

УДК 624.131.41

В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин

Изменение концентраций никеля и меди в поверхностных слоях донных отложений оз. Имандра за последние полвека

V.A. Dauvalter, N.A. Kashulin

Changes in concentrations of nickel and copper in the surface layers of sediments of the Lake Imandra the last half century

Аннотация. Проведен анализ содержания приоритетных для региона загрязняющих тяжелых металлов Ni и Cu в поверхностных слоях донных отложений крупнейшего водоема Мурманской области озера Имандра. Установлено постоянное увеличение содержания Ni и Cu по всей акватории озера за период исследований, вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса (Большая и Йокостровская Имандры), так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений (Бабинская Имандра). Наибольшее увеличение содержания отмечено в Монче-губе плеса Большая Имандра – до 3 и 0.6 % для Ni и Cu соответственно в последние годы.

Abstract. The analysis of the content of the polluting heavy metals Ni and Cu, priority for the region, in surface layers of sediments of the Lake Imandra, the largest reservoir of Murmansk region, has been carried out. The constant increase in the contents of Ni and Cu on all water area of the lake during researches has been determined owing to as direct intake of sewage of the enterprises of mining and metallurgical complex (Bolshaya and Yokostrovskaya Imandra), and aerial pollution of lake watershed and wind-induced currents (Babinskaya Imandra). The largest increase in the contents is noted in the Monche Bay of the Big Imandra up to 3 and 0.6 % for Ni and Cu respectively in the last years.

Ключевые слова: никель, медь, озеро, донные отложения, озеро Имандра, Мурманская область
Key words: nickel, copper, lake, sediments, the Lake Imandra, Murmansk Region

1. Введение

Озеро Имандра расположено в Мурманской области, на крайнем северо-западе Европейской территории России, в глубокой депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря и отделяет Кольский п-ов от материковой части (Атлас..., 1971). Морфометрические характеристики озера (по Рихтеру, 1926) указаны на рис. 1. Озеро состоит из трех, в значительной мере обособленных, плесов: Большой, Йокостровской и Бабинской Имандры, соединяющихся между собой узкими проливами – салмами.

На водосборе озера расположены и производят продукцию крупнейший комбинат по добыче и переработке апатито-нефелиновых руд (ОАО "Апатит", 1929), медно-никелевое плавильное (комбинат "Североникель", 1938) и железорудное (ОАО "Олкон", 1955) производства, построена Кольская атомная электростанция (1973) на прямой системе охлаждения, проживает около 300 тыс. человек, что составляет третью часть от всего населения Мурманской области. Все промышленные предприятия с начала своей деятельности сбрасывали в озеро сточные воды. Одновременно с промышленными отходами в одни и те же участки озера ежедневно поступает порядка 100 тыс. м³ коммунальных стоков городов и поселков, что приводит к параллельному с токсичным загрязнением эвтрофированию водоема (Моисеенко и др., 2002). На всех промышленных предприятиях усовершенствуется технология производства продукции, проводятся мероприятия по снижению количества сточных вод и загрязняющих веществ в их составе. На ОАО "Апатит" в 1978 г. был введен 80%-й водооборот, на ОАО "Олкон" с 1975 г. действует 100%-е оборотное водоснабжение, на комбинате "Североникель", начиная с 70-х гг. прошлого столетия, вводится ряд очистных сооружений и оборотных систем водоснабжения. Но, несмотря на эти меры, загрязняющие вещества постоянно и периодически (во время аварийных сбросов) продолжают поступать в оз. Имандра.

Целью статьи является исследование динамики содержания загрязняющих веществ в поверхностных слоях донных отложений (ДО) оз. Имандра как депонирующей эти вещества среды на примере приоритетных для озера и Мурманской области в целом загрязняющих тяжелых металлов (ТМ) Ni и Cu на основе исследований химического состава ДО озера за последние полвека.

2. Объекты и методы исследований

Плес Большая Имандра является наиболее загрязненным из трех плесов озера (Моисеенко и др., 2002), потому что в него сбрасываются сточные воды всех горно-металлургических предприятий (комбината

"Североникель", ОАО "Апатит", ОАО "Олкон"), расположенных на берегах озера, а также коммунально-бытовые сточные воды самых крупных городов (Апатиты, Кировск, Мончегорск) водосбора озера. Одними из основных загрязняющих озеро элементов являются никель и медь, преобладающие загрязняющие тяжелые металлы (ТМ) для Мурманской области в целом. Комбинат "Североникель" является главным источником загрязнения ТМ оз. Имандра. Эти металлы также в повышенных концентрациях сбрасываются в составе сточных вод предприятий и населенных пунктов (Моисеенко и др., 1996; 2002). Значительную долю в загрязнение озера вносят также и атмосферные выбросы промышленных предприятий. Большая часть ТМ, входящих в состав выбросов и стоков, связывается и захоранивается в донных отложениях (ДО) водоема (Даувальтер, 2012). В Монче-губу непосредственно сбрасываются сточные воды комбината "Североникель", поэтому ДО этого залива озера являются наиболее загрязненными ТМ, в том числе и Ni и Cu. Объединения "Апатит" и "Олкон" также в больших количествах сбрасывают загрязняющие вещества, в том числе и ТМ, в плес Большая Имандра. Далее загрязняющие вещества распространяются со стоковыми течениями в плес Йокостровская Имандра. Плес Бабинская Имандра подвержен в основном аэротехногенному загрязнению, хотя для охлаждения агрегатов Кольской АЭС забирается более загрязненная вода из губы Глубокая Йокостровской Имандры и сбрасывается в подогретом на 10-12 °С состоянии в менее загрязненную Молочную губу Бабинской Имандры. Таким образом, в акватории, близкой к месту сброса подогретых вод, происходит не только тепловое, но и химическое загрязнение.

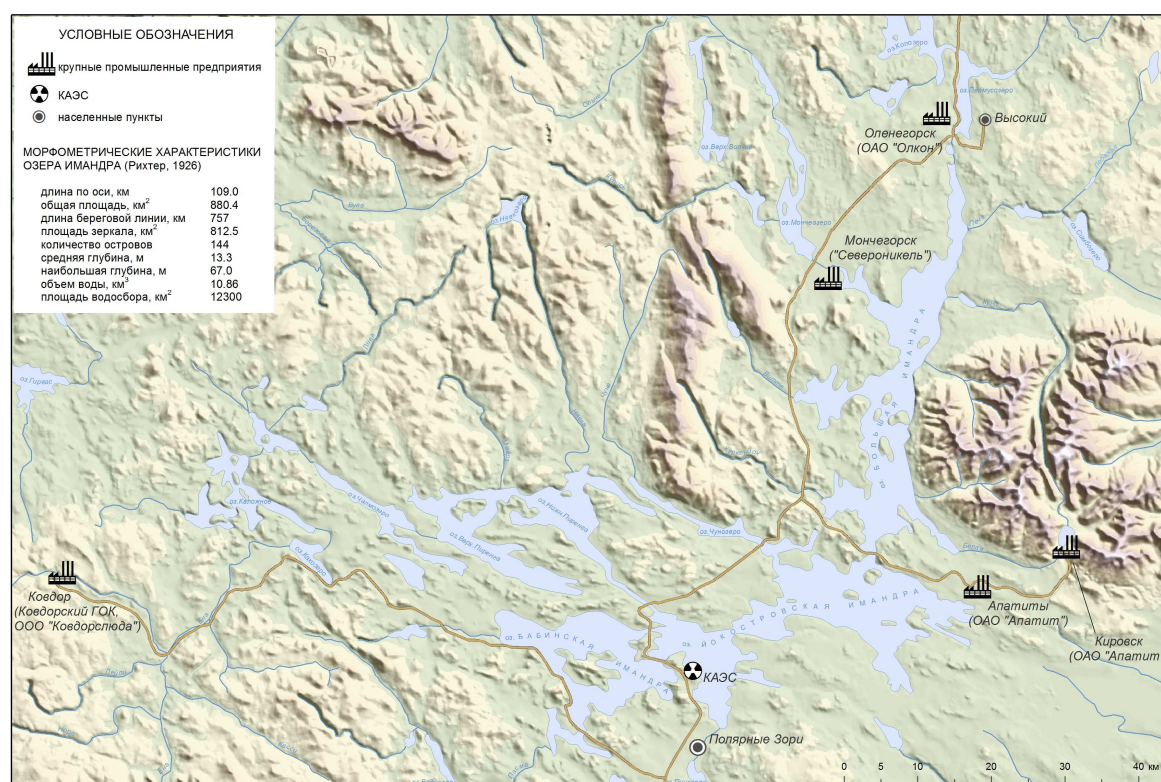


Рис. 1. Карта-схема водосбора оз. Имандра с главными источниками загрязнения

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 Имандры, 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.

В первой половине 1970-х гг. сотрудниками Кольского филиала АН СССР были продолжены исследования других акваторий оз. Имандра – Йокостровской и Бабинской Имандры (*Чижиков и др.*, 1976; *Чижиков*, 1980). В отличие от предыдущих исследований пробы ДО отбирались трубками-грунтоносами, для химического анализа (спектральным полуколичественным методом) отбирались

верхние 2-14 см слои ДО, следовательно, можно надеяться, что картина распределения содержаний 25 элементов, включая тяжелые металлы (ТМ), отображена более достоверно, чем в предыдущих исследованиях Большой Имандры (Беляева и др., 1971).

Детальные исследования химического состава ДО оз. Имандра проводятся сотрудниками лаборатории водных экосистем со времени организации ИППЭС КНЦ РАН в 1989 г. За прошедшие с момента образования института годы было опубликовано более двух десятков научных работ, в том числе монографий, статей в центральной печати, описывающих химический состав ДО озера (например, монографии *Моисеенко и др.*, 1996; 1997; 2002; *Даувальтер*, 2012; *Даувальтер, Кацулин*, 2014).

При написании статьи, помимо результатов исследований 60-70-е гг. прошлого века (Беляева и др., 1971; Чижиков и др., 1976; Чижиков, 1980), использовались материалы исследований ДО оз. Имандра за последние четверть века, когда после организации ИППЭС КНЦ РАН исследования ДО проводились по единой методике, с отбором колонок ДО и анализом их атомно-абсорбционными методами, что позволило четко разделить антропогенную и природную составляющие содержания элементов в отложениях озера. Материалы ИППЭС КНЦ РАН были разделены на исследования 90-х гг. прошлого века и 2000-х гг. В 90-е гг. основная часть результатов была получена во время съемки озера 1993 г., которые отражены в монографиях (*Моисеенко и др.*, 1996; 2002), а в 2000-х гг. в основу положены съемки озера на акваториях влияния деятельности горно-металлургических предприятий и атомной энергетики – комбината "Североникель" (2007 г.), ОАО "Олкон" (2010 г.), Кольской АЭС (2011 г.) и ОАО "Апатит" (2012 г.). Использовались также результаты мониторинга на биостанции в Йокостровской Имандре, а также единичные отборы колонок ДО на других станциях озера (*Моисеенко и др.*, 1997). Всего сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН за последние четверть века было отобрано и проанализировано около 60 колонок ДО оз. Имандра для определения физических характеристик (влажность и потери при прокаливании) и содержания элементов.

При выборе мест отбора колонок ДО основное внимание уделялось акваториям, куда непосредственно поступают сточные воды предприятий: комбинат "Североникель" – Монче-губа, Оленегорский ГОК – Куреньга губа, АО "Апатит" – Белая губа и южная часть Большой Имандры, Африкандское рудоуправление – Зашеечная губа, Кольская АЭС – Молочная губа и восточная часть Бабинской Имандры. Акватория западной части Бабинской Имандры (Уполокша и Камка губы) рассматривалась как относительно незагрязненная, не подверженная непосредственному влиянию сточных вод, хотя водосбор этой части озера испытывает атмосферное загрязнение.

Образцы ДО брались отборником колонок открытого гравитационного типа, изготовленного из плексигласа (внутренний диаметр 44 мм), с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник сделан по образцу, разработанному Скогхеймом (*Skogheim*, 1979), позволяющему транспортировать колонки в лабораторию либо в полевой лагерь ненарушенными для дальнейшего использования. Колонки ДО были послойно разделены на слои по 1 см, помещены в предварительно помытые кислотой полиэтиленовую посуду и отправлены в лабораторию для анализа.

Образцы (примерно 5 г) высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 6 часов, определялась влажность образца (*Håkanson*, 1980). Затем образцы прокаливались в муфельной печи при температуре 450-500 °С в течение 4 часов для определения потерь при прокаливании (ППП) как косвенного показателя содержания органического вещества. Образцы далее растирались в яшмовой ступе и сохранялись при температуре 4 °С до химического анализа.

Для определения валовых концентраций Ni и Cu высушенная при 105 °С навеска образца массой 0.2 г обрабатывалась 4 мл концентрированной азотной кислотой (HNO₃) класса ОСЧ в автоклаве с тефлоновым вкладышем при температуре 140 °С в течение 4 часов. Содержимое автоклава потом охлаждалось до комнатной температуры, 2 мл аликвота перемещалось в 60 мл пластиковую бутылочку и разбавлялось деионизированной водой до объема 25 мл. Результирующий раствор анализировался методом атомной абсорбции с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Perkin-Elmer-360 в пламени пропан-бутан-воздух. Концентрации Ni и Cu выражены в микрограммах на грамм (мкг/г) сухого веса.

3. Результаты и их обсуждение

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. Скорость осадконакопления в озерах Северной Фенноскандии и Мурманской области оценивается равной примерно 1 мм в год, а диапазон находится в пределах от 0.3 до 1.25 мм/год в озерах, аэротехногенно загрязняемых (*Norton et al.*, 1996; *Rognerud et al.*, 1993), 1.5-3 мм/год в озерах, загрязняемых стоками промышленных предприятий, например, Куэтсъярви (*Даувальтер*, 2002; *Dauvalter*, 2003). Сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН осуществлялся отбор колонок длиной 20-25 см. Следовательно, можно предположить, что в нижних слоях отобранных колонок ДО должны быть

зафиксированы природные фоновые содержания ТМ, в том числе и Ni и Cu. Колонки ДО отбирались только в последние четверть века, поэтому есть возможность определить фоновые концентрации элементов только по результатам исследований последних лет. В табл. 1 показаны величины фоновых концентраций для Ni и Cu по результатам исследований 1990-х (Моисеенко и др., 2002) и 2000-х гг. (современные исследования). Средние фоновые содержания Ni и Cu по результатам последних исследований несколько ниже, что связано, возможно, с более совершенным оборудованием в последние годы и более точным определением концентраций при малых их величинах. По результатам исследований ИППЭС КНЦ РАН за последние четверть века можно принять за фоновые содержания Ni и Cu величины 50 и 45 мкг/г соответственно, которые будут использоваться в статье при определении интенсивности антропогенной нагрузки на озеро.

Таблица 1. Минимальные (Мин), максимальные (Макс) и средние (Средн) фоновые концентрации Ni и Cu (мкг/г) в ДО оз. Имандра

Годы	Ni			Cu		
	Мин	Макс	Средн	Мин	Макс	Средн
1993-1998 ¹	29	115	53	29	120	51
2007-2012 ²	21	105	45	13	67	38

Примечание: ¹ – Моисеенко и др., 2002, ² – исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет.

В табл. 2 приведены содержания Ni и Cu в поверхностных слоях ДО оз. Имандра за последние полвека по результатам исследований различных лет, которые указаны в примечание к таблице. Данные разбиты по плесам озера. Показаны также концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО Монче-губы и Белой губы плеса Большая Имандра, т.е. акваторий, в которые поступают стоки основных загрязняющих озеро промышленных предприятий – комбината "Североникель" и ОАО "Апатит" соответственно.

Таблица 2. Минимальное (Мин), максимальное (Макс) и среднее (Средн) содержание Ni и Cu (мкг/г) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Годы	Ni			Cu		
		Мин	Макс	Средн	Мин	Макс	Средн
Большая Имандра ¹	1966-1968	30	3000	300	30	3000	300
Монче-губа ²	1983-1985	80	12400	5200	13	2100	550
Белая губа ²	1983-1985	20	700	100	30	50	44
Большая Имандра ³	1993-1998	77	15940	3431	42	2900	778
Монче-губа ³	1993-1998	3942	15940	9270	1386	2900	1965
Белая губа ³	1993-1998	560	1093	787	294	380	332
Большая Имандра ⁴	2007-2012	506	30210	7015	221	5962	1575
Монче-губа ⁴	2007-2012	14544	30210	22437	4221	5962	4961
Белая губа ⁴	2007-2012	506	1590	989	221	391	299
Йокостровская и Бабинская Имандра ⁵	1971-1975	13	2000	160	15	150	68
Йокостровская Имандра ²	1983-1985	10	300	180	10	31	22
Йокостровская Имандра ³	1993-1998	54	1212	687	12	318	189
Йокостровская Имандра	2007-2012	135	1420	766	75	296	203
Бабинская Имандра ⁶	1983-1985	90	115	100	20	24	20
Бабинская Имандра ³	1993-1998	88	231	152	52	116	84
Бабинская Имандра ⁴	2007-2012	130	300	212	77	150	118

Примечание: ¹ – Беляева и др., 1971, ² – Крючков, Моисеенко, 1987, ³ – Моисеенко и др., 2002, ⁴ – исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет, ⁵ – Чижиков и др., 1976, Чижиков, 1980, ⁶ – Моисеенко, Яковлев, 1990.

Поступление Ni и Cu, также как и других ТМ, в оз. Имандра связано в основном с деятельностью металлургического комбината "Североникель" и других горнодобывающих и обогащательных предприятий. При производстве этих двух металлов на комбинате "Североникель" используются одни и те же Cu-Ni руды как местные (месторождения Мончегорского и Печенгского районов Мурманской области), так и привозные (из Норильского региона, начиная с 60-х гг., а с 1973 г. в производстве в основном стала использоваться высокосернистая (содержащая до 30 % серы) руда Норильского ГОКа). Отличие этих двух приоритетных для региона загрязняющих ТМ состоит в путях их поступления в водоем. Согласно оценке баланса поступления и выноса ТМ в оз. Имандра (Моисеенко, 1992; Даувальтер и др., 2012), поступление Ni в составе сточных вод в 8 раз превышает объем поступлений с территории водосбора (т.е. в виде аэротехногенных выпадений), в то время как для Cu отмечена другая картина –

с водосбора этого элемента поступило в 7.5 раз больше, чем в составе сточных вод. Максимальное поступление Ni в составе сточных вод комбината "Североникель" (также как и максимальное производство Ni) получено в начале 80-х гг. и достигало более 400 т/год (Моисеенко и др., 2002). Сброс Ni со сточными водами комбината "Североникель" в последние четверть века после распада СССР и снижения производства резко снизился со 150 т/год в 1991 г. до 10 т/год в последние годы (официальный сайт Кольской ГМК <http://kolagmk.ru/>). Сброс Cu за это же время снизился с 7 до 2 т/год. Выбросы Ni и Cu в атмосферу с комбината за это время также резко сократились – с 2400 до 500 т/год и с 1600 до 600 т/год соответственно.

Содержание Ni в поверхностных слоях ДО в загрязняемой в то время Монче-губе Большой Имандры в конце 60-х гг. не превышало 3000 мкг/г (0.3 %) (табл. 2, рис. 2, *Беляева и др.*, 1971), и в среднем в этом плесе озера содержание Ni составляло 300 мкг/г, т.е. в 6 раз больше среднего фоновое значения (табл. 1). Как было сказано выше, пробы ДО в это время отбирались дночерпателем и анализировались полуквантитативным спектральным анализом, поэтому, вероятно, определяемые содержания были занижены, т.к. для анализа отбирался слой ДО минимум 10 см, а к моменту отбора проб не мог сформироваться слой загрязненных отложений такой мощности. По направлению к южной части плеса содержание Ni снижалось до 200-300 мкг/г, с минимальным значением 30 мкг/г (табл. 2, рис. 2). В Йокостровской и Бабинской Имандре в начале 70-х гг. содержание Ni находилось в диапазоне от 13 до 2000 мкг/г, в среднем составляя 160 мкг/г (*Чижиков и др.*, 1976). Таким образом, вниз по стоковому течению из озера концентрации этого металла снижались в среднем в 2 раза.

В начале 80-х гг., т.е. в годы максимального поступления в озеро Ni в составе сточных вод комбината "Североникель", его концентрации в ДО Монче-губы резко возросли до среднего значения 5200 мкг/г (0.5 %), что более чем в 100 раз больше среднего фоновое значения, и находились в диапазоне от 80 до 12400 мкг/г (табл. 2, *Крючков, Моисеенко*, 1987), т.е. в наиболее загрязненных акваториях содержание Ni в ДО было сопоставимо с содержанием этого металла в кондиционной руде. В ДО Белой губы происходило значительное уменьшение концентраций Ni до среднего значения 100 мкг/г (в 2 раза превышает фоновое содержание), диапазон – 20-700 мкг/г (табл. 2, *Крючков, Моисеенко*, 1987). В Йокостровской и Бабинской Имандре средние содержания Ni в эти годы также значительно ниже, чем в Монче-губе – 180 и 150 мкг/г соответственно (диапазон значений 10-300 и 88-230 мкг/г, *Крючков, Моисеенко*, 1987; *Моисеенко, Яковлев*, 1990).

Несмотря на значительное снижение поступления Ni в окружающую среду, в том числе и в оз. Имандра, в составе сточных вод и атмосферных выбросов комбината "Североникель" в 90-е гг. происходило дальнейшее увеличение содержания Ni в поверхностном 1-см слое ДО (именно с этого времени начался отбор колонок ДО с выделением поверхностного сантиметрового слоя). Так, в Монче-губе среднее содержание этого металла практически достигло 1 %, а диапазон значений от 0.4 до 1.6 % (табл. 2, рис. 3). Высокие концентрации Ni (более 2000 мкг/г) были отмечены в северной части Большой Имандры (губах Куреньга и Пече), куда загрязнение из Монче-губы могло поступать ветровыми и компенсационными течениями, а также со стоками ОАО "Олкон". В средней части Большой Имандры содержание металла снижается до 80 мкг/г, что, вероятно, связано с тем, что эта часть озера довольно узкая, здесь повышаются скорости стоковых течений, особенно вблизи островов, создаются неблагоприятные условия для седиментации тонкодисперсных взвешенных частиц, обладающих наибольшей сорбционной способностью. Эта часть озера является транзитной зоной для миграции загрязняющих веществ, в том числе и ТМ, вниз по стоковому течению. Повышение содержания по сравнению с 80-ми гг. прошлого века до средних значений 800 мкг/г (диапазон 560-1100 мкг/г) 90-х гг. зафиксировано в Белой губе, также как и Большой Имандре в целом – среднее содержание 3400 мкг/г, диапазон – 80-16000 мкг/г. В Йокостровской Имандре также произошло значительное увеличение содержания Ni до среднего значения около 700 мкг/г (диапазон 54-1200 мкг/г). В Большой Имандре перед Йокостровским проливом замедляется течение воды, и при более спокойной гидродинамической обстановке происходит осаждение взвешенного материала, содержащего большое количество загрязняющих веществ, в том числе и ТМ. Разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, относительно более чистыми притоками, втекающими в Йокостровскую Имандру, приводит к некоторому снижению здесь содержания Ni в поверхностных ДО вниз по стоковому течению. В Бабинской Имандре концентрации увеличились по сравнению с 80-ми гг. в среднем в полтора раза – до среднего значения 150 мкг/г (диапазон 90-230 мкг/г).

В последнее десятилетие содержания Ni в поверхностном слое ДО озера продолжают повышаться (табл. 2, рис. 4). В Монче-губе они в среднем достигли более 2 %, что в 400 раз больше фоновое содержание. По сути, ДО Монче-губы превратились в техногенную залежь, которую можно пускать в передел на комбинате для получения Ni (диапазон содержания 1.5-3 %, что выше, чем в кондиционной руде).

Подобная картина большого увеличения содержания ТМ в ДО по сравнению с фоновыми значениями отмечена в оз. Кор Д'Ален, США (*Horowitz et al.*, 1993; 1995), загрязняемое промышленными

стоками свинцово-цинковых рудников, где концентрации Pb достигают 2.75 % (в 833 раза больше фоновых значений), Zn – 1.4 % (в 118 раз больше фоновых значений), Cu – 0.07 % (в 22 раза больше фоновых значений).

В воде концентрации Ni в Монче-губе в настоящее время также самые высокие в озере – выше 15 мкг/л, что говорит о продолжающемся загрязнении озера комбинатом "Североникель". В северной части Большой Иmandры отмечено некоторое снижение содержания Ni до 1 500 мкг/г, что связано, вероятно, с уменьшением загрязнения со стороны ОАО "Олкон". В средней части Большой Иmandры ДО не отбирались, потому что по результатам исследований 90-х гг. было обнаружено, что эта часть озера является транзитной зоной. В Белой губе и прилегающей к ней акватории отмечено увеличение концентраций Ni по сравнению с 90-ми гг. до среднего значения 1 000 мкг/г (диапазон 500-1 600 мкг/г), что говорит об увеличении поступления этого элемента в составе сточных вод, в том числе и коммунально-бытовых из городов Апатиты и Кировск. Среднее содержание Ni в Йокостровской Иmandре в 2000-х гг. по сравнению 90-ми гг. немного повысилось до 776 мкг/г (диапазон значений 135-1 420 мкг/г). По сравнению с 90-ми гг. колонки ДО отбирали не только в открытой части плеса, но и в мелководных, довольно закрытых от поступления загрязненных ТМ стоковых течений, губах Тик и Княжая. В Бабинской Иmandре также зафиксировано увеличение содержания Ni до среднего 212 мкг/г (диапазон 130-300 мкг/г). Увеличение среднего содержания Ni в поверхностных ДО всех плесов Иmandры за последние годы отражает общую тенденцию кумулятивного накопления загрязняющих веществ на территории водосбора и в самом озере за период деятельности промышленных предприятий на берегах озера и общего усиления антропогенной нагрузки на его экосистему. Этот эффект был отмечен также в ДО водоемов северо-западной части Мурманской области и приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией (Даувальтер и др., 2012).

Поступление Cu в оз. Иmandра, как уже было сказано, связано в основном с деятельностью металлургического комбината "Североникель" – атмосферными выбросами и сбросом сточных вод в Монче-губу. В конце 60-х гг. максимальные содержания Cu (более 0.22 % или 2 200 мкг/г) были отмечены в губах Куреньга, Пече и Коим, т.е. не в месте поступления сточных вод комбината "Североникель" (рис. 5, *Беляева и др.*, 1971). Это связано, вероятно, с поступлением сточных вод Оленегорского ГОКа, а также с компенсационными и нагоновыми течениями, перемещающими загрязненные воды из Монче-губы в северную оконечность Большой Иmandры. В Монче-губе в это время концентрации Cu находились в пределах от 300 до 800 мкг/г, а в Белой губе они снижались до значений менее 300 мкг/г. В целом в Большой Иmandре содержания Cu в поверхностных слоях ДО находились в диапазоне от 30 до 3 000 мкг/г, в среднем составляя 300 мкг/г, т.е. примерно на порядок превышая фоновое значение. В 70-е гг. в Йокостровской и Бабинской Иmandре среднее содержание Cu составляло 70 мкг/г (около 2 фоновых значений), а диапазон содержаний 15-150 мкг/г (табл. 2, *Чижиков и др.*, 1976). Можно сказать, что уже в эти годы было зафиксировано довольно сильное влияние горно-металлургических комбинатов на содержание Cu, особенно в северной части Большой Иmandры.

В 80-е гг. содержание Cu в Монче-губе находилось в пределах от 13 до 2 100 мкг/г (в среднем составляя 550 мкг/г, *Крючков, Моисеенко*, 1987), т.е. максимальные содержания значительно увеличились по сравнению с 60-ми гг. В Белой губе в 80-е гг. содержания Cu соответствовали фоновым значениям, а в Йокостровской и Бабинской Иmandре концентрации Cu в среднем были в 2 раза меньше фоновых значений (*Крючков, Моисеенко*, 1987).

Резкое увеличение содержания Cu было отмечено в 90-е гг. Так, в Монче-губе в это время среднее содержание Cu выросло до 2 000 мкг/г (диапазон 1 400-2 900 мкг/г, рис. 6, табл. 2, *Моисеенко и др.*, 2002), что почти в 50 раз больше фонового значения. В северной части Большой Иmandры наоборот отмечено уменьшение концентраций Cu до 240-580 мкг/г по сравнению с содержаниями этого металла в 60-х гг. В Белой губе и прилегающей к ней акватории зафиксировано, также как и в Монче-губе, значительное увеличение (практически на порядок) содержания Cu до среднего значения 330 мкг/г (диапазон 290-380 мкг/г). В Большой Иmandре в целом содержание металла по сравнению с 60-ми гг. увеличилось более чем в 2 раза – среднее значение 780 мкг/г, диапазон 42-2 900 мкг/г, что говорит об увеличении его поступления в первую очередь в составе сточных вод и атмосферных выбросов комбината "Североникель" особенно в 80-е гг., когда производство и сбросы Cu достигли максимальных значений (*Моисеенко и др.*, 2002). В Йокостровской и Бабинской Иmandре также произошло довольно значительное увеличение концентраций Cu до средних значений 190 и 84 мкг/г, что соответственно на порядок и в 4 больше, чем в 80-е гг.

Увеличение содержания Cu в поверхностном 1-см слое ДО Большой Иmandры продолжилось в 2000-е гг. Концентрации Cu там находятся в диапазоне от 220 до 6 000 мкг/г, в среднем составляя 1 600 мкг/г (рис. 7, табл. 2). В Монче-губе содержание Cu максимально – 4 200-6 000 мкг/г, в среднем 0.5 %, что более чем в 100 раз больше фоновых значений. В северной части Большой Иmandры концентрации Cu находились в диапазоне от 260 до 310 мкг/г (рис. 7). Содержание Cu в Белой губе немного снизилось по сравнению с 90-ми гг. до средней величины 300 мкг/г (диапазон 220-390 мкг/г).

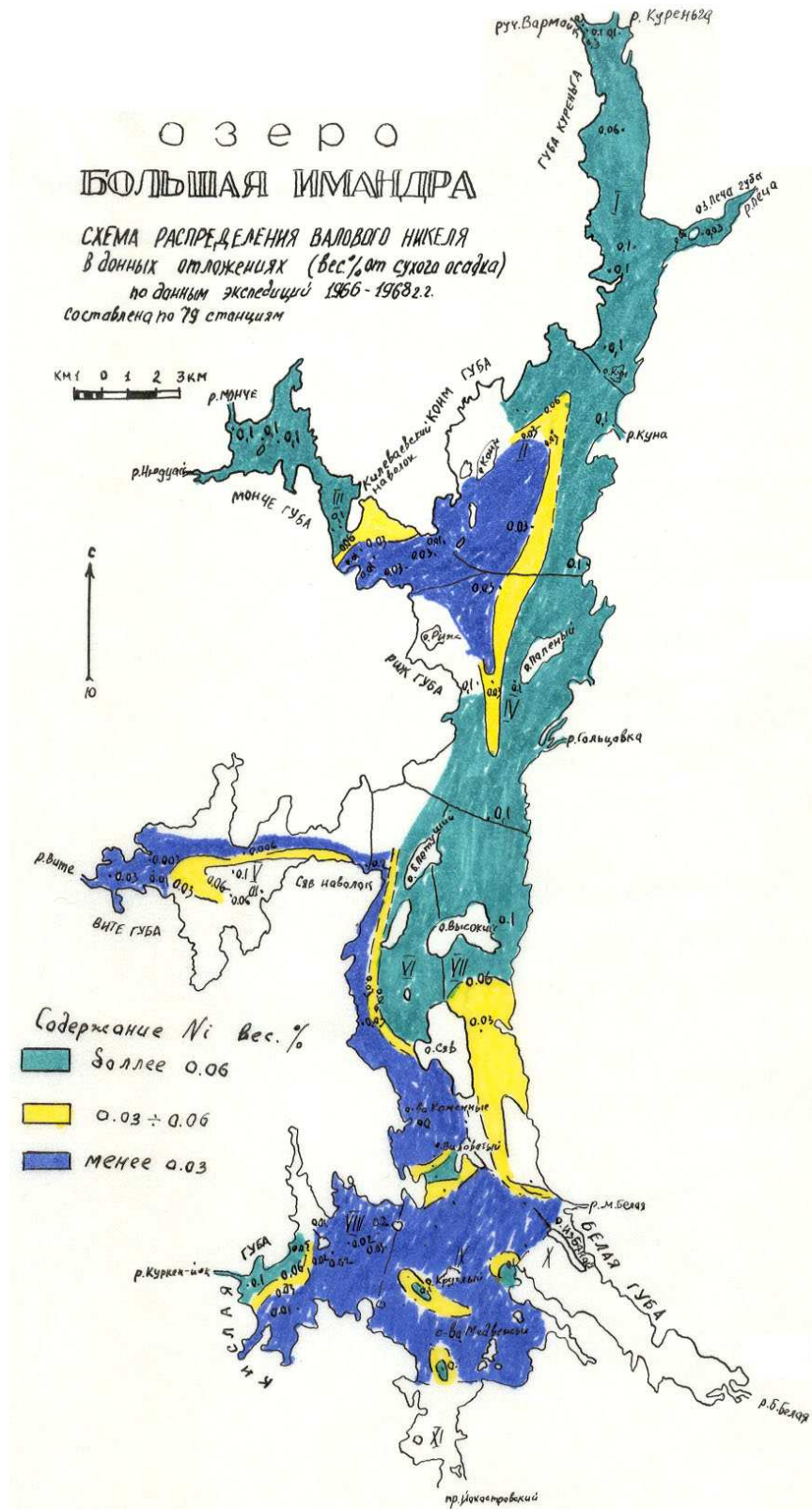


Рис. 2. Распределение содержания Ni (%) в ДО Большой Имандры по данным экспедиций 1966-1968 гг.

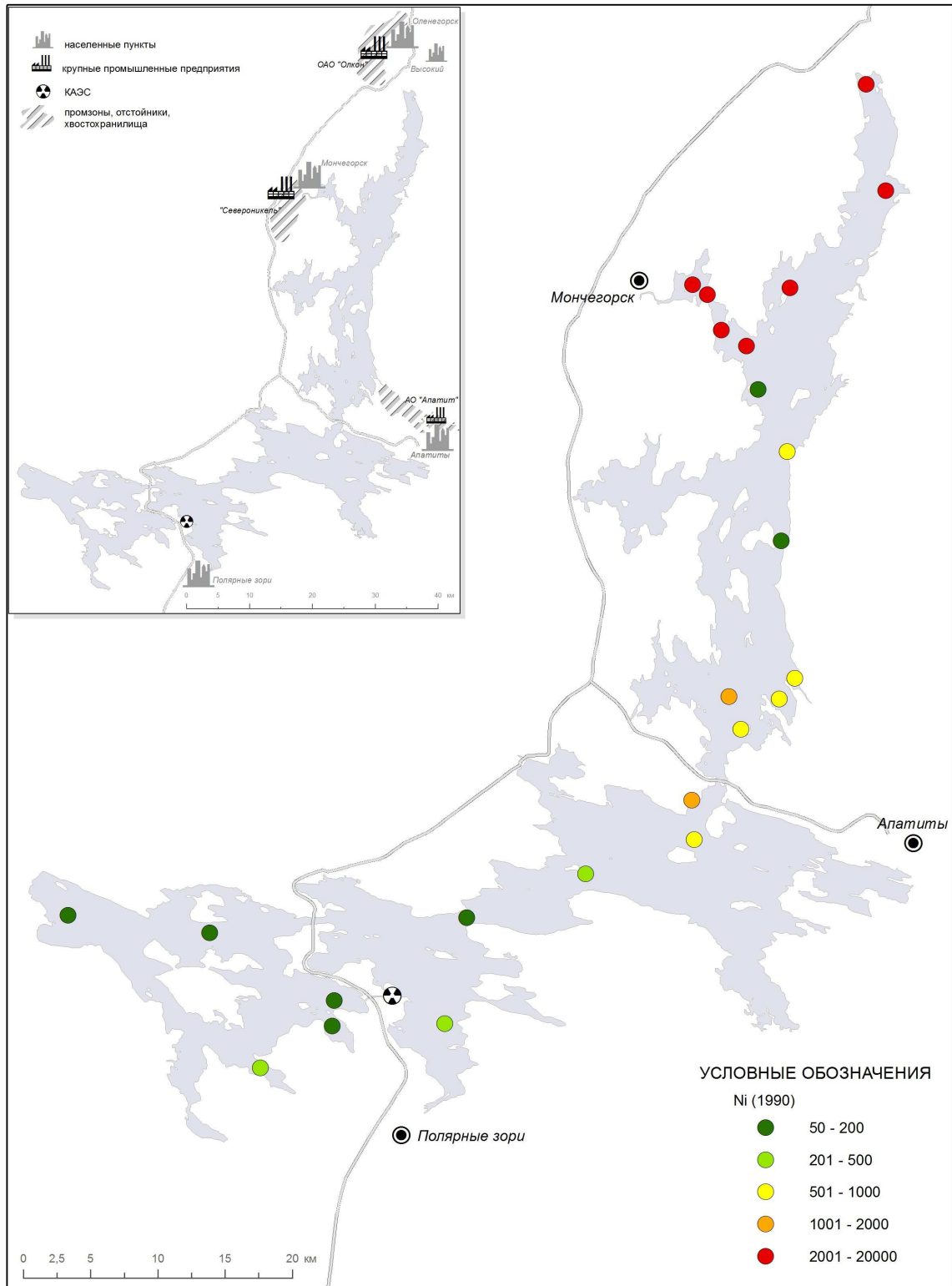


Рис. 3. Распределение содержания Ni (мкг/г) в ДО оз. Имандры по данным экспедиций 1993-1998 гг.

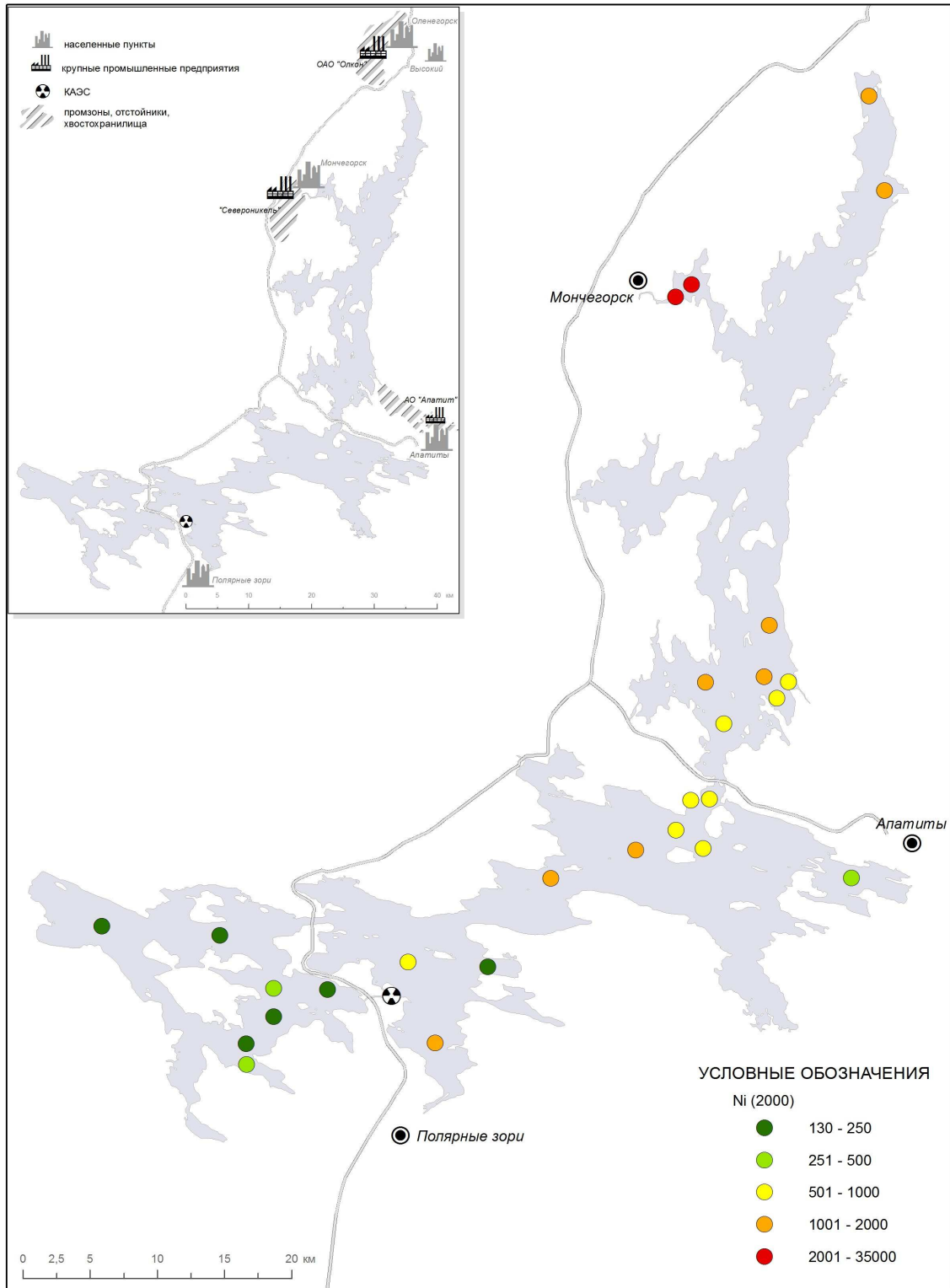


Рис. 4. Распределение содержания Ni (мкг/г) в ДО оз. Имандры по данным экспедиций 2007-2012 гг.

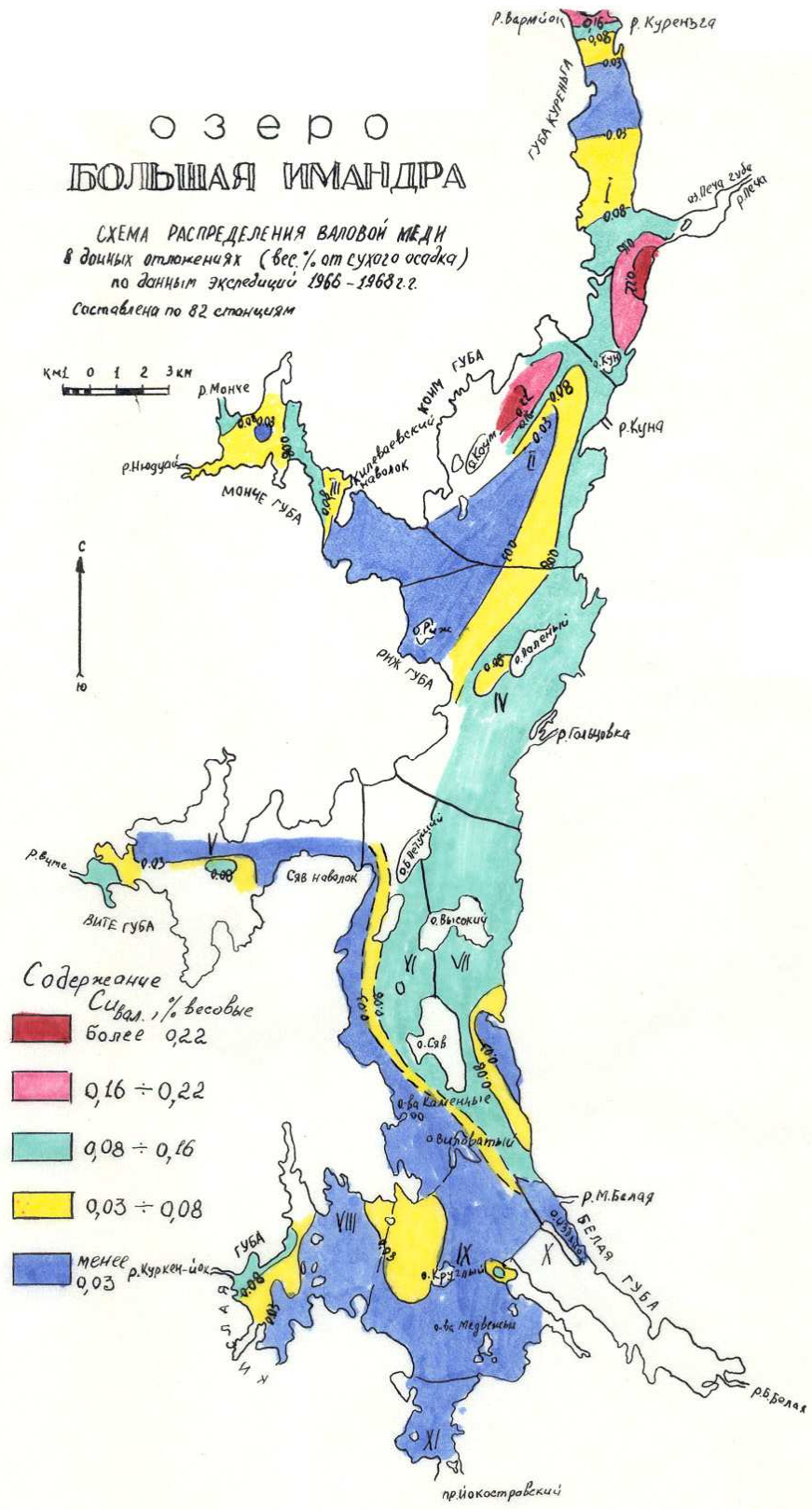


Рис. 5. Распределение содержания Cu (%) в ДО Большой Имандры по данным экспедиций 1966-1968 гг.

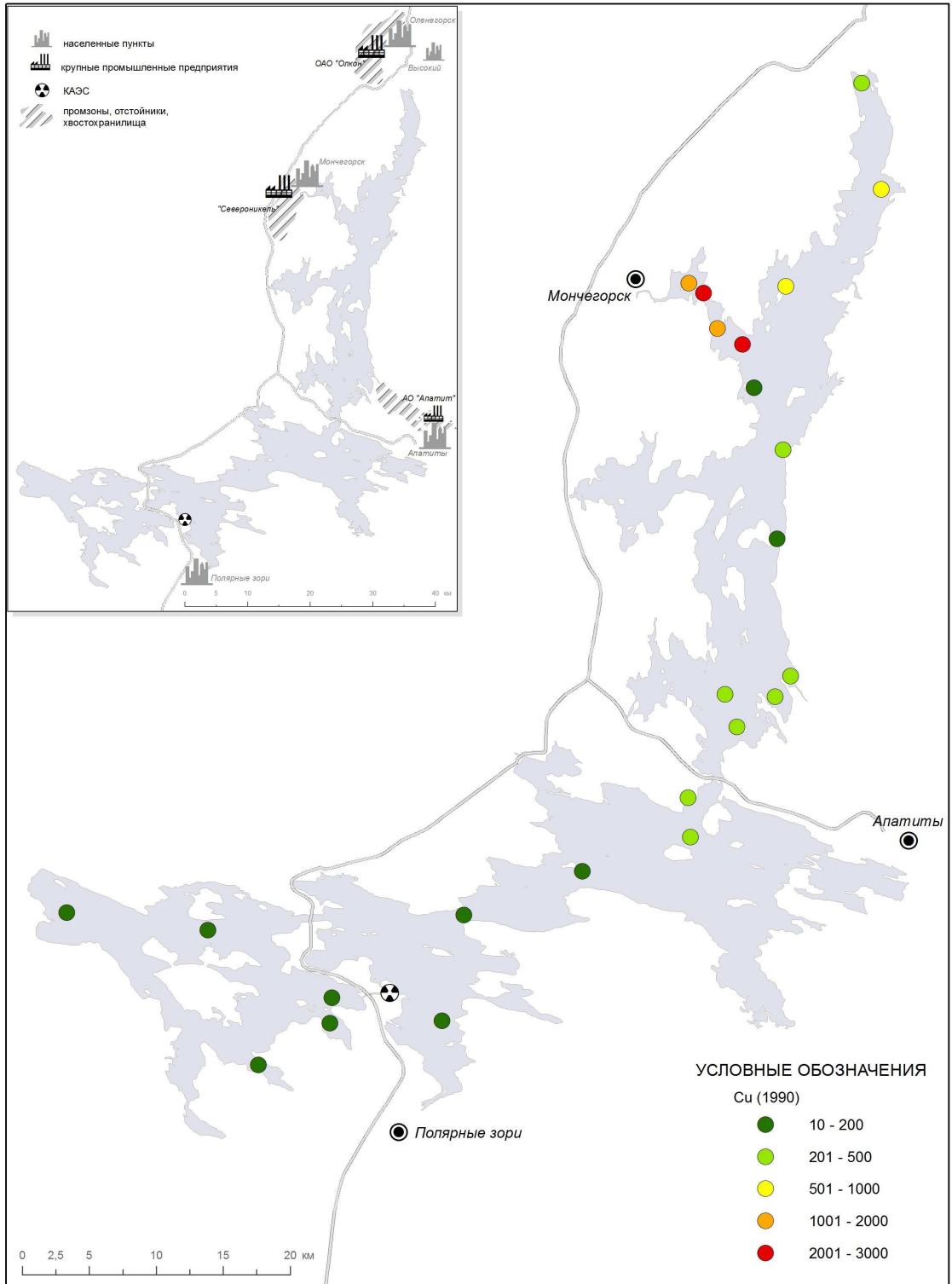


Рис. 6. Распределение содержания Cu (мкг/г) в ДО оз. Имандры по данным экспедиций 1993-1998 гг.

Концентрации Си в поверхностных ДО Большой Имандры больше, чем в ДО Йокостровской Имандры. Это связано с влиянием основного источника поступления ТМ в оз. Имандра – комбината "Североникель", хотя исключать поступление Си со стоками ОАО "Апатит" полностью нельзя. В Большой Имандре перед Йокостровским проливом замедляется течение воды, и при более спокойной гидродинамической обстановке происходит осаждение взвешенного материала, принесенного со стоками комбината "Североникель". В Йокостровской Имандре содержание Си в 1.5 раза меньше (среднее содержание 200 мкг/г), чем в Белой губе и прилегающей акватории (табл. 2), что связано с разбавлением загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, относительно более чистыми притоками, втекающими в Йокостровскую Имандру, например, р. Чуна. По сравнению с 90-ми гг. в Йокостровской Имандре произошло дальнейшее увеличение содержания Си. В Бабинской Имандре наоборот содержание Си увеличилось до среднего значения 120 мкг/г (диапазон 80-150 мкг/г), что почти в 3 раза больше фоновых значений.

4. Заключение

По результатам исследований содержания Ni и Си в поверхностных слоях ДО, в том числе и сотрудниками ИППЭС, установлено, что геохимический состав ДО оз. Имандра за последние полвека претерпел значительные изменения по всей акватории озера, вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса (Большая и Йокостровская Имандры), так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений (Бабинская Имандра). Значительное увеличение содержания этих ТМ зафиксировано в 90-е гг. Вероятно, это связано с началом исследований химического состава ДО оз. Имандра сотрудниками лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН и использованием современной методики исследований. В последние годы отмечено дальнейшее увеличение содержания Ni и Си во всех частях озера. Увеличение среднего содержания ТМ в поверхностных ДО всех плесов Имандры происходит и в последние годы, что отражает общую тенденцию кумулятивного накопления загрязняющих веществ на территории водосбора и в самом озере за период деятельности промышленных предприятий на берегах озера и общего усиления антропогенной нагрузки на его экосистему.

Литература

- 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. V. 5 (2). P. 210-215.
- Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Res.* 1980. V. 14. P. 975-1001.
- Horowitz A., Elrick K.A., Cook R.B.** Effect of mining and related activities on the sediment trace element geochemistry of lake Coeur d'Alene, Idaho, USA. Part I: Surface sediments. *Hydrological Processes*. 1993. V. 7. P. 403-423.
- Horowitz A., Elrick K.A., Robbins J.A., Cook R.B.** Effect of mining and related activities on the sediment trace element geochemistry of lake Coeur d'Alene, Idaho, USA. Part II: Subsurface sediments. *Hydrological Processes*. 1995. V. 9. P. 35-54.
- 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. *Oslo, NIVA-Report 41/1996*. 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.
- Skogheim O.K.** Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo, As-NLH. 1979. N 2. 7 p.
- Атлас Мурманской области. Мурманск, 1971. 33 с.
- Баранов И.В.** Природные особенности водохранилищ Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Условия обитания, жизнь и промысел. Мурманск, Мурман. кн. изд-во, 1966. С. 24-32.
- Беляева Г.В., Чижиков В.В., Воробьева Д.Г. и др.** Окончательный отчет по теме 2-66-16 "Комплексное изучение и охрана озера Имандра. Раздел: Комплексное изучение и охрана озера Большая Имандра". Апатиты, КФАН СССР, 1971.
- Даувальтер В.А.** Геоэкология донных отложений озер. Мурманск, Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 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., Кашулин Н.А.** Геоэкология озер Мурманской области. В 3 ч. Ч. 3: Донные отложения водоемов. Мурманск, Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2014. 214 с.

- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Сандимиров С.С. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных Субарктических и Арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов. Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. Выпуск 1. 2012. № 2 (9). С. 54-87.
- Кошкин В.Д., Кузнецов С.И., Сперанская Т.П. Состав органического вещества иловых отложений различных озер. М., Тр. лимнолог. станции в Косине, 1939, № 2.
- Крючков В.В., Моисеенко Т.И. Оценка современного состояния экосистемы озера Имандра. Основные проблемы. Апатиты, фонды КНЦ РАН, 1987.
- Моисеенко Т.И. Эколого-токсикологические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики (на примере Кольского Севера). Дис. ... докт. биол. наук. Апатиты, 1992. 334 с.
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А. и др. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М., Наука, 2002. 487 с.
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Родюшкин И.В. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты, КНЦ РАН, 1997. 127 с.
- Моисеенко Т.И., Родюшкин И.В., Даувальтер В.А., Кудрявцева Л.П. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера). Апатиты, КНЦ РАН. 1996. 263 с.
- Моисеенко Т.И., Яковлев В.А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л., Наука, 1990. 221 с.
- Рихтер Г.Д. Очерк исследований оз. Имандры. Работы Мурманской биол. станции. Мурманск, 1926. Т. 2.
- Чижигов В.В. Гидрохимия и донные отложения озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения // Экосистема озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. Апатиты, 1980. С. 24-64.
- Чижигов В.В., Воробьева Д.Г., Моисеенко Т.И. Окончательный отчет по теме 11-72-16 "Комплексное изучение Йокостровской и Бабинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема". Апатиты, КФАН СССР, 1976.

References

- Atlas Murmanskoy oblasti [Atlas of the Murmansk Region]. Murmansk, 1971. 33 p.
- Baranov I.V. Prirodnyie osobennosti vodohranilisch Murmanskoy oblasti [Natural features of the reservoirs of the Murmansk region] // Ryibyi Murmanskoy oblasti. Usloviya obitaniya, zhizn i promysel. Murmansk, Murm. kn. izd-vo, 1966. P. 24-32.
- Belyaeva G.V., Chizhikov V.V., Vorobeva D.G. i dr. Okonchatelnyiy otchet po teme 2-66-16 "Kompleksnoe izuchenie i ohrana ozera Imandra. Razdel: Kompleksnoe izuchenie i ohrana ozera Bolshaya Imandra" [The final report on 2-66-16 "Comprehensive study and protection of the Lake Imandra. Section: Comprehensive study and protection of the Great Lake Imandra"]. Apatityi, KFAN SSSR, 1971.
- Dauvalter V.A. Geoekologiya donnyih otlozheniy ozer [Geocology of bottom sediments of lakes]. Murmansk, Izd-vo Murmanskogo gos. tehn. un-ta, 2012. 242 p.
- Dauvalter V.A. Himicheskii sostav donnyih otlozheniy subarkticheskogo ozera pod vliyaniem gornoy metallurgii [The chemical composition of the sub-Arctic lake sediments under the influence of the mining industry]. Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya. 2002. N 4. P. 65-73.
- Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Geoekologiya ozer Murmanskoy oblasti [Geocology of lakes of the Murmansk Region]. V 3 ch. Ch. 3: Donnyie otlozheniya vodoemov. Murmansk, Izd-vo Murmanskogo gos. tehn. un-ta, 2014. 214 p.
- Dauvalter V.A., Kashulin N.A., Sandimirov S.S. Tendentsii izmeneniy himicheskogo sostava donnyih otlozheniy presnovodnyih Subarkticheskikh i Arkticheskikh vodoemov pod vliyaniem prirodnyih i antropogennyih faktorov [Trends in changes in the chemical composition of sediments of freshwater subarctic and arctic waters under the influence of natural and anthropogenic factors]. Trudyi KNTs RAN. Prikladnaya ekologiya Severa. Vyipusk 1. 2012. N 2 (9). P. 54-87.
- Koshkin V.D., Kuznetsov S.I., Speranskaya T.P. Sostav organicheskogo veschestva ilovyih otlozheniy razlichnyih ozer [The composition of the organic matter silt of different lakes]. М., Тр. лимнолог. станиц в Косине, 1939, N 2.
- Kryuchkov V.V., Moiseenko T.I. Otsenka sovremennogo sostoyaniya ekosistemyi ozera Imandra. Osnovnyie problemyi [Assessment of the current state of the ecosystem of the Lake Imandra. Main problems]. Apatityi, fondyi KNTs RAN, 1987.
- Moiseenko T.I. Ekologo- toksikologicheskie osnovyi normirovaniya antropogennyih nagruzok na vodoemyi Subarktiki (na primere Kolskogo Severa) [Ecotoxicological basics of anthropogenic load on the subarctic waters (Kola Peninsula)]. Dis. ... dokt. biol. nauk. Apatityi, 1992. 334 p.
- Moiseenko T.I., Dauvalter V.A., Lukin A.A. i dr. Antropogennyie modifikatsii ekosistemyi ozera Imandra [Anthropogenic modifications of the ecosystem of the Lake Imandra]. М., Nauka, 2002. 487 p.

- Moiseenko T.I., Dauvalter V.A., Rodyushkin I.V.** Geohimicheskaya migratsiya elementov v subarkticheskom vodoeme (na primere ozera Imandra) [Geochemical migration of elements in the sub-Arctic basin (the Lake Imandra)]. Apatityi, KNTs RAN, 1997. 127 p.
- Moiseenko T.I., Rodyushkin I.V., Dauvalter V.A., Kudryavtseva L.P.** Formirovanie kachestva vod i donnyih otlozheniy v usloviyah antropogennyih nagruzok na vodoemyi arkticheskogo basseyna (na primere Kolskogo Severa) [Formation of water quality and sediments under anthropogenic pressures on water bodies of the Arctic basin (Kola Peninsula)]. Apatityi, KNTs RAN. 1996. 263 p.
- Moiseenko T.I., Yakovlev V.A.** Antropogennyye preobrazovaniya vodnyih ekosistem Kolskogo Severa [Anthropogenic transformation of aquatic ecosystems of the Kola North]. L., Nauka, 1990. 221 p.
- Rihter G.D.** Ocherk issledovaniy oz. Imandryi [Research essay of the Lake Imandra]. Raboty Murmanskoy biol. stantsii. Murmansk, 1926. T. 2.
- Chizhikov V.V.** Gidrohimiya i donnyie otlozheniya ozera Imandra pod vliyaniem tehnogennogo zagryazneniya [Hydrochemistry and sediments of the Lake Imandra under the influence of anthropogenic pollution] // Ekosistema ozera Imandra pod vliyaniem tehnogennogo zagryazneniya. Apatityi, 1980. P. 24-64.
- Chizhikov V.V., Vorobeva D.G., Moiseenko T.I.** Okonchatelnyiy otchet po teme 11-72-16 "Kompleksnoe izuchenie Yokostrovskoy i Babinskoy Imandryi i razrabotka rekomendatsiy po ratsionalnomu ispolzovaniyu vodoema" [The final report on 11-72-16 "Comprehensive study of the Yokostrovskoy and Babinski Imandra and recommendations for the rational use of the reservoir"]. Apatityi, KFAN SSSR, 1976.

Информация об авторах

Даувальтер Владимир Андреевич – Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р геогр. наук, глав. науч. сотрудник, профессор, e-mail: vladimir@inep.rsc.ru

Dauvalter V.A. – Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Geogr. Sci., Chief Researcher, Professor, e-mail: vladimir@inep.rsc.ru

Кашулин Николай Александрович – Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р биол. наук, заместитель директора, профессор, e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

Kashulin N.A. – Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Biol. Sci., Deputy Director, Professor, e-mail: nikolay@inep.ksc.ru