.6	2.0	3.1	0.9	5.2	12.2	38.3
Скруккебукта	2.9	4.3	1.0	1.6	3.0	1.9	1.7	0.8	17.4

Оз. Инари характеризуется высокими значениями C_f для As, значительными для Pb и Cd, умеренными для Hg. Другие ТМ в ДО оз. Инари имеют значения C_f на границе между низкими и умеренными (табл. 3).

В целом по всем исследованным загрязняющим элементам максимальное загрязнение выявлено в оз. Куэтсьярви (высокое значение C_d , табл. 3). Высокое по классификации Хокансона [8] значение C_d (но меньше, чем в оз. Куэтсьярви) отмечено в оз. Бьерневатн. Значительная величина C_d обнаружена в оз. Инари благодаря серьезному загрязнению ДО халькофильными элементами. В озерах Скруккебукта и Хестефосс величины C_d находятся на границе между низкими и умеренными. Низкие значения C_d зафиксированы в озерах Рускебукта и Ваггатем.

Заключение

Значительные фоновые концентрации большей части ТМ (Ni, Zn, Co, Cd, Hg, As) в ДО отмечены в южной части оз. Куэтсьярви, что обусловлено геохимическими (наличие медно-никелевых сульфидных залежей в юго-восточной части водосбора озера) и морфометрическими особенностями водосбора и самого озера.

Влияние деятельности комбината "Печенганикель" обуславливает максимальные концентрации всех исследованных ТМ в поверхностных слоях ДО оз. Куэтсьярви. Уменьшение концентраций Ni, Co, Zn, Hg и As в верхних 1–2 см ДО оз. Куэтсьярви объясняется уменьшением сбросов комбинатом "Печенганикель" в последнее 10-летие. Другие элементы (Cu, Cd, Pb) имеют поверхностные максимумы в ДО всех станций оз. Куэтсьярви, это можно связать с постоянством сброса этих элементов (для Cu – 0.1–0.2 т/год за последнее 10-летие).

Вниз по течению р. Пасвик от места поступления сточных вод наблюдается снижение содержания ТМ в поверхностных слоях ДО. Главные загрязняющие элементы в этих озерах – ТМ, сбрасываемые в больших количествах в составе сточных вод комбинатом «Печенганикель»: Ni, Cu, Co, Zn, хотя халькофильные элементы (Hg, As, Cd) также встречались в высоких концентрациях в поверхностных слоях ДО оз. Бьерневатн.

В озерах вверх по течению р. Пасвик от места поступления сточных вод в поверхностных слоях ДО не отмечено увеличения содержания ТМ, выбрасываемых в атмосферу в значительных количествах комбинатом «Печенганикель» (Ni, Cu, Co, Zn). Однако в этих озерах, особенно в самом большом и наиболее удаленном от комбината «Печенганикель» оз. Инари, обнаружено значительное увеличение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As) в поверхностных слоях ДО.

Геохимические особенности озер, таких как Инари, Бьерневатн, северная часть Куэтсьярви, и в первую очередь их олиготрофность, хорошее снабжение придонных слоев воды и верхних слоев ДО растворенным кислородом, большая глубина водоемов привели к аккумуляции в поверхностных частях ДО озер элементов, чутко реагирующих на изменения окислительно-восстановительного потенциала, – Fe и Mn. Содержания этих подвижных элементов в поверхностных слоях ДО озер превышают кларковые и фоновые в 10–50 раз.

В других озерах отмечено увеличение содержания P в поверхностных слоях ДО, что может говорить о развитии процессов эвтрофирования, связанного с поступлением сточных хозяйственно-бытовых вод и регулированием стока водоемов, которые приводят к замедлению скоростей течения, застойным явлениям и, в конечном итоге, аккумуляции биогенных элементов в водных экосистемах. Накопленный в ДО P может быть источником поступления этого биогенного элемента в водную толщу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pasvik River Watercourse, Barents Region: Pollution Impacts and Ecological Responses / T. Moiseenko, M. Mjelde, T. Brandrud [et al.]. Investigations in 1993. Oslo: NIVA-report OR-3118. 1994. 87 p.
2. The Paatsjoki Barents Interreg II Project: Development of a tool to describe the effects of water level regulation and different discharge regimes on the ecological conditions of river Paatsjoki water system / S. Hellsten, M. Visuri, S. Partanen [et al.]. Oulu, Finland Finnish Environment Institute, Hydrology and water management division. Final report, 2001. 34 p.
3. Характеристика загрязнения некоторых водных объектов Мурманской области стоками рудообогатительных комбинатов / Т.О. Гончарова, А.А. Иванова, В.Т. Каплин [и др.] // Гидрохимические материалы. 1973. Т. 2. С. 129–138.
4. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1989. 96 с.
5. Effects of acidification on mobilization of heavy metals and radionuclides from sediments of freshwater lakes / D.W. Schindler, R.H. Hesslein, R. Wagemann [et al.] // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1980. Vol. 37. P. 373–377.
6. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments / S.A. Norton, A. Henriksen, P.G. Appleby [et al.]. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.
7. Даувальтер В.А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы) // Диссерт. на соиск. уч. степ. докт. геогр. наук. Апатиты, 1999. 399 с.
8. Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61.
9. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
10. Håkanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects // Water Resour. Resear. 1984. Vol. 20, No 1. P. 41–46.
11. Tenhola M., Lummaa M. Regional distribution of zinc in lake sediments from eastern Finland // Symposium on Economic Geology, Dublin, Ireland, 26–29 August, 1979. P. 67–73.
12. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia / D. Gregurek, F. Melcher, V.A. Pavlov [et al.] // Miner. Petrol. 1999. Vol. 65. P. 87–111.
13. 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: Изд. КНЦ РАН, 1995. С. 24–35.

14. Даувальтер В.А. Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. 1997. № 6. С. 43–53. **15.** Даувальтер В.А. Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500. **16.** Даувальтер В.А. Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002. №4. С. 65–73. **17.** Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **18.** 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. **19.** Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Т.И. Моисеенко, В.А. Даувальтер, А.А. Лукин [и др.]; под ред. Т.И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 487 с. **20.** Förstner U. Lake sediments as indicator of heavy-metal pollution // Naturwissenschaften. 1976. Vol. 63. P. 465–470. **21.** The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments / Norton S.A., Dillon P.J., Evans R.D. [et al.]; eds. S.E. Lindberg et al. Sources, Deposition and Capony Interactions. V. III, Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990. P. 73–101. **22.** Lewis T.E., McIntosh A.W. Covariation of selected trace elements with binding substrates in cores collected from two contaminated sediments // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1989. Vol. 43. P. 518–528. **23.** Stratigraphy of total metals in RIPLA sediment cores / S.A. Norton, R.W.J. Bienert, M.W. Binford [et al.] // Paleolimnol. 1992. Vol. 7. P. 191–214. **24.** 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. **25.** Даувальтер В.А. Концентрации металлов в донных отложениях закисленных озер // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 3. С. 358–365. **26.** Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Родюшкин И.В. Механизмы круговорота природных и антропогенных металлов в поверхностных водах Субарктики // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 2. С. 231–243. **27.** Dauvalter V. Metal concentrations in sediments in acidifying lakes in Finnish Lapland // Boreal Environ. Res. 1997. Vol. 2. P. 369–379. **28.** Rognerud S. Sedimentundersøkelser i Pasvikela høsten 1989. Oslo: NIVA-Rapport 401/90, 1990. 10 p. **29.** Basisundersøkelse av luftforurensinger i Sor-Varanger 1988-1991 / L.O. Hagen, M.J. Aarnes, J.F. Henriksen et al.. Oslo: NILU-report 67/91, 1991. 89 p. **30.** Pacyna J.M., Pacyna E.G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environ. Rev. 2001. Vol. 4. P. 269–298. **31.** Даувальтер В.А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова // Геохимия. 2006. № 2. С. 237–240. **32.** Бакланов А.А., Макарова Т.Д. Загрязнение сернистым газом в районе советско-норвежской границы // Эколого-географические проблемы Кольского Севера. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1992. С. 114–129. **33.** Фракционирование изотопов Fe в результате окислительно-восстановительных процессов в водоеме / Д.Н. Малиновский, И.В. Родюшкин, Е.П. Щербакова [и др.] // Геохимия. 2005. № 8. С. 878–885. **34.** Даувальтер В.А., Ильишук Б.П. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684. **35.** Lennox L.J. Sediment-water exchange in Lough Ennel with particular reference to phosphorus // Wat. Res. 1984. Vol. 18, № 12. P. 1483–1485. **36.** Sandman O, Eskonen K, Liehu A. The eutrophication history of Lake Särkinen, Finland and the effects of lake aeration // [Hydrobiologia](#). 1990. Vol. 214. P. 191–199. **37.** Shaw J.F.H., Prepas E.E. Relationships between phosphorus in shallow sediments and in the trophogenic zone of seven Alberta lakes // Wat. Res. 1990. Vol. 24, № 5. P. 551–556. **38.** Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p. **39.** Ruhling A., Rasmussen L., Pilegaard K. Survey of atmospheric heavy metal deposition. Copenhagen: Nordic Council Ministers, 1987. 44 p. **40.** Atmosfarisk nedfall av tungmetaller i Norge. Landsjamfattendt undersøkelse i 1985 / E. Steinnes, F. Franzen, O. Johansen [et al.], Oslo: SFT-rapport 334/88, 1988. 33 p. **41.** Johansson K. Metals in sediments of lakes in Northern Sweden // Water Air Soil Pollut. 1989. Vol. 47. P. 441–457. **42.** Rekolainen S., Verta M., Liehu A. The effect of airborne mercury and peatland drainage on sediment mercury content in some Finnish forest lakes // Helsinki: National Board of Water. 1986. Vol. 65. P. 11–21. **43.** Rognerud S., Fjeld E. National survey of heavy metals in lake sediments and mercury in fish. Oslo: SFT-report 426/90, 1990. 77 p. **44.** Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway // AMBIÖ. 1993. Vol. 22, № 4. P. 206–212. **45.** Verta M., Tolonen K., Simola H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments // Sci. Tot. Environ. 1989. Vol. 87/88. P. 1–18. **46.** Dauvalter V. Concentrations of heavy metals in superficial lake sediments of Pechenga district, Murmansk region, Russia // Vatten. 1992. Vol. 48, No 2. P. 141–145. **47.** 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. **48.** Alhonen P. Heavy metal load of Lake lidesjarvi as reflected in its sediments // Aqua Fennica. 1986. Vol. 16, № 1. P. 11–16. **49.** Ouellert M., Jones H.G. Paleolimnological evidence for the long-range atmospheric transport of acidic pollution and heavy metals into Quebec, Canada // Can. J. Earth Sci. 1983. Vol. 20. P. 23–26. **50.** Tolonen K., Jaakkola T. History of lake acidification and air pollution studied on sediments in South Finland // Ann. Bot. Fennici. 1983. Vol. 20. P. 57–78.

Сведения об авторе

Даувальтер Владимир Андреевич – д.г.н., профессор, главный научный сотрудник;
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

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