

УДК 502.51(285) (470.21)

В.А.Даувальтер, Н.А.Кашулин

**ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВ
КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Аннотация

Исследованы содержания элементов, в том числе тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg), в донных отложениях Йокостровской и Бабинской Имандры в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции. Плес Йокостровская Имандра более загрязнен тяжелыми металлами, чем Бабинская Имандра. В донных отложениях указанного плеса, особенно в Зашейковской губе, происходит осаждение тяжелых металлов, поступивших из техногенных источников. Геохимические закономерности осадконакопления, характерные для водоемов в природном состоянии, здесь играют подчиненную роль, а главную – поступление загрязняющих веществ со стоками промышленных предприятий. Это сказалось в увеличении концентраций практически всех тяжелых металлов (до 18 раз по сравнению с фоновыми содержаниями) в поверхностных слоях донных отложений. В плесе Бабинская Имандра главенствующую роль играют природные геохимические закономерности осадконакопления, в первую очередь сорбция тяжелых металлов тонкодисперсными взвешенными частицами, обладающими большой удельной площадью поверхности. В наиболее глубоких акваториях водоемов эти частицы в спокойных ламинарных гидрологических условиях аккумулируют значительное количество тяжелых металлов, в поверхностных слоях донных отложений их концентрации превышают фоновые значения до 7 раз.

Ключевые слова:

атомная электростанция, озеро Имандра, донные отложения, тяжелые металлы.

V.A.DAUVALTER, N.A.KASHULIN

**LONG-TERM CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE IMANDRA
LAKE SEDIMENTS WITHIN THE ZONE OF WASTE WATER INFLUENCE
OF THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT**

Abstract

Investigations of the element contents, including heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg), of lake sediments of Babinskaya and Yokostrovskaya Imandra in the zone of effluent of Kola Nuclear Power Plant were carried out. Yokostrovskaya Imandra is more contaminated by heavy metals than Babinskaya Imandra. In this part of the Imandra Lake, especially in the Zasheykovsk Bay, heavy metals are deposited in the sediments originating from anthropogenic sources, and geochemical appropriatenesses of sedimentation, typical for lakes in its natural state, are playing a secondary role, and main part inserts the entering of pollutants from industry wastewaters. This impact has increased concentrations of almost all the heavy metals (up to 18 times in comparison with background values) in surface layers of sediments. In Babinskaya Imandra the priority role plays natural geochemical patterns of sedimentation, especially heavy metal sorption by fine suspended particles with large specific surface area. These particles in the deepest waters in laminar hydrological conditions accumulate a significant amount of heavy metals, and the concentrations in the surface layers of the sediments are up to 7 times higher than the background values.

Key words:

nuclear power station, lake Imandra, sediments, heavy metals.

Введение

Еще в начале XX века была понятна роль человечества, далеко не всегда положительная, в изменении водных систем земного шара, о чем академик В.И.Вернадский (1933) писал: «Мы не привыкли сознать, какие изменения вносит человеческая культура в историю природных вод, и не привыкли это учитывать». На примере озера Юта (штат Юта, США) В.И.Вернадский показывает, как буквально за 20 лет вода озера переходит из пресной в соленую в результате использования воды притоков озера для ирригации. В то время еще не было известно об исчезновении Аральского озера во второй половине XX в. в результате той же причины, а также о загрязнении Средиземного моря в целом и его составных частей, Великих озер в Северной Америке, об угрозе загрязнения Байкала, в котором находится четвертая часть чистой пресной озерной воды нашей планеты, и о других проблемах, созданных человеком «разумным».

Все более усиливающееся влияние потоков антропогенного вещества и энергии на водные объекты остро ставит вопрос сохранения пресноводных экосистем, в первую очередь как источников снабжения населения чистой пресной водой и биологическими ресурсами. В связи с проблемой дефицита чистой пресной воды в последнее время особое внимание привлечено к большим озерам – естественным хранилищам больших объемов пресных вод (Усенков, 2007). Интенсивное антропогенное воздействие на экосистемы больших озер в последнее десятилетие привело к серьезным нарушениям естественного хода развития и функционирования природной среды, флоры, фауны и их частичной деградации. В этой связи донные отложения (ДО) водоемов рассматриваются как носители информации об изменениях, имеющих место на территории водосбора и в самом водоеме, как своеобразный архив данных о состоянии окружающей среды, так как ДО отражают интегрированную во времени сумму антропогенного воздействия на аквальные системы. ДО являются важным источником информации о прошлых климатических, геохимических, экологических условиях, существующих на водосборе и в самом водоеме, позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной среды. Многие загрязняющие вещества (ЗВ), в том числе тяжелые металлы (ТМ), депонируются ДО, поэтому их содержание в ДО может рассматриваться в качестве информативного показателя состояния поверхностных вод.

Первое и довольно подробное описание прибрежной зоны и характера распределения ДО в оз.Имандра дано Г.Д.Рихтером (1934) по результатам работы Имандровской экспедиции Географо-экономического научно-исследовательского института при ЛГУ в 1925-1927 гг. До работ Имандровской экспедиции описание ДО озера не проводилось и все данные сводились к указаниям, что «дно озера каменисто». По результатам исследований Имандровской экспедиции было установлено, что наибольшую площадь дна озера составляют разнообразные илы, в меньшей степени – песчаные грунты, а по берегам каменистые грунты (рис.1). Тогда же была зафиксирована находка сапропеля, которая в то время оказалась самой северной из всех находок в СССР.

До исследований И.В.Баранова (1966) в 1960 г. данных о химическом составе ДО оз.Имандра почти не было. Известен лишь анализ одного образца грунта (Кошкин и др., 1939). Летом 1960 г. комбинированным батометром было

отобрано 50 колонок ДО, в которых определялось содержание органических веществ, гумуса, фосфора, железа.

Первые детальные исследования химического состава ДО оз.Имандра в ее северной части – Большой Имандре с определением содержания приоритетных загрязнителей (Ni, Cu, Mn, Fe, P) были проведены сотрудниками Кольского филиала АН СССР в 1966-1968 гг. (Беляева и др., 1971). Пробы ДО отбирались дночерпателем Экмана-Берджа и анализировались полуколичественным спектральным анализом, поэтому нельзя гарантировать, что построенные по результатам исследований схемы распределения валовых содержаний вышеперечисленных элементов отражали реальную ситуацию распределения элементов в поверхностных слоях ДО Большой Имандры.

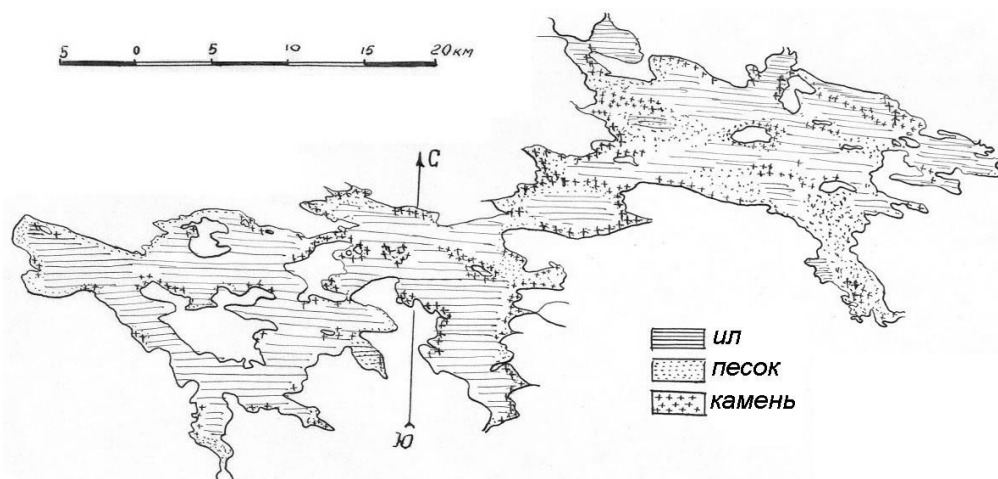


Рис.1. Схема распределения типов ДО Йокостровской и Бабинской Имандры по результатам исследований Имандровской экспедиции Географо-экономического научно-исследовательского института при ЛГУ в 1925-1927 гг. (Рихтер, 1934)

В первой половине 1970-х гг. сотрудниками Кольского филиала АН СССР было продолжено изучение других акваторий оз.Имандра – Йокостровской и Бабинской Имандры (Чижигов и др., 1976). В отличие от предыдущих исследований пробы ДО отбирались трубками-грунтоносами, и для химического анализа (спектральным полуколичественным методом) анализировались верхние (2-14 см) слои ДО, следовательно, можно надеяться, что картина распределения содержаний 25 элементов, включая тяжелые металлы, отображена более достоверно, чем в предыдущих исследованиях Большой Имандры (табл.1).

В 1980-х гг. сотрудниками Кольского филиала АН СССР исследования химического состава ДО оз.Имандра проводились параллельно с изучением состояния зообентоса. В основном исследования проводились в зонах влияния промышленных предприятий на экосистему оз.Имандра – губы Монче, Белая, Молочная. Пробы ДО отбирались дночерпателями, химический анализ проводился спектральным полуколичественным методом. Результаты этих исследований состояния ДО оз.Имандра (табл.2) опубликованы в монографиях (Крючков и др., 1985; Моисеенко, Яковлев, 1990).

Таблица 1

Содержание элементов (мкг/г) в поверхностных ДО в плесах Йокостровская и Бабинская Имандра по результатам исследования сотрудников Кольского филиала АН СССР (Чижиков и др., 1976)

Элементы	Минимальное	Максимальное	Среднее
Na	70	30000	20000
Mg	1000	30000	10400
Ca	3000	100000	28200
Sr	30	1000	500
Ba	30	4500	500
Ti	320	4500	1500
V	10	500	160
Cr	1	150	100
Mn	200	100000	11290
Fe	23500	100000	81400
Co	3	120	60
Ni	13	2000	160
Cu	15	150	68
Zn	10	2000	300
Mo	0.1	430	39
Ga	1	650	80
Pb	1	60	20
Y	10	1700	330
Yb	0.1	7	-
Zr	30	800	-
Be	0.1	5	2

Таблица 2

Среднее содержание некоторых элементов (мкг/г сух. веса) в ДО плеса Бабинская Имандра в зоне влияния подогретых вод КАЭС в 1980-х гг.

Зона	ППП, %	Cu	Ni	Zn	Co	Pb	Mn	Sr	Cr
I	1.4	20	90	98	36	8	454	321	91
II	3.6	24	115	112	36	11	2816	188	77
III	3.9	22	96	54	44	12	1441	240	66

ПРИМЕЧАНИЕ. Зоны I, II – сильного, слабого теплового воздействия, III – необогреваемая зона.

Детальные исследования состояния ДО оз.Имандра проводятся с начала 1990-х гг. после организации Института промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН, создания Лаборатории водных экосистем и в ее составе группы по исследованию химического состава ДО. Результаты исследований химического состава ДО оз.Имандра, в том числе и в зоне влияния стоков Кольской АЭС, опубликованы в предыдущих публикациях сотрудников института (Даувальтер, 1999, 2000, 2006, 2012; Даувальтер, Ильяшук, 2007; Даувальтер и др., 1999а, 1999б, 2000, 2012; Моисеенко и др., 1996, 1997, 1998, 2002; Нерадовский и др., 2009).

Материалы и методы

Образцы ДО отбирались в июле 2011 г. на шести станциях (В-3, С-10, D-5, D-7, Е-5, F-11) Бабинской и Йокостровской Имандры (рис.2) отборником колонок открытого гравитационного типа, сделанным из плексигласа (внутренний диаметр 44 мм), с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник изготовлен по образцу, разработанному Скогхеймом (Skogheim, 1979), позволяющему транспортировать колонки в лабораторию ненарушенными для дальнейшего использования. Колонки ДО были послойно разделены на слои по 1 см, помещены в предварительно вымытую кислотой полиэтиленовую посуду и отправлены в лабораторию для анализа.

Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение потерь при прокаливании) и определение содержания металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Sr, Cr, Al, P) проводились в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Подробно методика проведения химического анализа ДО описана ранее (Даувальтер и др., 2012).

Статистическая обработка результатов исследований и построение графиков проводились с использованием стандартных программ Statistics (version 6.1) и Excel (version 7.0).

На некоторых станциях (В-3, D-7, F-11), описываемых в этой статье, были отобраны колонки ДО во время проведения гидрохимической съемки в феврале 1993 г. Результаты этой съемки опубликованы ранее (Моисеенко и др., 1996, 2002). Перечень анализируемых тяжелых металлов в 2011 г. по сравнению с 1993 г. был дополнен As и Hg.

Территориальное распределение элементов в донных отложениях

Содержание элементов, в первую очередь ТМ, в поверхностном слое ДО отражает современное состояние и уровень загрязнения водоема. Аккумуляция ТМ в ДО зависит от многих факторов: наличия источников загрязнения; геохимического состава горных пород, поступающих в водоем с территории водосбора; гранулометрического состава; форм металлов, в которых они поступают в водоем; содержания веществ, усиливающих аккумуляцию ТМ – окислов и гидроокислов Fe и Mn, органических веществ; интенсивности протекания биологических процессов и др. Многочисленными исследованиями (Страхов, 1968; Förstner, Wittmann, 1979; Horowitz, 1991) установлено, что чем более дисперсна тонкая фракция ДО и больше ее количество в общей массе осадка, тем больше концентрация сорбированных в них микроэлементов, что объясняется большой площадью поверхности тонкодисперсных фракций. Если же в тонкую и тончайшую фракции осадков входят еще и такие коагулянты, как Fe и Mn, то они дополнительно концентрируют в осадке некоторое количество атомов микроэлементов. Положительную роль в концентрации микроэлементов играют также и органическое вещество, содержащееся в осадках. Тонкодисперсные частицы осаждаются в спокойных ламинарных гидродинамических условиях, где горизонтальные течения минимальны. Зону, где происходит осаждение тонкодисперсных осадков и образование рыхлых,

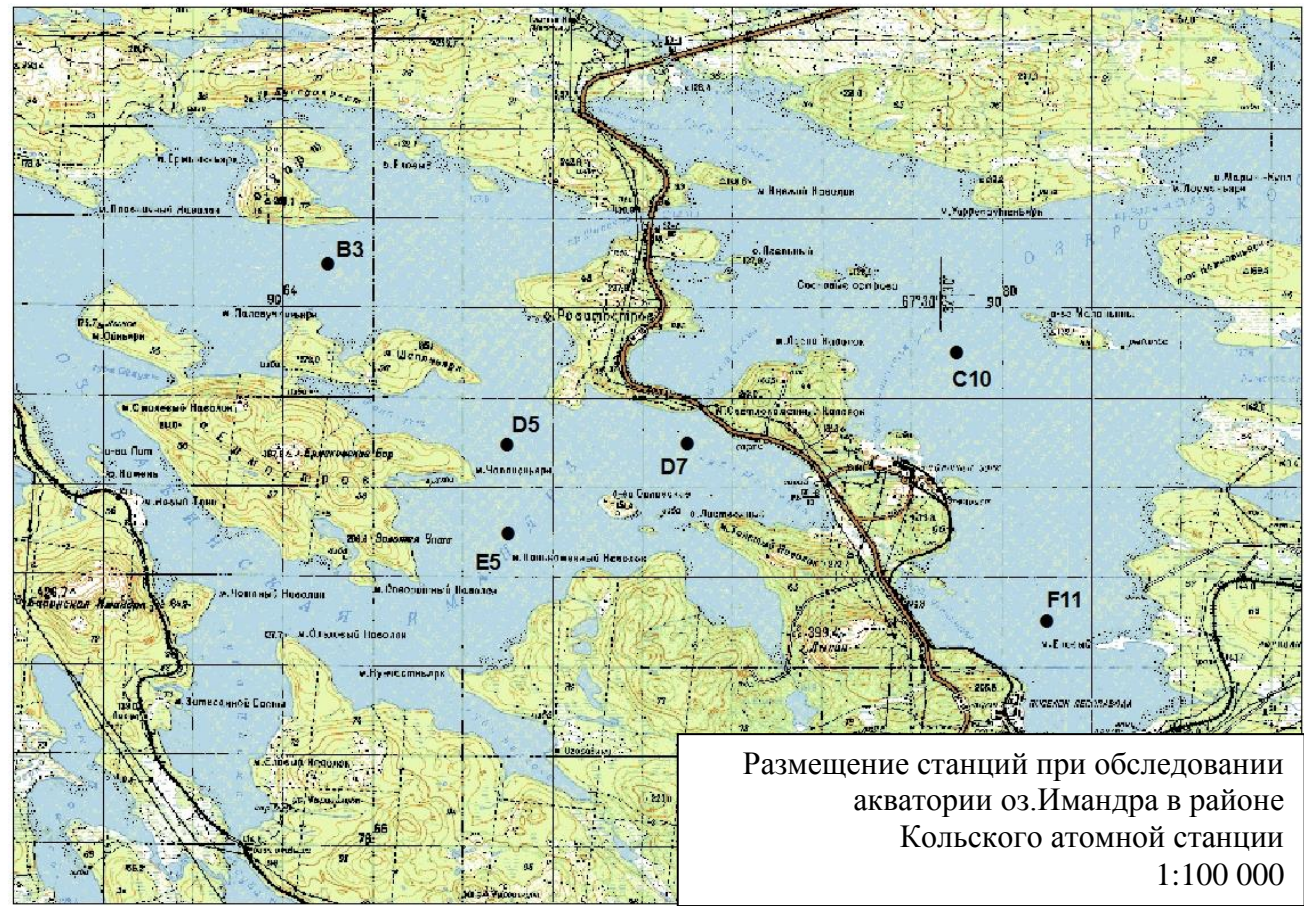


Рис.2. Схема отбора проб донных отложений на оз.Имандра в 2011 г.

мягких ДО, с высокими значениями влажности и содержания органического материала, а в случае антропогенных нагрузок на водоем – с большими концентрациями ЗВ, Л. Хокансон назвал аккумуляционной зоной (Håkanson, 1980). Именно в этой зоне и отмечаются наибольшие содержания ЗВ, в том числе и ТМ. В донных отложениях водоема-охладителя Запорожской АЭС наибольшие концентрации тяжелых металлов выявлены в илистых отложениях, характеризующихся максимальным содержанием тонкодисперсных частиц (Мороз, 2011).

Максимальные концентрации большинства токсичных загрязняющих ТМ в поверхностном слое (0-1 см) ДО среди всех исследованных 6 станций отмечены на станции F-11 в Зашейковской губе плеса Йокостровская Имандра (табл.3, рис.3-6). Исследование химического состава толщи ДО Зашейковской губы вызывает интерес вследствие того, что через эту акваторию происходит сток практически всего растворенного и взвешенного материала, поступившего в оз.Имандра с территории водосбора и с промышленными стоками предприятий. Здесь, недалеко от истока реки Нивы, единственной вытекающей из оз.Имандра, образуется своеобразный геохимический барьер и создаются условия для аккумуляции ТМ в ДО, в первую очередь Ni и Cu, приносимые из акватории Большой Имандры, где уже в течение более 40 лет отмечены высокие концентрации ТМ (Беляева и др., 1971; Чижиков и др., 1976; Чижиков, 1980; Моисеенко, Яковлев, 1990; Моисеенко и др., 1996, 1997, 1998, 2002; Даувальтер и др., 1999, 2000; Даувальтер, 2000), источниками которых являются стоки комбината «Североникель», Оленегорского ГОКа и др. Концентрации Ni в поверхностных слоях станции F-11 более чем в 20 раз превышают среднее фоновое содержание этого металла в ДО оз.Имандра (по результатам исследований (Моисеенко и др., 2002)), Cu, Pb и Cd – более чем в 3 раза, Zn и Co – в 2 раза. Наряду с вышеперечисленными ТМ, наблюдается также рост содержания Mn в 5 раз, что связано, скорее всего, с резкими изменениями физико-химической обстановки в придонных слоях воды и верхних слоях ДО, а не с загрязнением. Условия и причины концентрации Mn и Fe в ДО в оз.Имандра и образования в них железомарганцевых конкреций и фрамбоидального пирита описаны ранее (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Нерадовский и др., 2009).

Второй по наиболее высоким концентрациям загрязняющих токсичных ТМ является станция С-10, расположенная недалеко от водозаборного канала КАЭС (табл.3, рис.3-6). На этой акватории Йокостровской Имандры (наиболее глубокое место между Маланьиными и Сосновыми островами), как и на акватории станции F-11, также происходит осаждение материала, поступившего из более загрязненных акваторий Большой Имандры. Концентрации Ni здесь доходят до 700 мкг/г, Cd – до 0.83 мкг/г, As – до 25 мкг/г (наибольшая концентрация этого высокотоксичного элемента среди исследуемых станций). На станции С-10 зафиксированы также наибольшие концентрации Fe (15%), Sr (более 100 мкг/г), P (около 2500 мкг/г), органического материала (величина ППП около 19%), что является следствием поступления стоков не только комбината «Североникель», но и также других источников загрязнения, расположенных на берегах и водосборе оз.Имандра, – ОАО «Апатит», Оленегорского ГОКа, хозяйственно-бытовых стоков населенных пунктов и т.д. Хотя, как и в случае с Mn, высокие концентрации Fe могут быть связаны с резкими изменениями физико-химической обстановки в придонных слоях воды и верхних слоях ДО.

Таблица 3

Концентрации (мкг/г сухого веса) металлов, величины влажности и потерь веса при прокаливании (%) в поверхностных (0-1 см) и фоновых слоях донных отложений и значения коэффициента C_f и степени загрязнения C_d на исследованных станциях Йокостровской и Бабинской Имандры

Станция	Слой, см	H ₂ O	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	Mn	Fe	Sr	Cr	Al	P	C_d
B-3	0-1	88.12	12.42	109	205	100	23	0.54	21.4	8.2	0.066	11000	37984	68	86	23448	1766	
	19-20	78.08	6.67	50	60	90	22	0.18	4.8	1.3	0.032	689	33333	42	93	27945	1765	
	C_f			2.2	3.4	1.1	1.0	3.0	4.4	6.2	2.1	16.0	1.1	1.6	0.9	0.8	1.0	23.4
C-10	0-1	88.21	18.67	120	695	110	33	0.83	14.3	25.4	0.050	36364	150464	114	57	16851	2462	
	17-18	84.73	13.61	40	38	70	15	0.20	3.6	7.9	0.034	1727	41667	35	88	24156	2047	
	C_f			3.0	18.2	1.6	2.3	4.2	4.0	3.2	1.5	21.1	3.6	3.3	0.6	0.7	1.2	38.0
D-5	0-1	89.78	13.38	150	300	120	19	0.76	28.4	10.0	0.106	9556	33333	78	73	23014	1108	
	19-20	77.59	10.08	40	70	90	25	0.19	4.2	4.1	0.024	738	32222	31	86	26197	1216	
	C_f			3.8	4.3	1.3	0.8	3.9	6.7	2.5	4.4	12.9	1.0	2.5	0.9	0.9	0.9	27.6
D-7	0-1	88.82	13.72	77	130	90	19	0.45	19.5	7.3	0.058	2368	32222	40	79	21972	1055	
	19-20	76.40	4.32	67	52	90	28	0.14	5.4	3.7	0.010	2636	49180	43	90	25610	1282	
	C_f			1.2	2.5	1.0	0.7	3.2	3.6	2.0	5.8	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	20.0
E-5	0-1	90.10	13.77	143	225	100	21	0.59	26.9	8.7	0.094	5780	35676	70	84	24146	1256	
	23-24	77.40	8.03	60	52	80	27	0.12	3.6	1.9	0.030	1455	47458	34	107	29620	1810	
	C_f			2.4	4.3	1.3	0.8	4.9	7.4	4.6	3.1	4.0	0.8	2.1	0.8	0.8	0.7	28.8
F-11	0-1	89.53	12.83	160	1143	210	62	1.47	23.8	18.0	0.060	37846	73938	112	62	24156	1839	
	15-16	86.00	14.47	50	248	160	34	0.40	7.2	22.9	0.024	7187	145342	45	79	24247	3110	
	C_f			3.2	4.6	1.3	1.8	3.6	3.3	0.8	2.5	5.3	0.5	2.5	0.8	1.0	0.6	21.1

ПРИМЕЧАНИЕ. Значения C_d подсчитаны для 8 загрязняющих тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As, Hg).

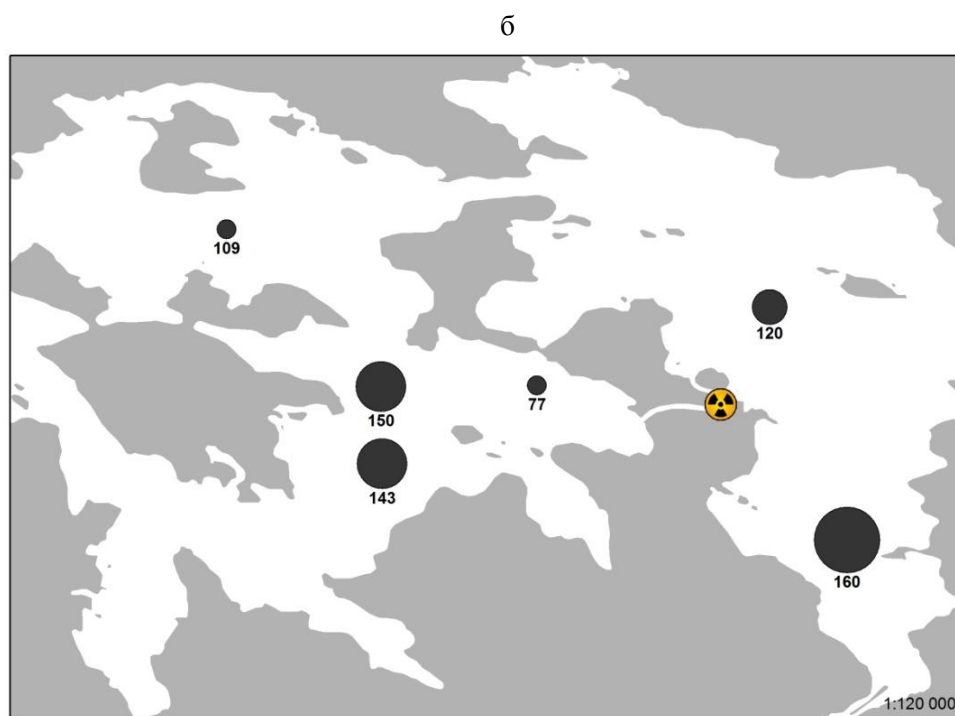
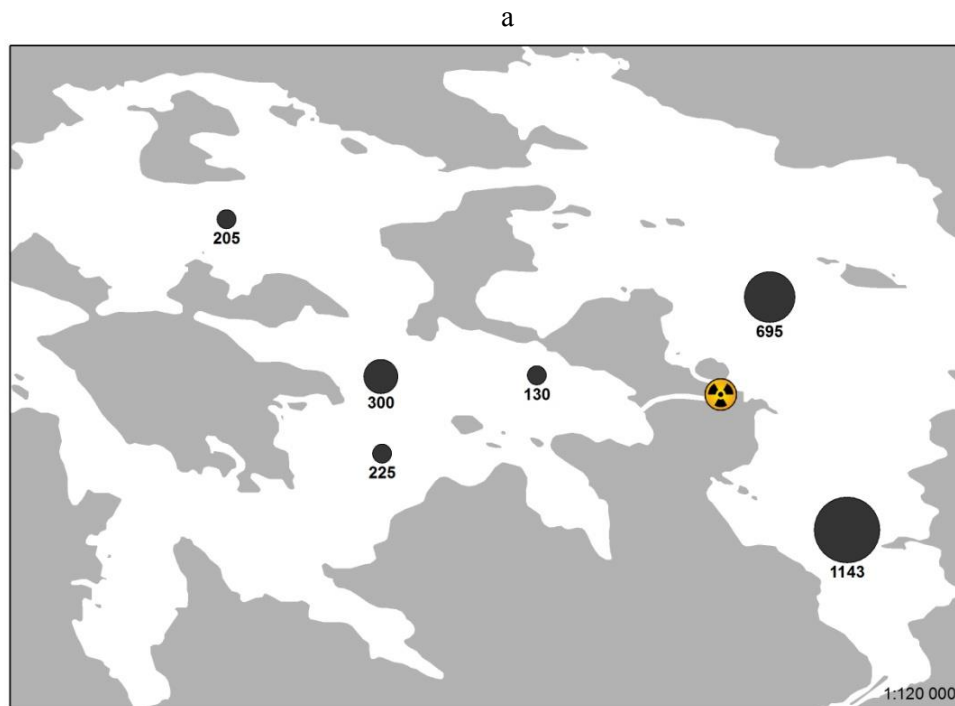


Рис.3. Концентрации (мкг/г сух. веса) Ni (а) и Si (б) в поверхностном слое (0-1 см) ДО оз.Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС

а



б



Рис.4. Концентрации (мкг/г сух. веса) Zn (а) и Co (б) в поверхностном слое (0-1 см) ДО оз.Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС

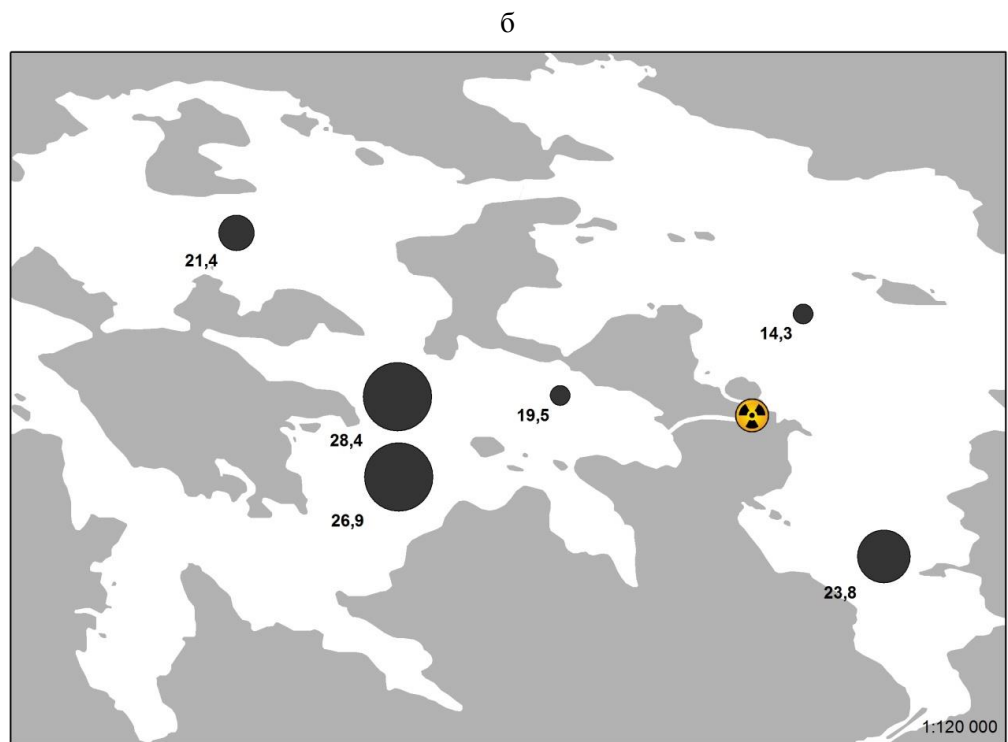
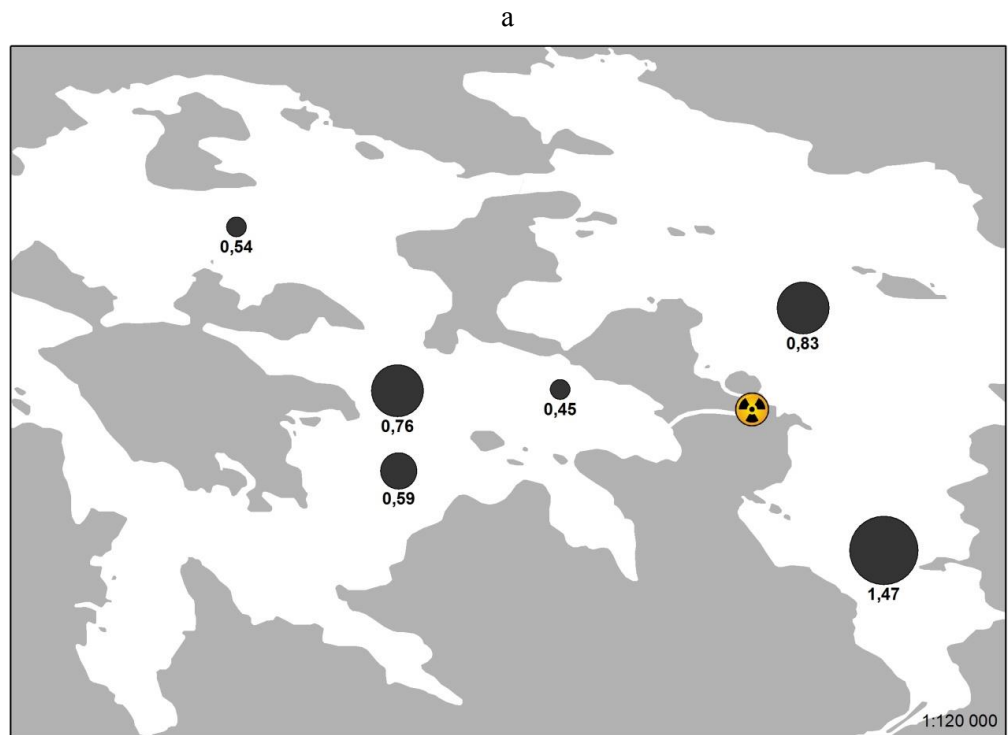


Рис.5. Концентрации (мкг/г сух. веса) Cd (а) и Pb (б) в поверхностном слое (0-1 см) ДО оз.Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС

а



б



Рис.6. Концентрации (мкг/г сух. веса) As (а) и Hg (б) в поверхностном слое (0-1 см) ДО оз. Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС

В плесе Бабинская Имандра станции D-5 и E-5 расположены довольно близко друг к другу, они самые глубокие (глубина озера 33 и 38 м соответственно). Концентрации ТМ на них самые высокие в Бабинской Имандре (табл.3, рис.3-6). Например, содержание Ni в поверхностном слое ДО на станциях D-5 и E-5 достигло 300 и 225 мкг/г соответственно, что более чем в 4 раза выше средних фоновых содержаний по оз.Имандра, Cu – 150 и 143 мкг/г соответственно, что в 3 раза выше средних фоновых содержаний, Hg – 0.106 и 0.094 мкг/г соответственно (наибольшие концентрации из всех 6 исследуемых станций), что более чем в 3 раза выше средних фоновых содержаний, Pb – 28 и 27 мкг/г соответственно (также наибольшие концентрации среди 6 исследуемых станций), что более чем в 5 раз выше средних фоновых содержаний. На этой глубокой акватории плеса Бабинская Имандра происходит осаждение тонкодисперсных взвешенных частиц с большой удельной поверхностью и максимальными способностями сорбировать загрязняющие вещества, в том числе и ТМ. Поэтому поверхностные слои ДО этой акватории обогащены ТМ, поступающими главным образом аэротехногенным путем, как из довольно близко расположенных источников (комбинат «Североникель»), так и в результате глобального загрязнения атмосферы Северного полушария (такими ТМ, как Cd, Pb, Hg).

Станция В-3 расположена между островами Ерм и Хорт и также довольно глубокая – 24 м, но другие гидрологические условия, прежде всего более высокие горизонтальные скорости перемещения водных масс, создают на этой акватории условия для осаждения меньшего количества тонкодисперсных частиц, обладающих большой сорбционной способностью, чем на станциях D-5 и E-5 (табл.3, рис.3-6). Поэтому концентрации практически всех ТМ (за исключением Co) в поверхностных слоях ДО на этой станции меньше, чем на вышеназванных станциях Бабинской Имандры.

Наименьшие концентрации практически всех металлов, в том числе и ТМ, в поверхностных слоях ДО зафиксированы на станции D-7, расположенной на выходе из Молочной губы (табл.3, рис.3-6). Вероятно, это происходит по следующим причинам. Глубина озера на этой станции минимальна (17.7 м) из всех исследованных в Бабинской Имандре. В Молочную губу сбрасывают подогретые воды Кольской АЭС, и скорости течения в губе довольно высоки, чтобы препятствовать осаждению значительного количества тонкодисперсного материала, обладающего хорошими сорбционными свойствами.

Вертикальное распределение элементов в донных отложениях

Исследование химического состава толщи ДО позволяет восстановить историю условий их формирования на отдельных участках озер, базируясь на определении фоновых значений содержания различных элементов в ДО и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Эти исследования весьма актуальны для территорий с интенсивной антропогенной нагрузкой, высокоразвитой горнопромышленной индустрией, где существует аномальное распределение элементов вследствие геохимических особенностей и антропогенного влияния на них. Особую научную значимость они приобретают, когда известна скорость осадконакопления или когда ее можно определить по каким-либо косвенным данным, например по этапам развития основных

источников загрязнения и интенсивности поступления загрязняющих веществ в водоем или на территории его водосбора.

Спокойные ненарушенные места аккумуляции ДО могут содержать исторические записи прошлых условий (климатических, геохимических), существовавших на водосборе водоема и в самом водоеме. Если найдены и изучены достаточно большие по площади и стабильные во времени места осадконакопления (в которых не происходит физических и химических изменений), исследователь может выявить геохимические изменения во времени, что, в свою очередь, дает возможность установить фоновые значения для данной территории, которые могут быть сравнены с существующими условиями.

Вследствие загрязнения оз.Имандра сточными водами горно-металлургического комплекса, коммунально-бытовыми стоками населенных пунктов и промышленных предприятий на водосборе озера, ДО озера претерпели серьезные преобразования физического и химического состава. Эти изменения в большей степени затронули плес Большая Имандра, но также нашли отражение и в Йокостровской и Бабинской Имандре (Моисеенко и др., 1996, 2002).

Наиболее значительные преобразования произошли в толще ДО станции С-10, расположенной в Йокостровской Имандре между Маланыными островами и Светлокаменным наволоком, недалеко от истока единственной реки Нивы, вытекающей из оз.Имандра (рис.2). Здесь прослеживается аккумуляция ТМ, отмеченная ранее на акватории Большой Имандры (Моисеенко и др., 2002). В поверхностных 5 см ДО происходит также изменение физических характеристик, в первую очередь увеличивается содержание органического материала (величины ППП) с 14.5 до 19% (рис.7). Вероятно, это увеличение связано с повышением трофического статуса озера в последние десятилетия (Кашулин и др., 2012, 2013). Увеличение концентраций Ni в поверхностных слоях по сравнению с фоновыми произошло почти в 20 раз (с 38 до 700 мкг/г), Pb – в 4 раза (с 3.6 до 14.3 мкг/г), Cd – в 4 раза (с 0.20 до 0.83 мкг/г), Cu – в 3 раза (с 40 до 120 мкг/г), As – в 3 раза (с 8 до 25 мкг/г). Наряду с этими металлами, наблюдается рост и содержания Mn в 21 раз (с 0.17 до 3.6%), Fe в 3.6 раза (с 4.1 до 15%) и Sr в 3.3 раза (с 35 до 114 мкг/г). Увеличение содержания металлов по направлению к поверхности ДО связано с влиянием сточных вод комбината «Североникель», ОАО «Апатит», Оленегорского ГОКа и Африкандского рудоуправления, содержащих повышенные концентрации ТМ, сульфатов, флотореагентов. Вместе с тем, наблюдается устойчивая тенденция к снижению концентраций Al и Cr к поверхности ДО. Рост содержания Mn и Fe в поверхностных слоях ДО, как было отмечено ранее, связан скорее всего с резкими изменениями физико-химической обстановки в придонных слоях воды и верхних слоях ДО.

На станции F-11, на которой были зафиксированы максимальные концентрации в поверхностных слоях ДО практически всех ТМ, четкого разделения на загрязненные и фоновые слои в колонке, отобранной в 2011 г., не зафиксировано (рис.2). Это связано с тем, что на акватории этой станции происходило интенсивное осаждение взвешенного материала, связанное с изменением гидрологических условий, в первую очередь с изменением скорости течения. Поэтому на этой станции скорости осадконакопления достаточно высокие, и 16-см колонки было недостаточно, чтобы захватить фоновые слои ДО, отложившиеся до индустриального

освоения водосбора оз.Имандра. Другим объяснением высоких концентраций ТМ по всей отобранной колонке на этой станции может быть также то, что в пос.Зашеек, находящемся вблизи станции F-11, недалеко от истока р.Нива, долгое время существовал лесозавод, к которому сплавливали лес по оз.Имандра. Дно озера в этом месте было усеяно топливом, перемещение которого и могло привести к интенсивному перемешиванию верхней части ДО.

В колонке ДО, отобранной на станции F-11 в Зашеечной губе в 1993 г. (Моисеенко и др., 2002), наблюдается довольно четкое разделение толщи ДО – на поверхностную (0-6 см), загрязненную с повышенными концентрациями приоритетных загрязняющих металлов (Ni и Cu), и более глубокую, с фоновыми содержаниями ТМ (рис.8). В поверхностном слое колонки ДО, отобранной в 1993 г., происходит почти двукратное увеличение содержания органического материала (ППП) с 18 до 32%, связанное, как было сказано выше, с изменением трофического статуса озера. Увеличение концентраций Ni в поверхностных слоях по сравнению с фоновыми произошло более чем в 20 раз (с 30 до 700 мкг/г), Cu – более чем в 5 раз (с 30 до 153 мкг/г). Наряду с Ni и Cu, наблюдается также и рост содержания Mn в 6 раз (с 0.08 до 0.55%) и Sr почти в 30 раз (с 3 до 83 мкг/г), что связано с влиянием как сточных вод ОАО «Апатит», так и Африкандского рудоуправления, содержащих повышенные концентрации Ni, сульфатов, фторореагентов. Несовпадения распределения концентраций ТМ в колонках отобранных в 1993 и 2011 гг. могут быть связаны с тем, что, как было сказано выше, в Зашеечной губе велась интенсивная хозяйственная деятельность и колонка ДО, отобранная в 2011 г., затронула участок с нарушенными ДО.

Довольно значительные изменения химического состава произошли в толще ДО самых глубоких из исследуемых станций – D-5 и E-5. В верхних 2-3 см ДО наблюдается повышенное содержание органического материала (рис.9 и 10). Рост содержания приоритетных для региона загрязняющих металлов Ni и Cu зафиксирован в верхних 2-4 см ДО. Заметное увеличение концентраций Pb отмечается на большей глубине ДО – начиная с 12 см на станции D-5 и 7 см на станции E-5. Установленная закономерность (заметное увеличение концентраций Pb на больших глубинах, чем содержания Ni и Cu) отмечается и на станции C-10. Этот факт может свидетельствовать о более раннем загрязнении Pb акваторий Йокостровской и Бабинской Имандры по сравнению с загрязнением Ni и Cu, источником которых являются предприятия горно-металлургической промышленности, в первую очередь комбинат «Североникель». Источником более раннего поступления Pb, вероятно, является глобальное загрязнение атмосферы Северного полушария, которое может быть также и источником начального загрязнения другими халькофильными высокотоксичными элементами Hg и As, значительное загрязнение которыми происходит в поверхностных частях ДО станций D-5 и E-5 (рис.9 и 10). В последние годы большой вклад в загрязнение этими элементами вносят индустриальные источники, в первую очередь горно-металлургические предприятия, сжигание угля и других видов ископаемого топлива на энергетических установках, в двигателях внутреннего сгорания и т.д. Мощность верхних, загрязненных халькофильными элементами слоев ДО на станции E-5 больше, чем на станции D-5, что может быть объяснено различными скоростями осадконакопления вследствие изменения гидродинамических условий – глубины станций, скоростей течения и т.д.

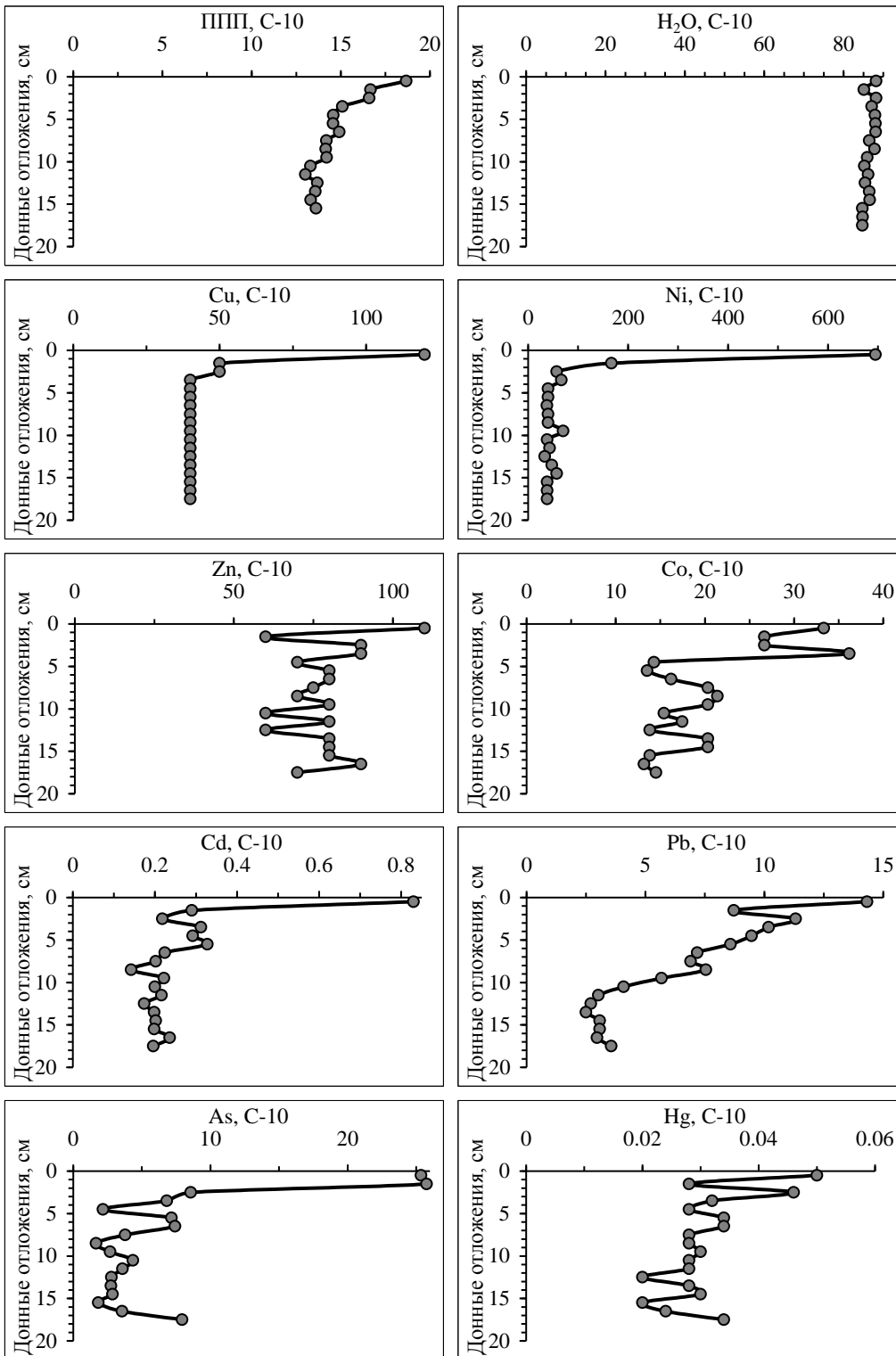


Рис.7. Вертикальное распределение влажности (H₂O, %) и ППП (%), ТМ (мкг/г сух. веса) в ДО станции С-10

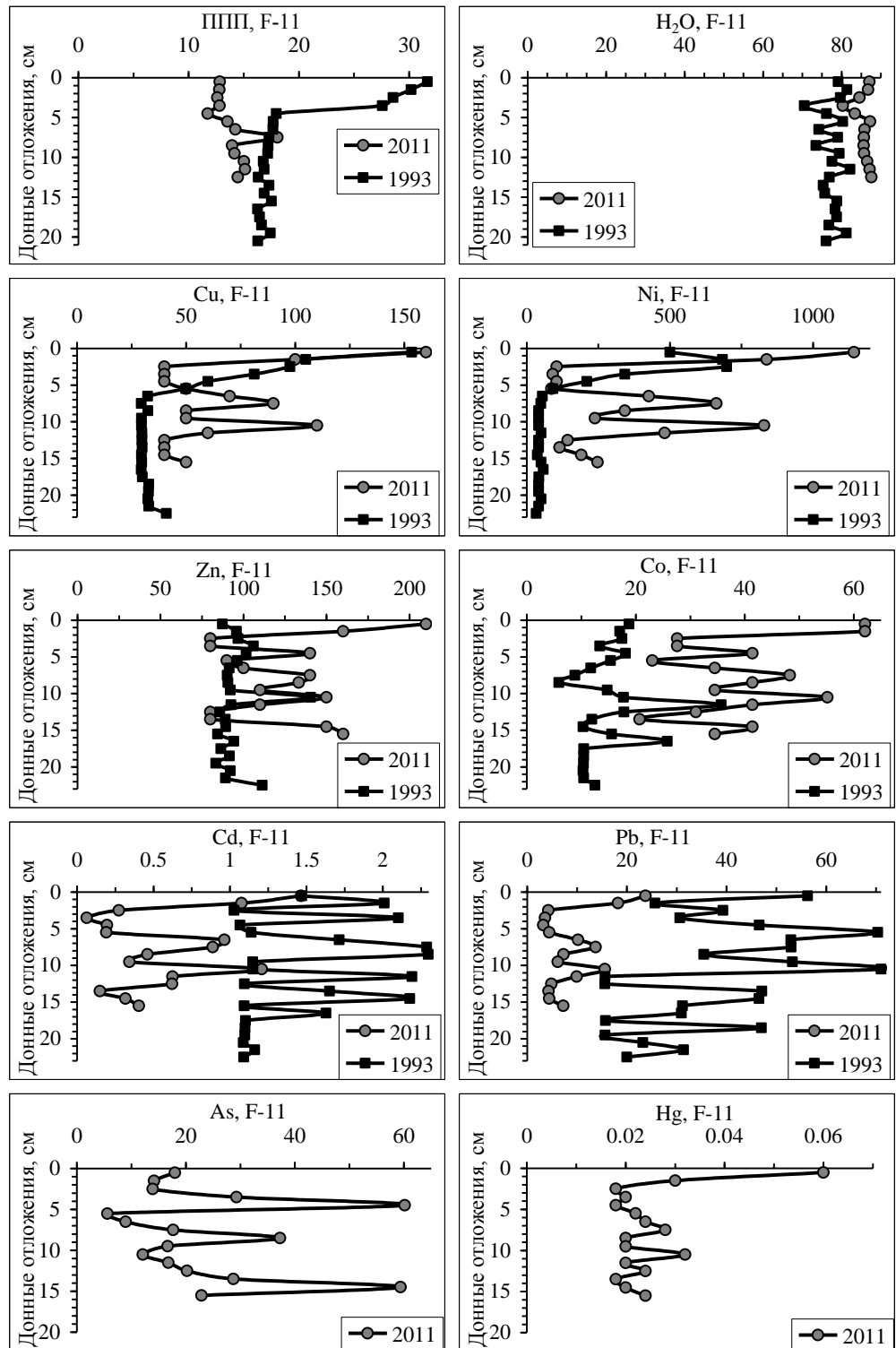


Рис.8. Вертикальное распределение влажности (H₂O, %) и ППП (%), ТМ (мкг/г сух. веса) в ДО станции F-11

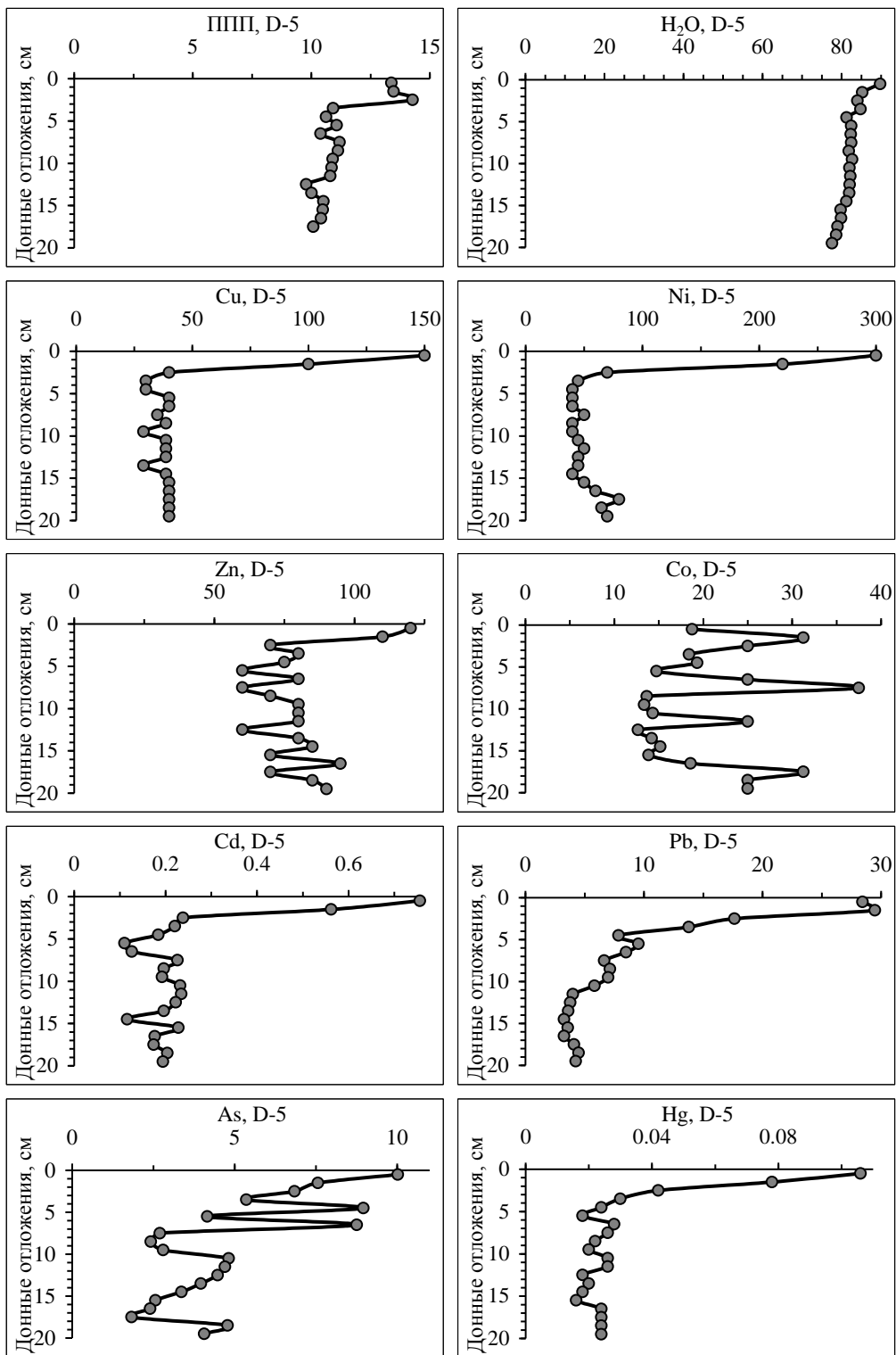


Рис.9. Вертикальное распределение влажности (H₂O, %) и ППП (%), ТМ (мкг/г сух. веса) в ДО станции D-5

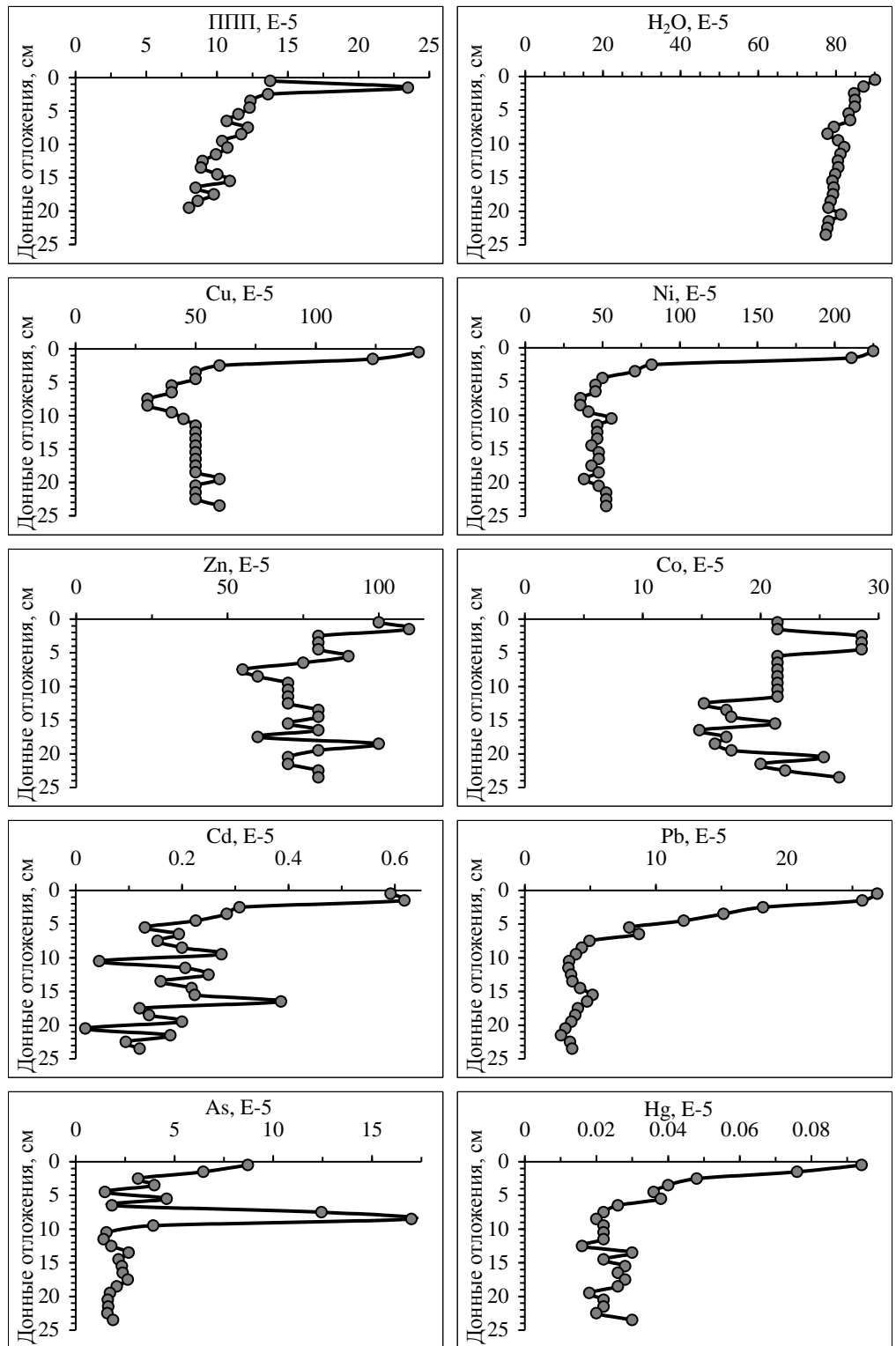


Рис.10. Вертикальное распределение влажности (H₂O, %) и ППП (%), ТМ (мкг/г сух. веса) в ДО станции E-5

Не столь значительные изменения отмечены в толще ДО станции В-3, но они заметны в верхних 3 см колонки, особенно для таких ТМ, как Ni, Cu, Cd, Pb, Hg (рис.11). Концентрации практически всех ТМ (за исключением Co) в поверхностных слоях ДО на этой станции меньше, чем на станциях D-5 и E-5. Зафиксировано существенное увеличение концентраций As (до 25 мкг/г) в слое 3-4 см, а затем снижение до 1.3 мкг/г в самом глубоком слое этой колонки (19-20 см). Затем в верхних слоях происходит снижение содержания As до 8.2 мкг/г (в поверхностном слое). Подобное распределение этого элемента отмечено и в колонке ДО станции E-5, в которой в интервале 7-9 см происходит увеличение концентраций As до 17 мкг/г, а далее они уменьшаются в слое 2-7 см и увеличиваются до 9 мкг/г в поверхностном слое. Для содержания органического материала (ППП), Ni, Cu, Co, Zn и Pb отмечено практически полное совпадение в распределении содержания в колонках, отобранных в 1993 и 2011 гг., особенно для Ni и Cu. Это говорит о том, что, во-первых, условия седиментации не изменились за последние 20 лет и, во-вторых, это является очень хорошим контролем качества проведения химических анализов в Лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН. Концентрации Co немного выше в колонке, отобранной в 2011 г., а содержание Pb, наоборот, в ДО, отобранных 1993 г., выше в 2-3 раза, но по профилю распределения содержания Co и Pb полностью совпадают.

В Молочную губу Бабинской Имандры сбрасываются подогретые на 10-12°C воды, используемые для охлаждения агрегатов Кольской атомной электростанции и забираемые из Глубокой губы Йокостровской Имандры. Поэтому акватория Молочной губы, наряду с тепловым загрязнением, испытывает также и влияние относительно более загрязненных вод Йокостровской Имандры (рис.12). Вследствие этого в колонке ДО станции D-7 наблюдается рост концентраций в поверхностных слоях Hg почти в 6 раз (с 0.01 до 0.058 мкг/г), Pb, Cd и Ni примерно в 3 раза (с 5.4 до 20, с 0.14 до 0.45 и с 52 до 130 мкг/г соответственно), As – в 2 раза (с 3.7 до 7.3 мкг/г). Вместе с тем, отмечено снижение концентраций Mn, Fe, Sr, Cr и Al по направлению к поверхности ДО. Повышенные концентрации Ni и Cu отмечены только в самом поверхностном слое, а в интервале 1-4 см отмечается снижение концентраций этих металлов до минимальных значений в колонке ДО станции D-7 (рис.5). Вероятно, это обусловлено с аккумуляцией грубообломочного материала на акватории Молочной губы, связанной со строительством и первыми годами эксплуатации подводящего и сбросного каналов, да и в целом всей Кольской АЭС. Этот грубообломочный материал мог поступать не только по каналам, но и воздушным путем с пылью со строительных площадок. Как и на станции В-3, отмечено практически полное совпадение в распределении содержания Ni, Cu и Zn в колонках, отобранных в 1993 и 2011 гг. Для Pb также зафиксирована аналогичная картина: содержание металла в ДО, отобранных 1993 г., выше в 2-3 раза по сравнению с колонкой 2011 г., но профили распределения содержания Pb полностью совпадают.

Практически для всех колонок ДО исследуемых станций характерно увеличение содержания Ni и Cu в верхних 1-4 см. Различная мощность отложений, загрязненных этими ТМ, может свидетельствовать о разных скоростях осадконакопления в отдельных акваториях Бабинской и Йокостровской Имандры.

Как было отмечено выше в описании результатов исследований, распределение элементов в колонках ДО исследованных станций оз.Имандра имеет общие закономерности формирования химического состава. Для определения факторов, наиболее влияющих на формирование химического состава ДО, были проведены корреляционный (табл.4) и факторный (табл.5) анализы с использованием пакета Statistica (Version 6.1). При проведении данных анализов не учитывались результаты по ДО станции F-11, так как при отборе колонки не были получены фоновые слои ДО, а ДО, скорее всего, в месте отбора были перемешаны.

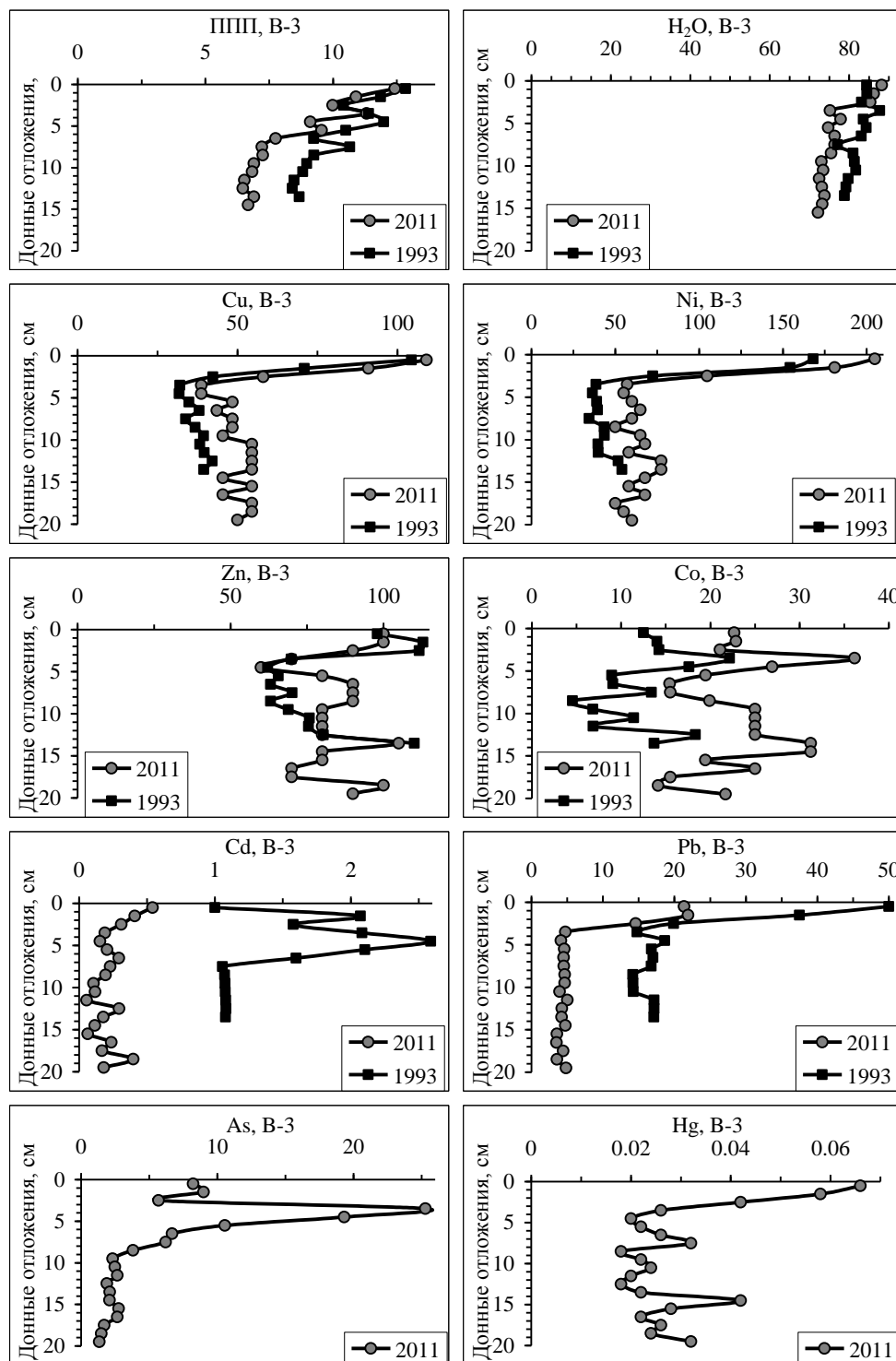


Рис. 11. Вертикальное распределение влажности (H_2O , %) и ППП (%), ТМ ($мг/г$ сух. веса) в ДО станции В-3

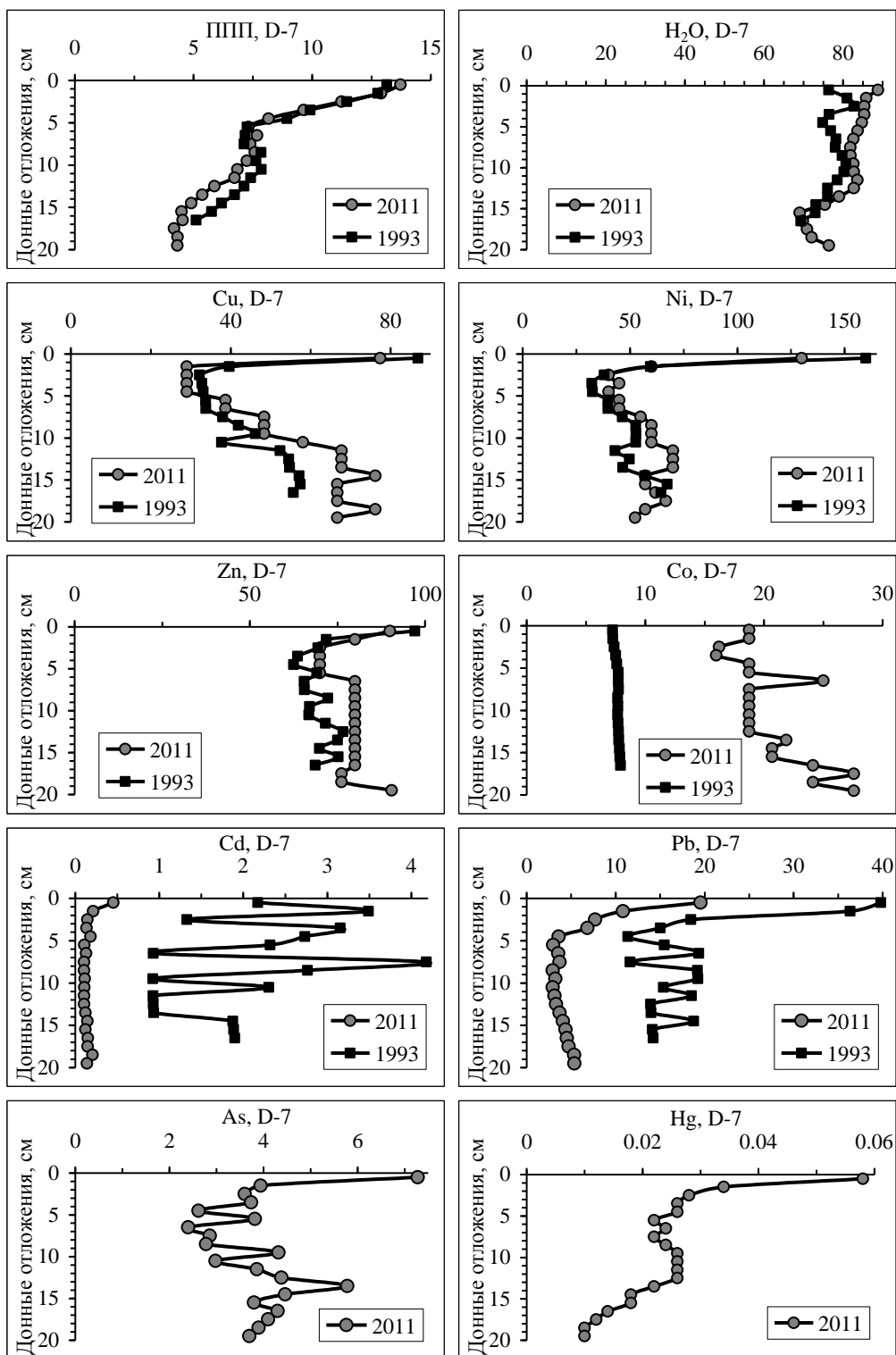


Рис.12. Вертикальное распределение влажности (H₂O, %) и ППП (%), ТМ (мкг/г сух. веса) в ДО станции D-7

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции r между концентрациями элементов и значениями ППП и влажности (H_2O) в колонках ДО исследуемых станций оз.Имандра

	Слой	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Fe	Sr	Cr	Al	As	Hg	P	ППП	H ₂ O
Слой	1.00																
Cu	-0.25	1.00															
Ni	-0.34	0.74	1.00														
Zn	-0.22	0.72	0.81	1.00													
Co	-0.21	0.40	0.63	0.51	1.00												
Cd	-0.45	0.76	0.89	0.79	0.47	1.00											
Pb	-0.68	0.70	0.54	0.54	0.33	0.73	1.00										
Mn	-0.48	0.51	0.61	0.45	0.51	0.61	0.65	1.00									
Fe	-0.32	-0.09	0.14	-0.14	0.37	0.06	0.10	0.32	1.00								
Sr	-0.49	0.70	0.72	0.55	0.50	0.74	0.73	0.89	0.30	1.00							
Cr	0.66	-0.14	-0.31	-0.12	-0.23	-0.31	-0.39	-0.48	-0.51	-0.44	1.00						
Al	0.65	0.02	-0.20	0.05	-0.17	-0.31	-0.47	-0.49	-0.66	-0.43	0.75	1.00					
As	-0.51	0.31	0.51	0.22	0.40	0.46	0.34	0.47	0.70	0.53	-0.62	-0.63	1.00				
Hg	-0.57	0.73	0.50	0.54	0.24	0.69	0.90	0.53	0.04	0.64	-0.27	-0.33	0.30	1.00			
P	0.03	-0.16	-0.01	-0.17	0.16	-0.08	-0.16	-0.02	0.59	-0.04	-0.01	-0.22	0.29	-0.04	1.00		
ППП	-0.57	0.16	0.28	0.14	0.07	0.46	0.53	0.43	0.34	0.43	-0.34	-0.63	0.35	0.54	0.10	1.00	
H ₂ O	-0.64	0.19	0.31	0.24	-0.02	0.45	0.55	0.34	0.09	0.33	-0.38	-0.49	0.22	0.60	-0.08	0.77	1.00

ПРИМЕЧАНИЕ. Корреляционная связь достоверно устанавливается при $r > 0.25$ ($p < 0.01$) при выборке $n=102$.

Таблица 5

Факторная модель химического состава ДО исследуемых станций оз.Имандра

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Слои	0.747	0.187	0.352
Cu	-0.640	0.575	0.337
Ni	-0.787	0.216	0.297
Zn	-0.501	0.652	0.199
Co	-0.354	-0.226	0.616
Cd	-0.848	0.327	-0.007
Pb	-0.860	0.286	-0.123
Mn	-0.762	-0.055	0.203
Fe	-0.380	-0.828	0.232
Sr	-0.844	0.068	0.265
Cr	0.560	0.531	0.058
Al	0.658	0.622	0.208
As	-0.607	-0.527	0.267
Hg	-0.831	0.353	-0.136
P	-0.046	-0.617	0.222
ППП	-0.676	-0.177	-0.503
Влажность	-0.578	0.022	-0.711
Общая дисперсия	7.458	3.254	1.868
Вес фактора, %	43.9	19.1	11.0

Исследуемая акватория оз.Имандра, как было отмечено ранее, несмотря на довольно значительное удаление от основных источников загрязнения, подвержена влиянию сточных вод и атмосферных выбросов комбината «Североникель», ОАО «Апатит», «Олкон». Поэтому деятельность этих горно-металлургических предприятий, сточные воды и атмосферные выбросы как промышленных, так и городских хозяйственно-бытовых предприятий, а также трансграничные переносы из стран Западной Европы оказывают непосредственное влияние на формирование химического состава ДО озера. В толще ДО наблюдается увеличение концентраций по направлению к поверхности ДО практически всех исследованных элементов, что проявляется в высоком отрицательном значении коэффициента корреляции содержания элементов с глубиной слоя ДО (табл.4). Исключением из этого списка являются Cr, Al и P. Все исследованные ТМ имеют также высокие значения коэффициентов корреляции между собой, что также говорит в пользу предположения о том, что поступление ТМ в составе выбросов и стоков горно-металлургических предприятий является одним из главных факторов формирования химического состава ДО в современных условиях. Хром, алюминий и фосфор, а также железо, не попадают в этот список коррелирующих между собой элементов, а с некоторыми элементами они имеют довольно высокие отрицательные значения коэффициента корреляции. Халькофильные элементы (Cd, Pb, As и Hg) хорошо коррелируют с содержанием органического материала (ППП), что может говорить о том, что органические соединения являются хорошими сорбентами этих высокотоксичных и опасных для гидробионтов элементов.

Факторным анализом (табл.5) выявлен определяющий фактор, воздействующий на формирование химического состава донных отложений. Это влияние промышленных предприятий и коммунально-бытовых стоков на

территории водосбора озера. Практически по всем исследуемым ТМ (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb, As, Hg) отмечаются высокие отрицательные значения коэффициента в факторной модели (табл.5), и вес этого первого фактора имеет подавляющее преимущество (44%). К этому списку ТМ примыкает также Sr, а также значения ППП и влажности. Первый фактор проявляется также и в положительном коэффициенте «слоя» ДО (т.е. с увеличением глубины донных отложений происходит уменьшение концентраций элементов), а также в положительных значениях коэффициента корреляции Sr и Al. Вторым фактором, имеющим сравнительно небольшой вес (19%), являются, вероятно, геохимические условия, контролирующие процессы формирования химического состава ДО. В пользу этого предположения говорит высокий отрицательный коэффициент Fe – металл, чутко реагирующий на изменения физико-химических условий в толще воды и ДО, в первую очередь окислительно-восстановительной обстановки. Третий фактор, имеющий наименьший вес (11%), объединяет такие величины, как ППП и влажность ДО, т.е. показатели, определяющие природные условия формирования химического состава ДО.

Значения коэффициента C_f и степени загрязнения C_d

Для оценки загрязнения оз.Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС была выбрана методика Л. Хокансона (Håkanson, 1980), адаптированная для условий Европейской Субарктики с учетом выявленных закономерностей формирования химического состава ДО, фоновых содержаний элементов в ДО. Для оценки загрязнения акватории оз.Имандра токсичными веществами определяли значения коэффициента C_f^i и степени C_d загрязнения. Коэффициент загрязнения C_f^i подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению, установленному в самой глубокой части колонки ДО; степень загрязнения C_d – как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих веществ. Подробное описание методики Л. Хокансона приведено в ранее опубликованных работах (например, Даувальтер, 1999, 2012; Даувальтер и др., 2012). Для характеристики экологического состояния оз.Имандра данный подход наиболее приемлем, он позволяет представить характер загрязнения адекватным и стандартным для всех исследованных станций способом на основе коэффициента и степени загрязнения, что было показано в монографии (Моисеенко и др., 2002). Значения C_f по отдельным металлам и C_d для исследуемых станций оз.Имандра показаны в табл.3.

Среди всех исследованных станций максимальные значения коэффициента загрязнения (по Ni, Zn, Co) и степени загрязнения (высокое – по классификации Л.Хокансона) отмечены на станции С-10, куда поступают потоки водных масс, загрязненные стоками комбината «Североникель» и других промышленных объектов, расположенных на берегах оз.Большая Имандра (рис.13). Величины C_f^i для высокотоксичных халькофильных металлов Cd, Pb и As на этой станции относятся к значительным по классификации Хокансона. В целом эта акватория характеризуется (по классификации Хокансона) как высоко загрязненная.



Рис.13. Степень загрязнения C_d ДО оз.Имандра в зоне влияния стоков Кольской АЭС

На станции F-11, на которой были зафиксированы максимальные концентрации в поверхностных слоях ДО практически всех ТМ, значения коэффициента и степени загрязнения не самые высокие. Это связано с тем, что на акватории этой станции происходило интенсивное осаждение взвешенного материала, связанное с изменением гидрологических условий, в первую очередь с изменением скорости течения. Поэтому на этой станции скорости осадконакопления достаточно высокие, и 16-см колонки было недостаточно, чтобы захватить фоновые слои ДО, отложившиеся до индустриального освоения водосбора оз.Имандра. Другим объяснением высоких концентраций ТМ по всей отобранной колонке на этой станции может быть также то, что в пос.Зашеек, находящемся вблизи станции F-11, недалеко от истока р.Нива, долгое время существовал лесозавод, к которому сплавливали лес по оз.Имандра. Дно озера в этом месте было усеяно топляком, перемещение которого и могло привести к интенсивному перемешиванию верхней части ДО.

В плесе Бабинская Имандра наибольшие значения коэффициентов загрязнения практически по всем ТМ и степени загрязнения (28.8 и 27.6, т.е. значительные по классификации Л. Хокансона) зафиксированы на станциях D-5 и E-5. На станции E-5 (самой глубокой из всех исследованных – глубина 38.4 м) зафиксированы наибольшие величины C_f для Pb и Cd – 7.4 и 4.9 соответственно из всех исследованных станций, а на станции D-5 – для Cu (3.8). Величины C_f^i для высокотоксичных халькофильных металлов Cd, Pb, As и Hg на этих станциях относятся к высоким (для Pb) и значительным по классификации Хокансона.

Величины коэффициента загрязнения для ряда ТМ (Ni, Cd, Pb) на станции В-3 относятся к значительным по классификации Л.Хокансона, а для As – к высоким (и наибольшим среди всех исследуемых станций). В целом эта акватория оз.Бабинская Имандра характеризуется довольно высоким значением степени загрязнения (23.4 – значительные по классификации Л. Хокансона), что не намного меньше, чем на станциях D-5 и E-5.

Наименее загрязненная станция из всех исследованных по результатам определения показателей загрязнения ДО – станция D-7, расположенная на выходе из Молочной губы. Однако и здесь зафиксированы величины коэффициента загрязнения (для Cd, Pb и Hg), значительные по классификации Л. Хокансона. Для Hg значение C_f наибольшее (5.8) среди всех исследуемых станций. Таким образом, несмотря на наименьшие концентрации практически всех ТМ в поверхностных слоях ДО станции D-7, в целом она также характеризуется значительным загрязнением по классификации Л.Хокансона. Величина C_d на этой станции равна 20, и наибольший вклад оказывают ТМ, отнесенные учеными-экологами в последнее время к глобальным загрязнителям ТМ – Cd, Pb и Hg.

Выводы

Плес Йокостровская Имандра является акваторией, более загрязненной ТМ, чем Бабинская Имандра, так как сюда поступает практически весь растворенный и взвешенный материал с территории водосбора и промышленные стоки предприятий, расположенных главным образом на берегах Большой Имандры. Здесь недалеко от истока единственной реки Нивы, вытекающей из оз.Имандра, образуется своеобразный геохимический барьер и создаются условия для аккумуляции ТМ в ДО, в первую очередь Ni и Cu, приносимых из акватории Большой Имандры. Максимальные значения степени загрязнения (высокое по классификации Л. Хокансона) из всех исследованных станций и коэффициентов загрязнения ряда ТМ (для Ni, Zn, Co) отмечены на станции С-10. Наибольший вклад в это загрязнение вносят вышеназванные металлы, источниками которых являются стоки комбината «Североникель» и других крупных предприятий, а также высокотоксичные халькофильные металлы, отнесенные учеными-экологами в последнее время к глобальным загрязняющим элементам, – Cd, Pb и As. В этом плесе, особенно в Зашейковской губе, в ДО происходит осаждение ТМ, поступивших из техногенных источников, и геохимические закономерности осадконакопления, характерные для водоемов в природном состоянии, здесь играют подчиненную роль, а главную – поступление загрязняющих веществ со стоками промышленных предприятий и их осаждение на своеобразном геохимическом барьере на относительно небольшой глубине (меньшей, чем на всех станциях Бабинской Имандры) для крупнейшего в Мурманской области оз.Имандра.

В плесе Бабинская Имандра, в отличие от Йокостровской Имандры, главенствующую роль играют природные геохимические закономерности осадконакопления, в первую очередь сорбция ТМ тонкодисперсными взвешенными частицами (с размерами менее 0.01 мм), обладающими большой удельной площадью поверхности. Частицы оседают в наиболее глубоких акваториях водоемов в спокойных ламинарных гидрологических условиях. Эти

природные закономерности сказались в увеличении концентраций практически всех ТМ в поверхностном слое ДО с повышением глубины водоема – на акваториях станций D-5 и E-5. Наименьшие концентрации ТМ зафиксированы на самой мелководной станции D-7, расположенной ближе всех к месту поступления теплых сбросных вод КАЭС, где скорости горизонтальных течений должны быть выше, чем в остальных исследуемых акваториях. Здесь происходит накопление в ДО более крупного материала с меньшей сорбционной способностью к аккумуляции ТМ. Однако в целом плес Бабинская Имандра характеризуется значительным загрязнением по классификации Л. Хокансона. Наибольший вклад в это значительное загрязнение вносят металлы (Cd, Pb, As, Hg), источником которых, помимо горно-металлургических предприятий, является глобальное загрязнение атмосферы Северного полушария.

По результатам исследований химического состава ДО можно сделать вывод, что влияние деятельности Кольской АЭС на загрязнение Бабинской Имандры выражается преимущественно в переносе относительно загрязненных вод из плеса Йокостровская Имандра в плес Бабинская Имандра, что способствует увеличению концентраций практически всех исследуемых ТМ в поверхностных слоях ДО наиболее глубоких акваторий.

Литература

Баранов И.В. Природные особенности водохранилищ Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Условия обитания, жизнь и промысел. – Мурманск: Кн. изд-во, 1966. – С.24-32.

Вернадский В.И. История минералов земной коры: в 2 т. Т. 2. История природных вод. – Л.: Госхимтехиздат, 1933. – Ч. 1, вып. 1. – 202 с.

Даувальтер В.А. Геохимия редкоземельных элементов в озере Имандра, Мурманская область / В.А.Даувальтер, Т.И.Моисеенко, И.В.Родюшкин // Геохимия. – 1999а. – № 4. – С.376-383.

Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. – 242 с.

Даувальтер В.А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореферат дис. ... докт. геогр. наук / В.А.Даувальтер. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. – 52 с.

Даувальтер В.А. Миграция и круговорот серы в субарктическом озере Имандра, загрязняющемся стоками горно-металлургического производства / В.А.Даувальтер [и др.] // Геохимия. – 1999б. – № 6. – С.626-636.

Даувальтер В.А. Накопление тяжелых металлов в оз.Имандра в условиях его промышленного загрязнения / В.А.Даувальтер [и др.] // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 3. – С.313-321.

Даувальтер В.А. Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озер // Водные ресурсы. – 2000. – № 4. – С.469-476.

Даувальтер В.А. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов / В.А.Даувальтер, Н.А.Кашулин, С.С.Сандимиров // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. – 2012. – № 2 (9), вып. 1. – С.54-87.

Даувальтер В.А. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита / В.А.Даувальтер, Б.П.Ильяшук // Геохимия. – 2007. – № 6. – С.680-684.

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.

Кашулин Н.А. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н.А.Кашулин [и др.] // Вестник МГТУ. – 2013. – Т. 16, № 1. – С.98-107.

Кашулин Н.А. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона / Н.А.Кашулин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. – 2012. – № 2 (9), вып. 1. – С.6-53.

Комплексное изучение Йокостровской и Бабинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема: отчет о НИР (окончат.): 11-72-16 / Кольский филиал Академии наук СССР; рук. Чижиков В.В.; исполн.: Воробьева Д.Г., Моисеенко Т.И. – Апатиты, 1976.

Комплексное изучение и охрана озера Имандра. Раздел: Комплексное изучение и охрана озера Большая Имандра: отчет о НИР (окончат.): 2-22-16 / Кольский филиал Академии наук СССР; рук. Беляева Г.В.; исполн.: Чижиков В.В. [и др.]. – Апатиты, 1971.

Кошкин В.Д. Состав органического вещества иловых отложений различных озер / В.Д.Кошкин, С.И.Кузнецов, Т.П.Сперанская // Труды лимнологической станции в Косине. – 1939. – № 2.

Крючков В.В. Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья / В.В.Крючков, Т.И.Моисеенко, В.А.Яковлев. – Апатиты, 1985. – 132 с.

Моисеенко Т.И. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Т.И.Моисеенко [и др.]; под ред. Моисеенко Т.И. – М: Наука, 2002. – 487 с.

Моисеенко Т.И., Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера / Т.И.Моисеенко, В.А.Яковлев. – Л.: Наука, 1990. – 221 с.

Моисеенко Т.И. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра) / Т.И.Моисеенко, В.А.Даувальтер, И.В.Родюшкин. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. – 127 с.

Моисеенко Т.И. Механизмы круговорота природных и антропогенных металлов в поверхностных водах Субарктики / Т.И.Моисеенко, В.А.Даувальтер, И.В.Родюшкин // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25, № 2. – С.231-243.

Моисеенко Т.И. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / Т.И.Моисеенко [и др.]. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. – 263 с.

Мороз Н.А. Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях прилегающей акватории АЭС // Збірник наук. праці СНУЯЕтаП. – Севастопіль: 2011. – Вип. 2 (38). – С.25-31.

Нерадовский Ю.Н. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский п-ов) / Ю.Н.Нерадовский, В.А.Даувальтер, Е.Э.Савченко // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Ч. СXXXVIII, № 6. – С.50-55.

Протасов А.А. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / А.А.Протасов [и др.]; под ред. А.А.Протасова. – Киев: Институт гидробиологии НАН Украины, 2011. – 234 с.

Рихтер Г.Д. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна / Г.Д.Рихтер. – Л., 1934. – 144 с.

Страхов Н.М. К теории геохимического процесса в гумидных зонах / Н.М.Страхов // Геохимия осадочных пород и руд. – М.: Недра, 1968. – С.102-133.

Усенков С.М. Геоэкология и седиментология больших озер (на примере Ладожского озера и других озер Северной Европы и Северной Америки): автореферат дис. ... докт. геол.-минералог. наук / С.М.Усенков. – СПб.: ЛЕМА, 2007. 36 с.

Чижиков В.В. Гидрохимия и донные отложения озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения / В.В.Чижиков // Экосистемы озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. – Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1980. – С.24-64.

Förstner U. Metal Pollution in the Aquatic Environment / U.Förstner, G.T.W.Wittmann. – Berlin: Springer-Verlag, 1979. – 210 p.

Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach / L.Håkanson // Water Res. – 1980. – Vol. 14. – P.975-1001.

Horowitz A.J. A primer on trace metal-sediment chemistry / A.J.Horowitz. – 2nd rew. ed. – Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1991. – 136 p.

Melnikov S.A. Report on heavy metals / S.A.Melnikov // State of the Arctic Environment. – Rovaniemi: Arctic Centre Publications, 1991. – P. 82-153.

Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet / O.K.Skogheim – Oslo: As-NLH, 1979. – Nr. 2. – 7 p.

УДК 574.5 (52) (58)

О.И.Вандыш, Д.Б.Денисов, А.А.Черепанов, Т.А.Горбачева, Н.А.Кашулин

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ ГУБЫ БЕЛОЙ ОЗЕРА ИМАНДРА ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Выявлены структурные особенности планктонных сообществ губы Белой оз.Имандра при многолетнем воздействии сточных вод апатит-нефелинового производства, и оценено современное экологическое состояние данной акватории озера. Представлены сведения о видовом составе и сезонной динамике планктонных сообществ. Полученные результаты дополняют информацию об ответной реакции гидробионтов на воздействие стоков предприятий горнопромышленного комплекса, а также о возможности использования сообществ планктонных организмов как надежного индикатора при оценке состояния водных экосистем.

Ключевые слова:

оз.Имандра, зоопланктон, фитопланктон, информативные показатели сообщества, мониторинг, эвтрофирование, сточные воды, горнопромышленные предприятия.