

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.13-30
УДК 624.131.41

В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин

Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН

ФОНОВЫЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА ИМАНДРА

Аннотация

Исследованы фоновые содержания элементов в донных отложениях оз. Имандра, для чего отбирались их колонки и проводился послойный анализ содержания элементов. Определены содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), Al и P. Определение фонового (доиндустриального) уровня содержания элементов проводили в самых глубоких частях колонок донных отложений. Предложено районирование акватории озера после построения картосхем пространственного распределения элементов с использованием ГИС-технологий.

Ключевые слова:

тяжелые металлы, донные отложения, озеро Имандра.

V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin

Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of RAS

BACKGROUND LEVELS OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE SEDIMENTS OF THE IMANDRA LAKE

Abstract

The background levels of chemical elements in sediments of the Imandra Lake were investigated. For this purpose, core samples were collected and levels of chemical elements were measured by layers. Levels of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), alkaline and alkaline-earth metals (Na, K, Ca, Mg, Sr), as well as Al and P were detected. Background (preindustrial) levels of the chemical elements were measured in the deepest layers of sediment cores. Zoning of the Imandra lake was carried out based on schematic distribution maps of chemical elements with the use of GIS technologies.

Keywords

heavy metals, bottom sediments, Imandra Lake.

Введение

Сравнительная оценка уровней содержания химических элементов и их соединений в различных компонентах окружающей среды может осуществляться путем сравнения их с нормативными параметрами. В экологической геохимии в качестве специфических нормативных величин используются фоновые уровни химических элементов и их соединений. Под геохимическим фоном (фоновым содержанием, природным фоном, природным или естественным содержанием) понимается средняя концентрация того или иного элемента в природных телах (компонентах), определенная по данным изучения естественного распределения с учетом вариаций в пределах однородного в ландшафтно-геохимическом отношении участка, не затронутого техногенезом. На практике это, как правило, участки, расположенные вне зоны прямого техногенного влияния [Сает и др., 1990; Янин, 1999].

Как известно, водоемы служат коллекторами всех видов загрязнения. Донные отложения (ДО) накапливают «сведения» о потоках элементов в биосфере в историческом аспекте [Förstner, Wittmann, 1981; Melnikov, 1991]. Они являются важным источником информации о климатических, геохимических, экологических условиях, существовавших на водосборе и в самом водоеме, позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной сред.

В настоящее время в России не разработаны нормативы содержания элементов и их соединений в ДО водоемов. Поэтому одной из основных задач эколого-геохимических исследований является определение фоновых концентраций элементов в ДО малых озер Мурманской области с учетом региональной специфики [Даувальтер, 1999, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2014], озер Республики Татарстан [Иванов и др., 2010], Латвии [Kadūnas, Radzevičius, 2003], Скандинавии [Håkanson, 1980; 1984], так и для крупных водоемов — шведских озер [Håkanson, 1977], швейцарского озера [von Guten et al., 1997].

Целью статьи является установление фоновых концентраций элементов в ДО оз. Имандра и проведение районирования акватории озера на основе анализа их территориального распределения.

Материалы и методы

Озеро Имандра расположено на северо-западе европейской территории России. Котловина озера находится в глубокой тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря [Моисеенко и др., 2002]. Эта депрессия делит Мурманскую область на две части: западную — материковую и восточную — полуостровную. Оз. Имандра — самый крупный водоем в Мурманской области и один из крупнейших в Заполярье (рис. 1). Антропогенные факторы, которые в последние годы по значимости становятся сопоставимыми с природными, влияют на экологическое состояние озера в результате непосредственного сброса сточных вод и неорганизованных стоков, а также вследствие глобальных изменений окружающей среды и климата. Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей вызвало развитие мощного индустриального комплекса на территории водосбора оз. Имандра, что привело к высокой антропогенной нагрузке на водоем. Среди основных производств выделяются следующие: горнодобывающая промышленность (АО «Апатит»), металлургическая промышленность (цветная металлургия — ОАО «Североникель»; черная металлургия — ОАО «Олкон» и ОАО «Ковдорский ГОК»), энергетический комплекс (каскад Нивских ГЭС, Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ), а также хозяйственно-бытовые стоки городов Оленегорска, Мончегорска, Кировска, Апатитов и других населенных пунктов, расположенных на водосборе озера.

Исследования оз. Имандра, в том числе и экологические, начались с момента освоения территории Мурманской области. Масштабные работы проводились в 1920-е гг., и по результатам работы Имандрской экспедиции Географо-экономического научно-исследовательского института при ЛГУ в 1925–1927 гг. Г. Д. Рихтером [1934] было дано первое и довольно подробное описание оз. Имандра. Детальные исследования состояния ДО оз. Имандра выполняются со времени организации ИППЭС КНЦ РАН в 1989 г. сотрудниками лаборатории водных экосистем. Подробная съемка озера, в том числе с отбором ДО, была проведена в середине 1990-х гг. [Моисеенко и др., 2002] и в 2010–2012 гг. При написании данной работы использовали результаты съемки озера 2010–2012 гг.

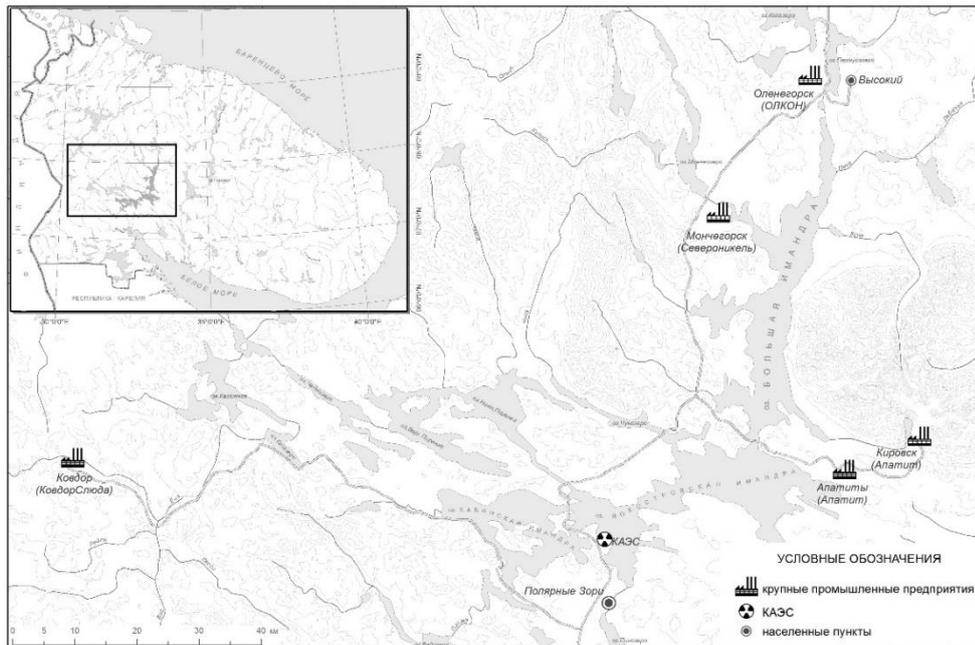


Рис. 1. Карта оз. Имандра. Расположение крупных населенных пунктов и промышленных предприятий на его водосборе

Для оценки современного экологического состояния оз. Имандра и изучения истории его развития и загрязнения был исследован химический состав ДО методом отбора колонок и послойного анализа накопления элементов. Определяли содержания тяжелых металлов (ТМ) Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), Al и P. Методы отбора колонок ДО, пробоподготовки и химического анализа описаны ранее (Даувальтер, 1999, 2012). При определении мест отбора колонок ДО основное внимание уделяли акваториям, в которые непосредственно поступают сточные воды предприятий: комбината «Североникель» (Монче-губа), Оленегорского ГОКа (Куреньга губа), АО «Апатит» (Белая губа и южная часть Большой Имандры), Африкандского рудоуправления (Зашеечная губа), Кольской АЭС (Молочная губа и восточная часть Бабинской Имандры). Акваторию западной части Бабинской Имандры (Уполокша и Камка губы) рассматривали как относительно незагрязненную, не подверженную непосредственному влиянию сточных вод, хотя водосбор этой части озера испытывает аэротехногенное загрязнение. Акватория влияния промышленных стоков АО «Апатит» была исследована более подробно в 2012 г., когда колонки ДО отбирали на 12 станциях.

Методологические подходы к определению фоновых концентраций элементов в донных отложениях

При оценке экологического состояния водоемов одним из важных вопросов является установление фоновых концентраций элементов в ДО. Для определения интенсивности антропогенной нагрузки на водоем, как правило, современные содержания элементов в ДО сравнивают с их фоновыми содержаниями. Для решения этой проблемы существует два подхода:

1) установление основных геохимических фоновых уровней элементов (кларков), основываясь на данных А. П. Виноградова [1962], К. Турекиана и К. Уидепола [Turekian, Wedepohl, 1961], а также К. Уидепола [Wedepohl, 1995];

2) определение доиндустриального уровня содержания элемента в самых глубоких частях колонки ДО [Förstner, 1977].

В первом случае игнорируются местные особенности формирования ДО, во втором эти особенности подчеркиваются. Для определения степени загрязнения озер первый подход является более приемлемым, потому что изменчивость фоновых значений может быть очень существенной даже внутри одного водоема или однотипных озер. Главным преимуществом данного метода является сокращение объема работ, то есть для изучения антропогенного влияния на водоем достаточно отбора только поверхностного слоя ДО из зон аккумуляции, а недостатком — получение менее точных данных по изменению концентраций с течением времени, так как не отбирается целая колонка ДО, по результатам анализа которой можно изучить историю событий, происходящих в самом озере и на его водосборе. При исследовании ДО оз. Имандра, как правило, на каждой станции отбирали колонки ДО, поэтому есть возможность определения фонового содержания элементов в каждой из них. Тем не менее очень важно определить и средние значения фоновых концентраций элементов в ДО озер отдельного района или области для возможности использования первого подхода в целях экономии средств при проведении химических анализов и оценке экологического состояния водоемов, например, для определения возможности использования данного водоема с целью водопотребления, рыбозаповедения, рекреации.

Согласно исследованиям Н. М. Страхова [Страхов и др., 1954], в основе механизма, контролирующего интенсивность поступления материала, а следовательно, и элементов в озера лежит чисто геометрический фактор: отношение между площадью водосбора и самим водоемом, но влияние этого фактора осложнено воздействием климата, рельефа и петрографического состава водосборной площади. Н. М. Страховым выявлена закономерность роста относительной площади водосборов с уменьшением размеров озер и их водосборов. Это правило не имеет строго математического характера, но, принимая во внимание, что масса сносимого материала в первом приближении пропорциональна площади сноса, можно заключить, что интенсивность поступления материала с уменьшением размера озера в общем возрастает.

Для установления интенсивности антропогенной нагрузки на озеро и степени его загрязнения необходимо знать природные концентрации элементов в ДО, которые существовали до любой деятельности на берегах озера или его водосбора. Для этого часто используются величины фоновых концентраций элементов в ДО, которые определяются, как правило, в самых нижних, глубоких, частях колонок ДО. Средняя скорость осадконакопления в озерах Северной Фенноскандии (и Мурманской области в том числе) оценивается равной примерно 1 мм в год, а в аэротехногенно загрязняемых озерах находится в пределах от 0,3 до 1,25 мм/год [Norton et al., 1996; Rognerud et al., 1993]; в озерах, загрязняемых стоками промышленных предприятий, например, Куэтсьярви — в диапазоне 1,5–3 мм/год [Даувальтер, 2002; Dauvalter, 2003]. При исследовании состояния ДО оз. Имандра отбирали колонки ДО длиной 20–25 см. Следовательно, можно предположить, что в нижних слоях колонок должны быть зафиксированы природные фоновые содержания элементов. Хотя в акваториях поступления большого количества взвешенного материала со стоками промышленных предприятий (главным образом, рудников и обогатительных фабрик АО «Апатит») скорость осадконакопления значительно увеличилась, длины некоторых колонок, возможно,

было недостаточно, чтобы оценить фоновые, доиндустриальные слои. Поэтому при определении средних фоновых концентраций элементов в ДО оз. Имандра некоторые содержания не учитывались, так как эти значения были, явно, выше фоновых, например, на станциях, близко расположенных к месту поступления стоков АО «Апатит» (станции в Белой губе) и комбината «Североникель» (станции в Монче-губе). Колонки ДО отбирали в последние четверть века. Для проведения анализов на содержание элементов использовали высокоточные приборы атомно-абсорбционной спектрофотометрии, поэтому есть возможность определить фоновые концентрации элементов по результатам исследований последних лет с достаточно большой точностью.

Фоновые содержания элементов в донных отложениях озера Имандра

В таблице 1 показаны фоновые концентрации элементов в ДО оз. Имандра по результатам исследований 1990-х гг. (Моисеенко и др. [2002], с некоторыми дополнениями и изменениями, и 2000-х гг. (современные данные), а также среднее содержание элементов в осадочных породах по А. П. Виноградову [1962], для пятидесяти скандинавских озер [Håkanson, 1980; 1984] и двухсот малых озер Мурманской области (с дополнениями и изменениями по Даувальтеру и Кашулину [2014]).

Сопоставление средних фоновых содержаний микроэлементов (Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr, которые приведены в таблице 1 в мкг/г сух. веса) в ДО оз. Имандра по результатам исследований 1990-х и 2000-х гг. показало, что в 2000-х гг. значения для большинства микроэлементов несколько ниже, что, возможно, связано с использованием более совершенного оборудования, позволяющего более точно определять концентрации микроэлементов при малых их величинах. Например, концентрации Cd и Pb.

По остальным микроэлементам средние фоновые содержания в 2000-х гг. оказались несколько ниже, за исключением Co, Cr и Sr (значения увеличились в 1,4, 1,1 и 2,0 раза соответственно). Возможно, это связано с тем, что на отдельных акваториях озера станции отбора колонок ДО в 1990-х и 2000-х гг. не полностью совпадали по количеству и по месту отбора, хотя общее количество колонок, отобранных отдельно в 1990-х и 2000-х гг., было около 30.

По макроэлементам наблюдается другая картина — средние фоновые содержания в 2000-х гг. несколько увеличились (кроме Mn), причем по Ca почти в 7 раз. Вероятно, это связано с тем, что в 2000-х гг. несколько увеличилось число исследованных станций в Большой Имандре и на акватории, примыкающей к месту впадения рек, водосборы которых находятся в Хибинских горах. Как известно, в геологическом отношении Хибины — щелочной массив с высоким содержанием в коренных породах щелочных и щелочноземельных металлов (K, Na, Ca, Mg и Sr) и Al.

Средние фоновые концентрации большинства элементов в ДО двухсот малых озер Мурманской области немного меньше средних содержаний в оз. Имандра (табл. 1). Это, вероятно, связано с меньшим содержанием органического материала в оз. Имандра по сравнению с малыми озерами (почти в 2 раза, см. табл. 1), а также с наличием большого количества месторождений и залежей полезных ископаемых и выходов коренных скальных пород на водосборе оз. Имандра, тогда как водосборы основной части малых озер Мурманской области сверху покрыты четвертичными (в основном ледниковыми) отложениями, довольно хорошо промытыми и бедными микроэлементами и щелочными и щелочноземельными металлами и Al, из которых состоят основные породообразующие минералы.

Таблица 1

Средние (X), минимальные (Min) и максимальные (Max) фоновые значения влажности и потерь при прокаливании (H₂O и ППП, %), фоновые концентрации элементов (микроэлементы Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr — в мкг/г, макроэлементы Mn, Fe, Al, P, K, Na, Ca, Mg — в %)

Параметр	ОП	СО	МО			Оз. Имандра, 1990-е гг.			Оз. Имандра, 2000-е гг.		
			X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max
H ₂ O	–	–	–	–	–	73,7	59,9	84,2	80,4	56,8	91,1
ППП	–	–	24,0	0,9	88,9	12,6	4,7	21,7	13,8	3,6	27,9
Cu	57	28,7	28	2	94	39	28	65	38	13	67
Ni	95	49,7	27	4	101	52	29	161	42	21	70
Zn	80	110,6	94	3	274	97	69	128	92	59	160
Co	20	18,5	13	1	69	14	3	28	17	6	28
Cd	0,3	0,58	0,24	0,01	1,70	1,45	0,86	2,78	0,15	0,05	0,31
Pb	20	34,9	4,4	0,4	17,0	14,3	5,0	25,0	5,1	1,4	11,5
As	6,6	8,6	3,2	0,1	13,7	–	–	–	4,7	1,3	13,3
Hg	0,4	0,12	0,037	0,003	0,112	0,071	0,003	0,190	0,044	0,005	0,103
Cr	100	48,7	49	4	1007	63	32	95	70	16	107
Sr	450	–	49	2	299	38	3	127	79	17	721
Mn	0,067	0,086	0,050	0,006	0,447	0,224	0,042	1,175	0,163	0,010	0,719
Fe	3,33	2,67	2,43	0,054	1,47	3,21	1,40	6,07	3,34	0,18	14,53
Al	10,45	2,6	1,97	0,227	6,76	2,30	1,33	3,44	2,52	1,24	4,26
P	0,077	–	0,113	0,006	0,508	–	–	–	0,180	0,060	0,644
K	2,28	–	0,159	0,012	1,16	0,156	0,067	0,298	0,194	0,090	0,344
Na	0,66	–	0,045	0,004	0,432	0,056	0,023	0,125	0,089	0,027	0,197
Ca	2,53	–	0,283	0,005	1,45	0,077	0,019	0,297	0,529	0,130	1,395
Mg	1,34	–	0,381	0,025	6,07	0,378	0,185	0,697	0,410	0,212	0,633

Примечания: 1. В ДО оз. Имандра, отобранных в 1990-е и 2000-е гг., скандинавских озер (СО, Håkanson (1980, 1984)) и малых озер Мурманской области (МО, с дополнениями и изменениями по: Даувальтер [1999, 2012]; Даувальтер, Кашулин[2014]).

2. ОП — среднее содержание в осадочных породах [по Виноградову, 1962].

В скандинавских озерах средние фоновые концентрации большинства элементов в ДО сопоставимы с таковыми в оз. Имандра (табл. 1), но содержание халькофильных элементов (Cd, Pb, As и Hg) выше. Объяснение этому лежит в усовершенствовании аналитического оборудования в последнее время по сравнению с концом 1970-х гг., когда были проведены исследования скандинавских озер [Håkanson, 1980; 1984]. Этим объясняется также и то, что средние фоновые содержания этих элементов в ДО оз. Имандра по результатам последних исследований ниже, чем в 1990-х гг. (табл. 1).

Материал, образующий ДО озер, поступает из водной толщи и приносится как с территории водосбора (аллохтонный), так и образуется в самом озере (автохтонный). В то же время ДО в результате дальнейших преобразований и диагенетических процессов образуют осадочные горные породы. Поэтому ДО водоемов (в том числе и озер) можно рассматривать как связующее звено между гидросферой и литосферой. Академик А. П. Виноградов [1962] определил среднее содержание элементов в осадочных горных породах на основе анализа глин и сланцев. Анализируемые нами ДО по гранулометрическому составу представляют собой глинистые илы [Югай и др., 2012, а, 2012, б], то есть очень близки к глинам и сланцам, поэтому содержание элементов в ДО водоемов разумно сопоставлять с их содержанием в осадочных горных породах. Большинство элементов в осадочных горных породах в среднем находятся в большем количестве, чем в фоновых слоях ДО оз. Имандра (табл. 1). Вероятно, это связано с тем, что ДО состоят не только из минеральных, но также и из органических веществ (в оз. Имандра до 30 %), которые «разбавляют» общее содержание элементов. Вместе с тем средние фоновые концентрации Mn в ДО больше, а для Fe подобно их содержанию в осадочных горных породах. Относительное обогащение этими металлами связано с особыми геохимическими условиями в ДО оз. Имандра в первую очередь окислительно-восстановительными, при которых идет образование железомарганцевых конкреций при окислительной обстановке [Даувальтер, Ильяшук, 2007] и пирита (сульфида железа) в восстановительной обстановке [Нерадовский и др., 2009]. Примерно в равных количествах в ДО оз. Имандра и осадочных породах отмечено содержание других элементов (Co и As (табл. 1)), чутко реагирующих на изменение окислительно-восстановительных условий, что, возможно, связано с образованием в ДО минералов этих элементов.

Для установления влияния природных факторов на формирование химического состава элементов в фоновых слоях ДО и связи элементов между собой проведены корреляционный и факторный анализы (табл. 2 и 3). Тесная связь глубины станций с содержаниями Fe, а также положительное, довольно высокое значение коэффициента корреляции глубины с Mn объясняется образованием железомарганцевых конкреций на большой глубине, как это было отмечено более ранними исследованиями [Даувальтер, Ильяшук, 2007]. Другие природные факторы такие, как влажность и содержание органического материала зависят в первую очередь от гранулометрического состава частиц ДО. Неуплотненные тонкодисперсные осадки (глинистые и алевритовые илы), имеющие размеры частиц менее 0,01 мм, обладают большой пористостью и значительной влажностью, а ДО с более крупными частицами, песчаными илами и песками, имеют соответственно меньшую пористость и влажность.

Таблица 3

Факторная модель химического состава фоновых ДО оз. Имандра

Параметры	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина	-0,042	0,680	0,201
Влажность	0,882	-0,076	0,094
Органический материал	0,605	-0,386	-0,359
Cu	-0,704	0,262	-0,557
Ni	-0,718	0,050	0,064
Zn	0,038	-0,120	-0,747
Co	-0,261	0,773	-0,473
Cd	0,189	-0,008	-0,786
Pb	-0,014	-0,205	-0,372
Mn	-0,060	0,696	0,109
Fe	0,072	0,884	0,151
Sr	-0,941	-0,145	-0,021
Cr	0,537	0,494	-0,419
Al	-0,941	-0,045	0,075
As	-0,097	0,690	0,213
Hg	-0,433	-0,067	-0,131
P	-0,953	-0,045	-0,048
K	-0,964	-0,068	0,041
Na	-0,944	-0,136	0,009
Ca	-0,975	-0,127	-0,010
Mg	-0,240	0,456	-0,086
Вес фактора, %	40,2	17,2	15,0

Значения влажности и потерь при прокаливании (ППП) имеют достоверную отрицательную корреляцию с содержанием щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P, в больших количествах поступающими с водосбора Большой и Малой Белой в южную часть Большой Имандры. Эти элементы, содержащиеся в горных породах Хибинского щелочного массива и в залежах апатитонепелиновых руд, поступают в озеро главным образом в виде довольно крупных взвешенных частиц, осаждение которых в акватории южной части Большой Имандры способствует формированию ДО с небольшими величинами влажности и ППП.

Органический материал в водных системах характеризуется следующими важными с точки зрения поглотительной способности свойствами: увеличение адсорбционной способности с уменьшением размера частиц; большая площадь поверхности; высокая емкость катионного обмена; высокий отрицательный заряд поверхности; способность к физическому улавливанию. Р. Джиббс [Gibbs, 1973] подчеркивает важность органических молекул в контроле концентраций ТМ во взвешенных веществах и ДО, а также во взаимодействии между водой и ДО. Способность органического материала концентрировать ТМ изменяется в зависимости от состава и типа органического материала.

Значения ППП как показателя содержания органического материала из ТМ имеют достоверную положительную корреляцию только с Ni ($r = 0,44$) и немного меньшую с Cd (табл. 2), с другими ТМ зависимость не достоверна. Это, возможно, связано, как было сказано выше, с поступлением в озеро крупных взвешенных частиц из горных массивов, которые содержат малое количество органического материала, а также с малой продуктивностью исходно олиготрофного озера.

Практически все ТМ (Ni, Cu, Co, Cd) имеют достоверную связь друг с другом, что говорит о едином источнике их поступления, вероятно, им являются залежи сульфидных руд Мончегорского района. Щелочные (Na и K) и щелочноземельные (Ca, Mg и Sr) металлы, Al и P имеют достоверную положительную корреляционную связь между собой. Ко второй группе присоединяется также Hg и Si (табл. 2). Предполагаем, что элементы второй группы в больших количествах поступают с водосбора Большой и Малой Белой в южную часть Большой Имандры из апатитонефелиновых залежей и месторождений.

Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава фоновых ДО оз. Имандра, проведен факторный анализ (табл. 3).

Первый фактор, имеющий больший вес (40 %), объединяет физические параметры ДО (влажность и ППП), которые зависят в первую очередь от гранулометрического состава ДО, и элементы, образующие залежи и месторождения (медно-никелевых и апатитонефелиновых руд), а также содержащиеся в повышенных концентрациях в породообразующих минералах горных пород, слагающих водосбор оз. Имандра, — ТМ Cu и Ni (Монче-тундры), щелочные и щелочноземельные металлы K, Na, Sr, Ca, а также Al и P (Хибинский щелочной массив). Вторым по силе влияния фактором (вес 17 %) являются элементы, чутко реагирующие на изменение физико-химических условий, существующих в ДО, — Fe, Mn, Co и As, а также такой параметр, как глубина озера, от которого зависят геохимические условия в толще воды и ДО. Только два ТМ — Zn и Cd — имеют значимые коэффициенты в третьем факторе (вес 15 %), что также связано с повышенным содержанием этих металлов в горных породах, слагающих водосбор озера. Обычно в природных условиях цинк связан с образованием сфалерита ZnS, а кадмий — типичная примесь этого минерала.

Таким образом, с помощью корреляционного и факторного анализов выявлены две группы элементов: первая группа — ТМ, вторая — щелочные (Na и K) и щелочноземельные (Ca, Mg и Sr) металлы, Al и P. Эти группы элементов содержатся в повышенных содержаниях в породообразующих минералах горных пород, слагающих водосбор оз. Имандра: первая группа — в северной части водосбора (Монче-тундры), вторая группа — в юго-восточной части водосбора (Хибинский щелочной массив).

Для выявления различий в значениях фоновых концентраций в акваториях озера рассчитаны значения средних содержаний элементов в северной и южной частях Большой Имандры и отдельно в акваториях Йокостровской и Бабинской Имандры (табл. 4).

Наибольшие средние содержания ТМ (кроме Co, Pb и As) отмечены в северной части Большой Имандры, к которой, приурочены медно-никелевые залежи Монче-тундры (табл. 4, рис. 2).

В южной части Большой Имандры зафиксированы наибольшие средние содержания Al (рис. 3) и P, а также Ca, Na и Sr (рис. 4, табл. 4), что связано с поступлением поверхностного стока, обогащенного этими элементами, с водосбора, на котором расположены залежи апатитонефелиновых руд. Апатит, $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, и нефелин, $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$, — это минералы, содержащие вышеперечисленные элементы. Минерал апатит также содержит примеси Mn, Fe, Sr, Al, Th, редкоземельных элементов.

Таблица 4

Средние (X), минимальные (Min) и максимальные (Max) фоновые значения влажности и потерь при прокаливании (H₂O и ППП, %), фоновые концентрации элементов (микроэлементы Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr — в мкг/г, макроэлементы Mn, Fe, Al, P, K, Na, Ca, Mg — в %) в ДО разных плесов оз. Имандра, отобранных в 2000-е гг.

Параметры	Север Большой Имандры			Юг Большой Имандры			Йокостровская Имандра			Бабинская Имандра		
	X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max	X	Min	Max
Глубина	11,6	8,5	19,0	14,1	10,0	21,0	14,4	4,9	26,5	24,7	17,0	38,4
Влажность	83,21	77,80	85,83	74,28	56,75	81,15	85,21	81,27	91,10	76,71	70,74	80,58
ППП	20,59	14,79	25,75	10,50	3,57	13,79	15,54	11,00	27,87	8,97	4,32	12,10
Cu	50	16	98	35	23	51	35	13	55	51	40	67
Ni	150	49	351	34	26	51	35	21	59	55	42	70
Zn	111	62	179	102	83	123	84	59	160	97	83	140
Co	19	11	33	18	13	23	10	6	15	24	17	28
Cd	0,21	0,07	0,37	0,15	0,05	0,25	0,15	0,05	0,31	0,14	0,10	0,19
Pb	4,7	2,2	9,2	8,3	2,9	11,5	4,7	1,4	8,2	4,3	3,6	5,4
As	2,4	1,3	3,2	6,8	4,2	9,0	4,1	1,7	7,9	4,8	1,6	13,3
Hg	0,063	0,014	0,110	0,020	0,005	0,040	0,050	0,022	0,088	0,034	0,010	0,058
Mn	0,163	0,029	0,383	0,153	0,035	0,285	0,189	0,014	0,719	0,130	0,010	0,264
Fe	2,29	1,10	2,88	1,76	0,18	2,56	4,07	1,35	14,53	4,31	3,22	6,39
Sr	42	17	76	168	112	224	48	35	95	35	31	43
Cr	68	47	96	53	16	75	65	50	88	94	86	107
Al	1,92	1,36	2,82	3,86	3,35	4,26	2,09	1,24	2,62	2,65	2,44	2,96
P	0,187	0,167	0,221	0,211	0,073	0,514	0,148	0,060	0,311	0,208	0,098	0,644
K	0,145	0,090	0,180	0,276	0,226	0,344	0,136	0,101	0,167	0,315	0,313	0,317
Na	0,133	0,054	0,190	0,144	0,076	0,197	0,047	0,027	0,060	0,053	0,049	0,059
Ca	0,460	0,130	0,826	0,822	0,494	1,395	0,439	0,130	0,695	0,522	0,484	0,587
Mg	0,346	0,311	0,375	0,503	0,425	0,538	0,311	0,212	0,379	0,628	0,620	0,633

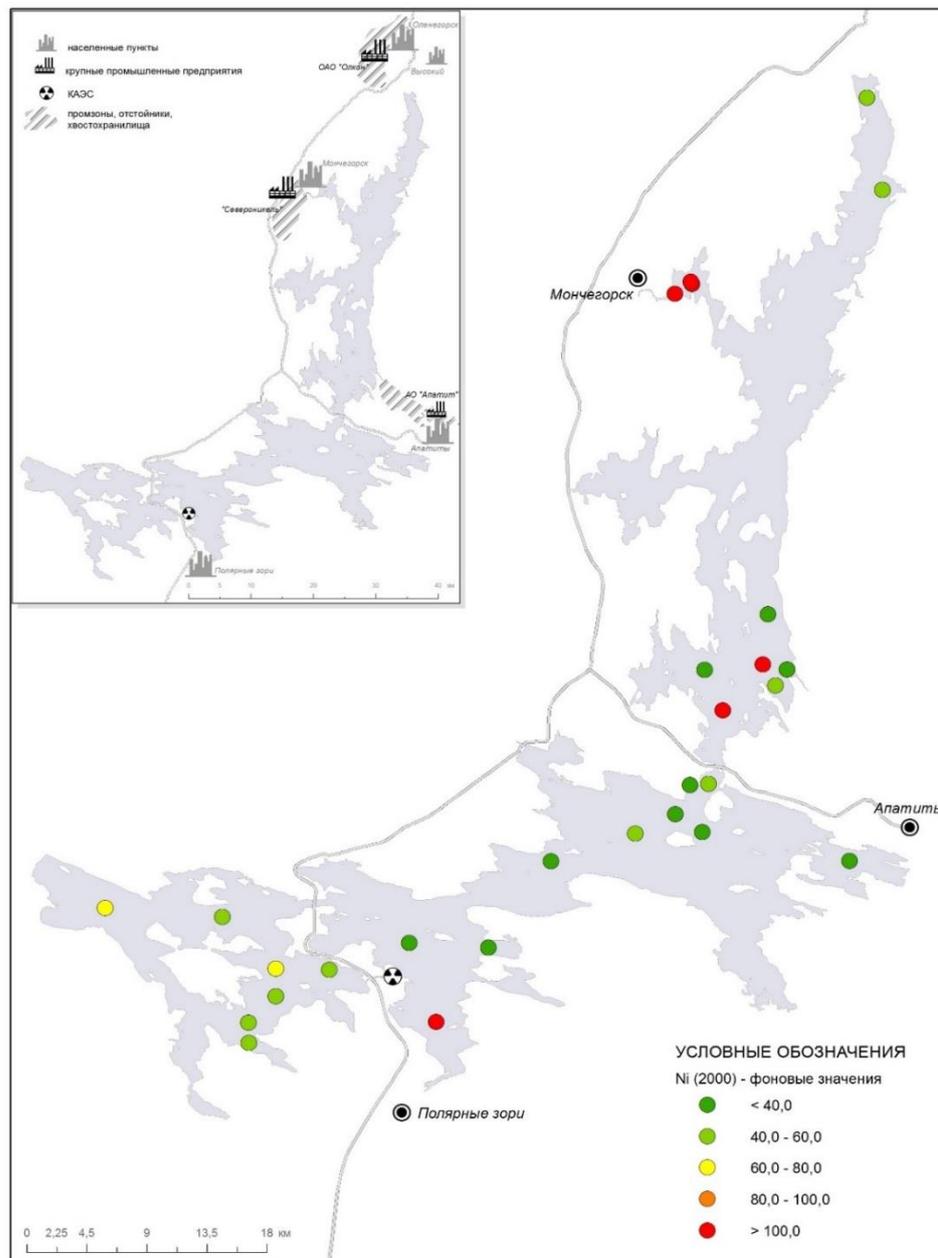


Рис. 2. Фоновые содержания Ni (мкг/г) в ДО оз. Имандра по результатам исследований 2000-х гг.

Максимальные содержания редкоземельных элементов в ДО, отобранных в середине 1990-х гг. на станции в 5 км к югу от пролива между Большой и Йокостровской Имандрой, отмечены в слое 7—8 см, что по времени осадконакопления соответствует интенсивному росту в 1970-е гг. апатитонефелинового производства, в технологическом цикле которого используются руды с повышенным содержанием РЗЭ [Даува́льтер и др., 1999]. В южной части Большой Имандры зафиксированы также наибольшие средние содержания Pb и As.

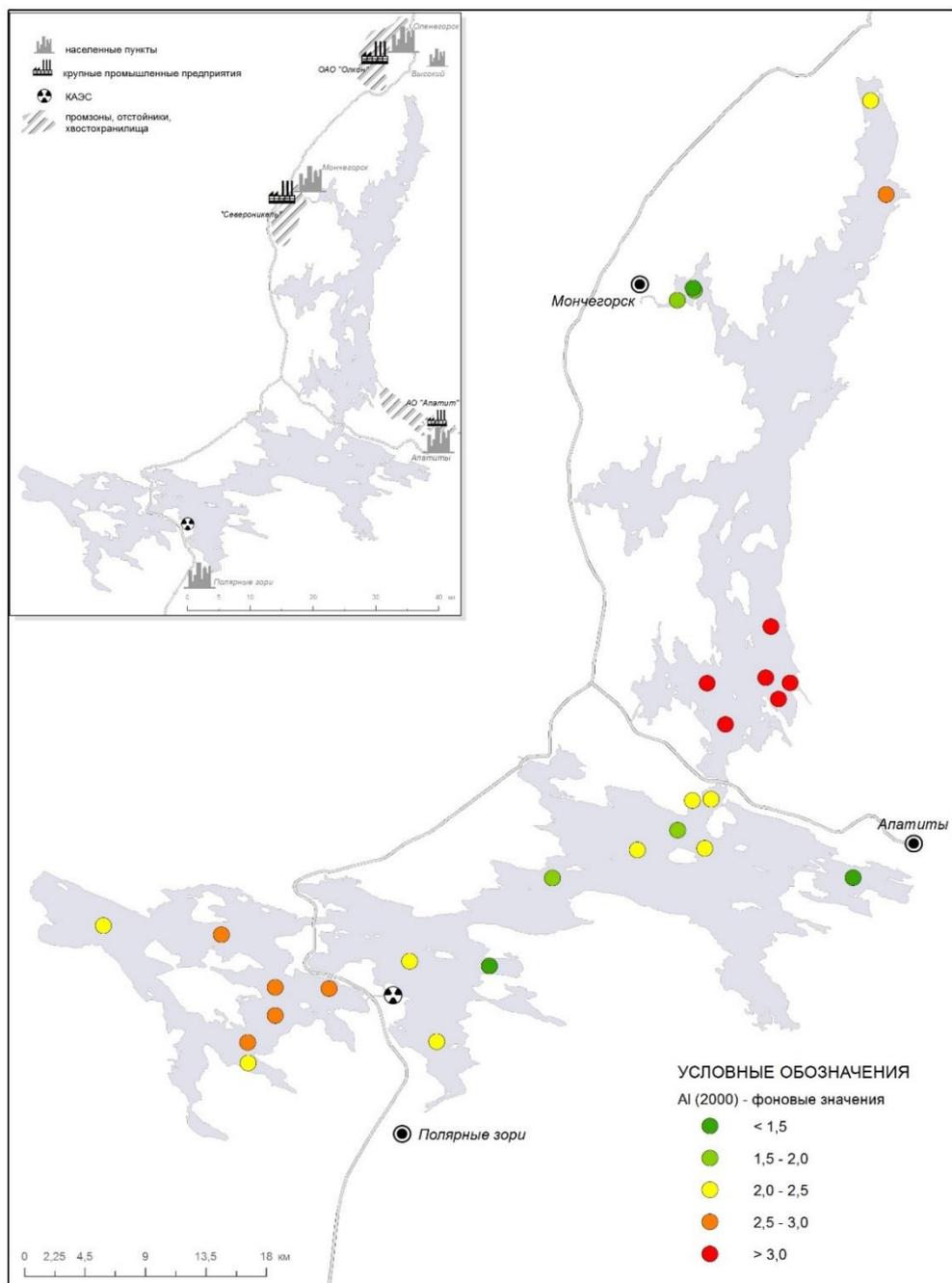


Рис. 3. Фоновые содержания Al (%) в ДО оз. Имандра по результатам исследований 2000-х гг.

Наибольшие средние содержания Mn в фоновых слоях ДО зафиксированы в Йокостровской Имандре, а Fe в Бабинской Имандре (рис. 5), что связано, скорее всего, с образованием специфических условий для формирования оксидов этих металлов в ДО, например, с наибольшими глубинами в Бабинской Имандре.

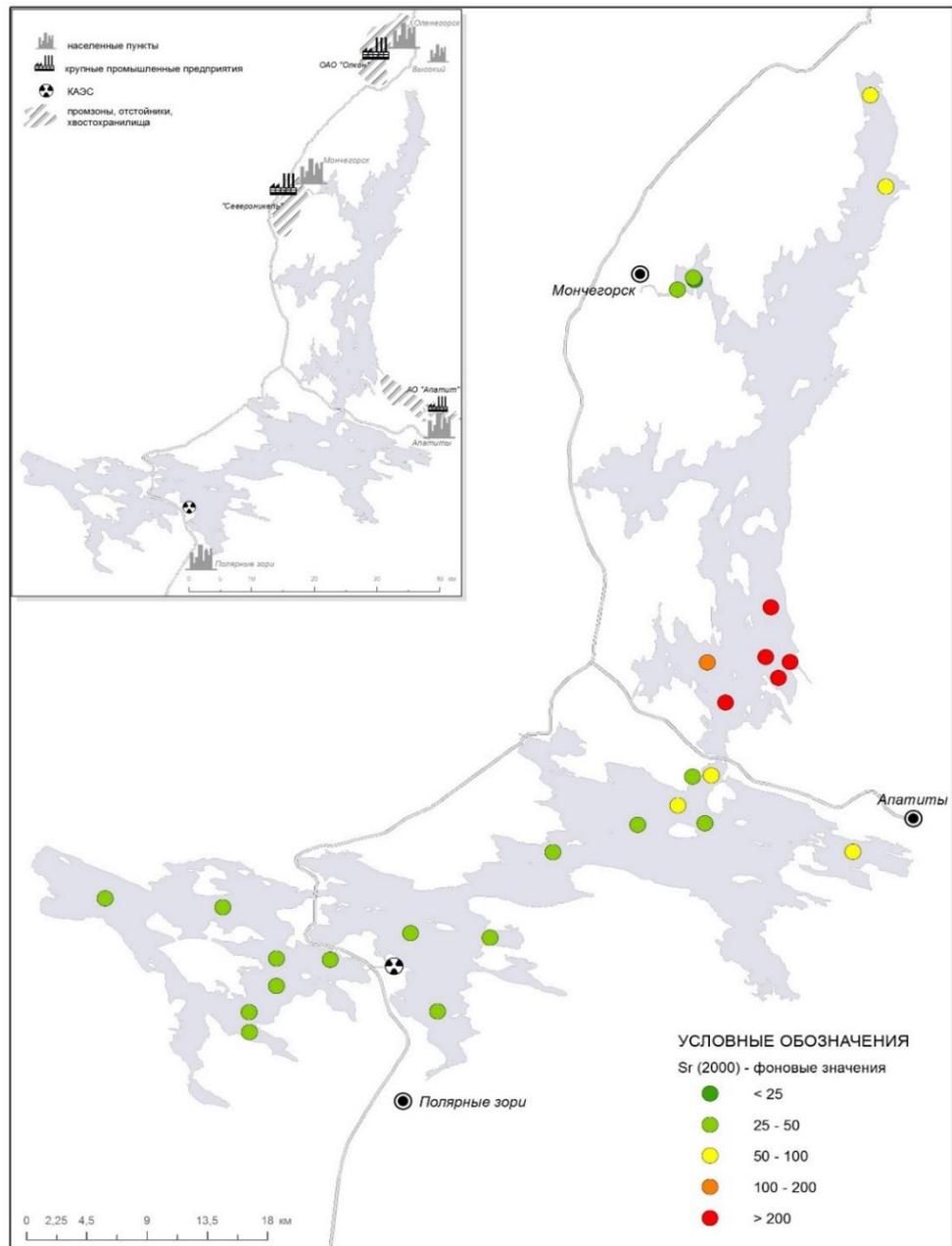


Рис. 4. Фоновые содержания Sr (мкг/г) в ДО оз. Имандра по результатам исследований 2000-х гг.

В Бабинской Имандре отмечено наибольшее среднее содержание Co, Sr, K и Mg в фоновых слоях ДО. Этот плес озера характеризуется наибольшей средней глубиной, на глубине 10–30 м обнаруживаются глины, имеющие плотную консистенцию и серовато-палевую окраску [Рихтер, 1934; Баранов, 1966]. Как известно, глинистые минералы монтмориллонит и хлорит обладают повышенным содержанием Mg, а иллит — K.

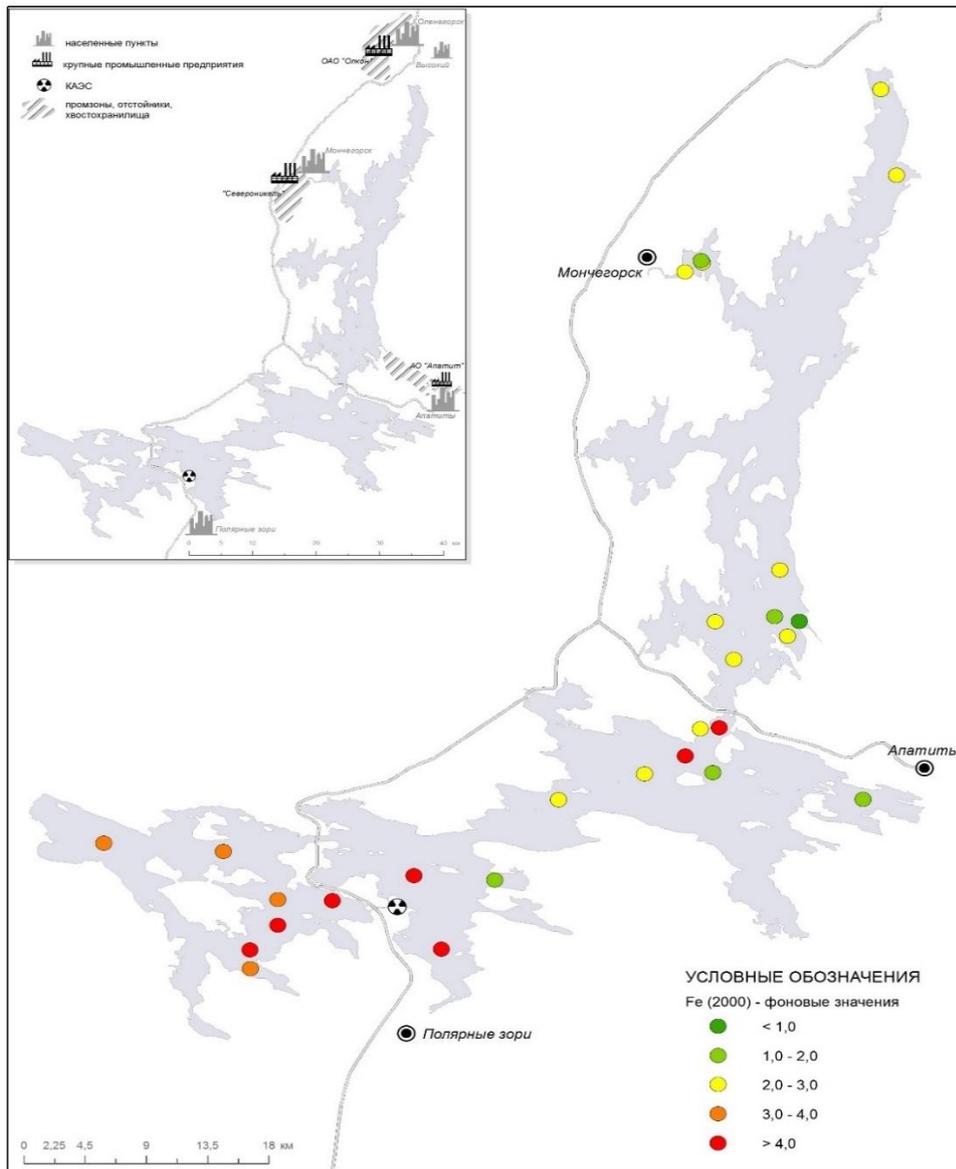


Рис. 5. Фоновые содержания Fe (%) в ДО оз. Имандра по результатам исследований 2000-х гг.

Заключение

При оценке экологического состояния водоемов и исследовании их загрязнения одним из важных вопросов является установление фоновых концентраций элементов в ДО. Определение фонового доиндустриального уровня содержания элементов в оз. Имандра стало возможным только после детальных исследований вертикального распределения концентраций элементов с использованием отбора колонок ДО. Скорость осадконакопления в озерах Северной Фенноскандии (и Мурманской области в том числе) оценивается равной примерно 1 мм в год, а диапазон находится в пределах от 0,3–1,25 мм/год в озерах, аэротехногенно загрязняемых; до 3 мм/год в озерах, подверженных влиянию сточных

вод промышленных предприятий. Длина колонок ДО при исследовании оз. Имандра была, как правило, в диапазоне 20–25 см. Следовательно, можно предположить, что в нижних слоях отобранных колонок ДО должны быть зафиксированы природные фоновые содержания элементов. Определялись содержания ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), а также Al и P в фоновых слоях ДО. В результате использования методов математической статистики (корреляционного и факторного анализов) выявлены две группы элементов: первая группа — ТМ, вторая — щелочные (Na и K) и щелочноземельные (Ca, Mg и Sr) металлы, Al и P. Эти две группы элементов содержатся в повышенных содержаниях в породообразующих минералах горных пород, слагающих водосбор оз. Имандра: первая группа — в северной части водосбора (сульфидные медно-никелевые руды Монче-тундр), вторая группа — в юго-восточной части водосбора (апатитонегелиновые залежи Хибинского щелочного массива). Результаты математической статистики подтвердил анализ территориального распределения фоновых содержаний по акватории оз. Имандра, проведенного по картам с использованием ГИС-технологий. Наибольшие средние содержания ТМ (кроме Co, Pb и As) отмечены в северной части Большой Имандры. В южной части Большой Имандры зафиксированы наибольшие средние содержания Al и P, а также Ca, Na и Sr. Наибольшие средние содержания Mn в фоновых слоях ДО зафиксированы в Йокостровской Имандре, а Fe — в Бабинской Имандре, что связано, скорее всего, с образованием специфических условий для формирования оксидов этих металлов в ДО. В Бабинской Имандре отмечено наибольшее среднее содержание K и Mg в фоновых слоях ДО с повышенным содержанием глинистых минералов с повышенным содержанием этих металлов.

Благодарим О. В. Петрову за изготовление карт. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Закономерности функционирования арктических пресноводных экосистем в условиях изменения климата и усиления антропогенного воздействия» (№ АААА-А19-119041890010-4) и частично поддержана из средств грантов РФФИ Арктика № 18-05-60125 и 18-05-00897.

Литература

- Баранов И. В.* Природные особенности водохранилищ Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Условия обитания, жизнь и промысел. 1966. С. 24–32.
- Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Даувальтер В. А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.
- Даувальтер В. А.* Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореф. ... д-ра геогр. наук. М.: ИВГ РАН, 1999. 52 с.
- Даувальтер В. А.* Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002. № 4. С. 65–73.
- Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П.* Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.* Геоэкология озер Мурманской области. В 3 ч. Ч. 3: Донные отложения водоемов. Мурманск: МГТУ, 2014. 214 с.

Иванов Д. В., Зиганишин И. И., Осмелкин Е. В. Региональные фоновые концентрации металлов в донных отложениях озер Республики Татарстан // Ученые записки Казанского гос. ун-та. 2010. Т. 152, кн. 1. С. 185–191.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П., Ильяшук Б. П., Ильяшук Е. А., Сандимиров С. С., Каган Л. Я., Вандыш О. И., Шаров А. Н., Шарова Ю. Н., Королева И. М. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М: Наука, 2002. 403 с.

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

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

Саит Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Страхов Н. М., Бродская Н. Г., Князева Л. М., Разживина А. Н., Ратеев М. А., Сапожников Д. Г., Шишова Е. С. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 792 с.

Югай В. С., Даувальтер В. А., Каиулин Н. А. Гранулометрический и химический состав донных отложений озер Большой и Малый Вудъявр // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона. Труды IX Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 60-летию ГИ КНЦ РАН (Апатиты, 2–3 апреля 2012 г.) / Ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты: К & М, 2012 а. С. 369–372.

Югай В. С., Даувальтер В. А., Каиулин Н. А. Особенности формирования донных отложений озера Имандра в зоне воздействия сточных вод ОАО «Апатит» // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы IV Всерос. научн. конф. (с междунар. участием). Апатиты: КНЦ РАН, 2012б. Ч. I. С. 264–268.

Янин Е. П. Введение в экологическую геохимию. М.: ИМГРЭ, 1999. 68 с.

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 // Journal of Environmental Monitoring. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.

Förstner U. Metals concentrations in recent lacustrine sediments // Arch. Hydrobiol. 1977. Vol. 80. P. 172–191.

Förstner U., Wittmann G. T. W. Metal Pollution in the aquatic environment. N.Y.: Springer-Verlag, 2nd revised edition. 1981. 486 p.

Gibbs R. Mechanisms of trace metal transport in rivers // Science. 1973. Vol. 180. P. 71–73.

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

Håkanson L. Sediments as indicator of contamination — investigation in the four largest Swedish lakes. Uppsala: SNN RM 835/NLU Rapport 92. 1977. 27 p.

Håkanson, L. Sediment sampling in different aquatic environments: statistical aspects // Water Resour. Res. 1984. Vol. 20, no. 1. P. 41–46.

Kadūnas V., Radzevičius A. Comparative characteristics of change of trace elements background values and associations in Lithuanian surface sediments // Litosfera. 2003. Vol. 7. 80–87.

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

Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S. Trace metal pollution in Eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment // NIVA-Report 41/1996. Oslo, 1996. 18 p.

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.

Turekian K. K., Wedepohl K. H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust // Bull. Geol. Soc. Am. 1961. Vol. 32. P. 175–192.

Guten H. R. von, Sturm M., Moser R. N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations // Environ. Sci. Technol. 1997. Vol. 31. 2193–2197.

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // Geochim. Et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59, no. 7. P. 1221–1232.

Сведения об авторах

Даувальтер Владимир Андреевич

доктор географических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, vladimir@inep.ksc.ru

Кашулин Николай Александрович

доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, nikolay@inep.ksc.ru

Dauvalter Vladimir Andreyevich

D. Sc. (Geography), Chief Researcher of Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Center of RAS, Apatity, vladimir@inep.ksc.ru

Kashulin Nikolay Alexandrovich

D. Sc. (Biology), Chief Researcher of Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Center of RAS, Apatity, nikolay@inep.ksc.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.30-40

УДК 556.552

И. А. Терентьева¹, П. М. Терентьев²

¹Горный институт ФИЦ КНЦ РАН

²Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН

СТРУКТУРА МНОГОЛЕТНЕГО ВОДНОГО БАЛАНСА АНТРОПОГЕННО ПРЕОБРАЗОВАННОГО ВОДОЕМА

Аннотация

Рассмотрена структура многолетнего водного баланса оз. Нюдъявр (Мурманская область). Показано, что основными составляющими в формировании приходной части водного баланса озера является поверхностный приток с территории водосбора и поступающий объем сточных вод. В расходной части баланса исследуемого водоема главным элементом является поверхностный сток через р. Нюдауй. Определена роль природных и сточных вод в процессе формирования гидрохимического и гидрологического режима оз. Нюдъявр за период 1966-2015 г. Отмечена положительная динамика по снижению составляющей сточных вод в приходной части водного баланса водоема. Согласно рассчитанному коэффициенту условного водообмена, исследуемое озеро относится к умеренно проточному водоему сезонного регулирования.

Ключевые слова:

озеро Нюдъявр, водный баланс, атмосферные осадки, испарение, поверхностный приток и сток, подземный приток и сток, коэффициент условного водообмена.