

УДК 550.4 (471.21)

## ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЕЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Проведены исследования содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) в донных отложениях (ДО) озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. Водосбор р. Нива характеризуется наиболее высоким уровнем антропогенной нагрузки, поэтому в его водоемах концентрации Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО намного выше, чем в водоемах водосбора р. Тулома. Ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО исследуемых озер совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Pb и Cd, являясь глобальными загрязняющими металлами, не показали зависимости концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния до основного источника загрязнения — комбината «Североникель».

### Ключевые слова:

*донные отложения, озера, Мурманская область, тяжелые металлы, загрязнение.*

## HEAVY METALS IN LAKE SEDIMENTS OF THE CENTRAL AND SOUTHWEST PARTS OF THE MURMANSK REGION

**Vladimir A. Dauvalter, Nikolai A. Kashulin**

Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS

### Abstract

We have conducted the research of the content of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) in sediments of lakes of the central and southeast parts of the Murmansk region. The reservoir of the Niva River is characterized by the highest level of anthropogenous loading, therefore concentrations of Ni, Cu, Co, As and Hg in superficial sediments in its reservoirs are much higher, than in reservoirs of watershed of the Tuloma River. The areas of high values of concentration of the closely correlated Ni, Cu, Co, As and Hg in superficial sediments of the studied lakes coincide and are limited to a 40-50-km local zone around metallurgical enterprises. Pb and Cd, being the global polluting metals, have not showed dependence of concentration in superficial sediments on distance to the main source of pollution – the “Severonikel” Metallurgical Company.

### Keywords:

*sediments, lakes, Murmansk region, heavy metals, pollution.*



### Введение

Климатические, геологические, ландшафтные особенности территорий водосборов, близость Белого моря и другие природные (а в последнее время и антропогенные) условия имеют большое значение при формировании качества поверхностных вод, химического состава воды и донных отложений (ДО) озер центра и юго-запада Мурманской обл., где встречаются, в основном, ультрапресные и олиготрофные водоемы с различной прозрачностью вод. Большое влияние на качество вод оказывает залесенность (в среднем 62.2 %) водосборных бассейнов.

Водные системы центрального и юго-западного районов Мурманской обл. в целом бывают двух различных типов: крупные озерно-речные системы основных рек и системы многочисленных малых озер и рек (рис. 1). По происхождению озера делятся на две основные группы: ледниковые и тектонические. Большинство озер относится к ледниковым, которые имеют округлую или овальную форму и небольшую глубину. Иногда встречаются запрудные озера в составе рек, которые образовались в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер имеют удлиненные формы и большие глубины. Озера тектонического происхождения расположены в глубоких котловинах, имеют вытянутые формы, сложные конфигурации береговой линии и неровные рельефы дна.

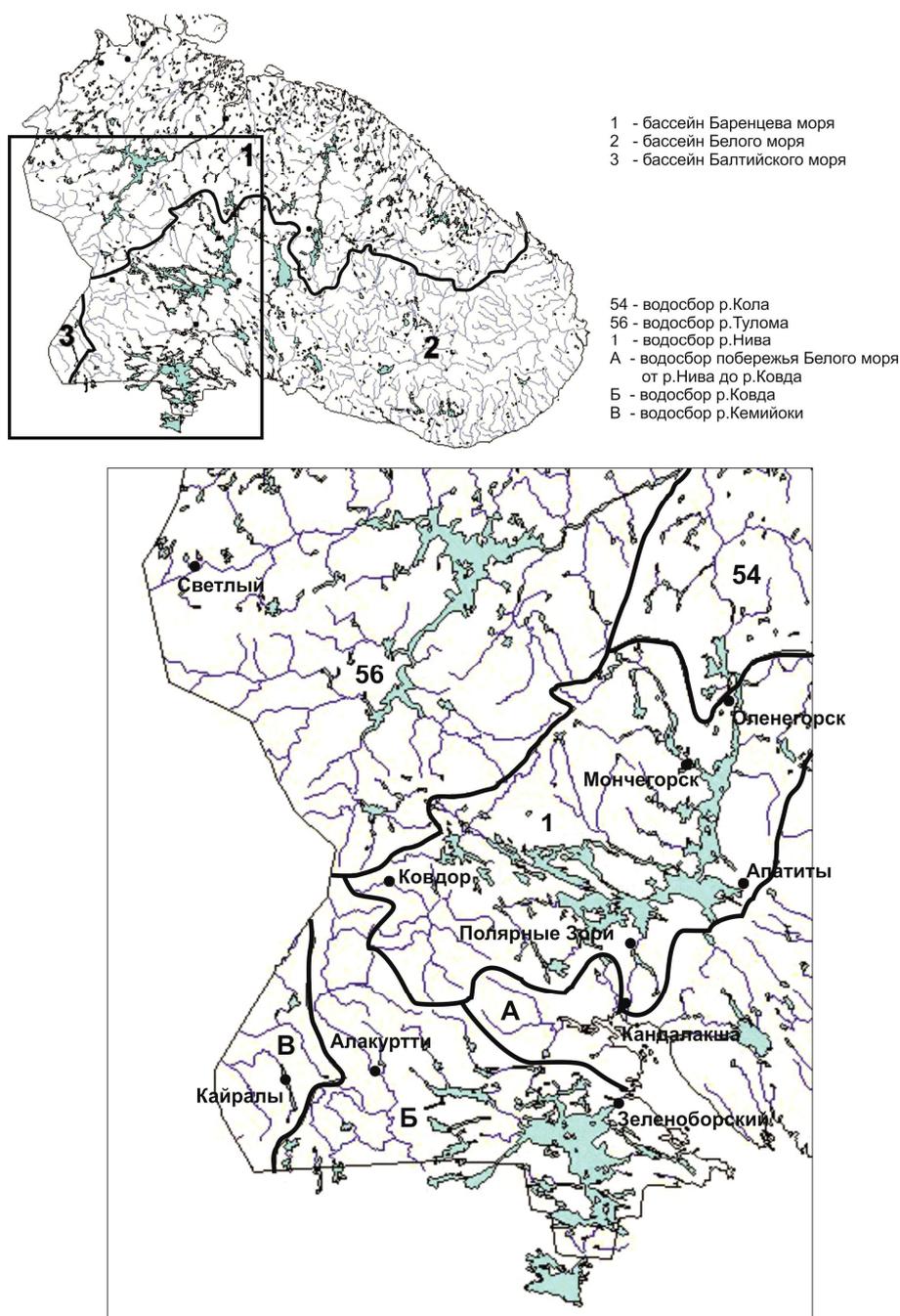


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл.

Главные компоненты водного баланса озер — приток поверхностных вод с водосборной площади, осадки в виде дождя и снега, поверхностный и подземный сток; испарение. Для водоемов центральной и юго-западной частей характерно преобладание поверхностного притока и стока в водном балансе, осадки близки к потерям на испарение и могут составлять от 2 до 16 % баланса [1]. Водоемы области, изначально обладая высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Но за последнее столетие качество этих водоемов серьезно ухудшилось вследствие глобальных изменений, происходящих на нашей планете. Многочисленные разномасштабные региональные источники также вносят значительный вклад в процессы трансформации поверхностных вод Мурманской обл.

В последнее время всё большую актуальность для арктических и субарктических регионов приобретает проблема оценки последствий долговременного загрязнения водоемов, расположенных в отдаленных фоновых районах. Территория юго-западной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов. Наибольшую антропогенную нагрузку испытывают водные системы, расположенные в центральном промышленном районе и принимающие сточные воды крупных городов и промышленных предприятий, таких как комбинат «Североникель» (р. Ньюдай — оз. Имандра), «Олкон» (р. Кола, оз. Имандра) и ОАО «Апатит» (р. Белая — оз. Имандра, Умбозеро), ОАО «Ковдорский ГОК» (р. Ковдора). Выбрасываемые в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

### **Особенности формирования химического состава донных отложений озер центральной и юго-западной частей Мурманской области**

Важной особенностью водоемов рассматриваемой территории Мурманской обл. является, с одной стороны, их высокая рыбохозяйственная ценность, относительное многообразие видов и условий для воспроизводства и развития рыб. С другой стороны, практически все рассматриваемые озерно-речные системы зарегулированы за счет множества водоподпорных сооружений гидроэнергетического комплекса. Кроме того, экосистемы указанного района долгое время были подвержены интенсивному влиянию промышленного загрязнения. Флуктуации гидрологического режима и усиление процессов антропогенного эвтрофирования водоемов послужили причиной нарушения процессов естественного воспроизводства ценнейших лососевых (атлантический лосось, кумжа, арктический голец), сиговых, а также хищных весенне-нерестующих видов.

Центральная и юго-западная часть Мурманской обл. характеризуется сложным геологическим строением. На отдельных участках сохранилась древняя кора выветривания (Хибинские тундры, Ковдорский район). В центральной части коренные породы покрыты четвертичными отложениями (морена и песчаные флювиогляциальные отложения) и продуктами болотных образований. Обнажения коренных пород встречаются редко, что создает иные условия формирования качества вод. Горные массивы приурочены к относительно молодым интрузиям (Хибинские тундры, Чуна-тундра, Монче-тундра, Волчьи тундры, Сальные тундры).

Тектоника центральной и юго-западной частей проявилась в виде различных по глубине и длине линейных трещин и сбросовых впадин, которые имеют меридиональное и широтное направление. Трещины в настоящее время заняты реками, впадины — озерами. Нередко впадины приобретают лопастную форму. Цепочки холмов и гряды (высотой от 10–50 до 180 м) вытянуты преимущественно с северо-востока на юго-запад или с северо-запада на юго-восток и разделены плоскими заболоченными понижениями. Гребни гряд и вершины холмов плоские или округлые, склоны крутизной до 15°, местами обрывистые, на отдельных участках со скоплениями валунов диаметром до 2 м. В рельефе местами выделяются озы — длинные (до 10 км), плосковерхие валы шириной по верху от 5 до 25 м, высотой до 30 м и склонами крутизной 20–35°.

В центре Мурманской обл. расположена крупная возвышенность — Хибинские тундры. Высота отдельных гор достигает 1–1.2 тыс. м над уровнем моря. Горные массивы имеют

платообразный характер вершин и крутые вогнутые склоны (50–60 °). Продолжением горного массива является район возвышенностей Чуна-тундра и Сальные тундры с высотами до 1 тыс. м. На юго-западе выделяются Кюме-тундра и Вайна-тундра с высотами до 600 м.

Климат Мурманской обл. находится под смягчающим влиянием Баренцева и Белого морей, но Белое море зимой покрывается льдом. При удалении вглубь полуострова влияние морей довольно быстро исчезает, термический режим центрального и юго-западного районов становится несколько суровее и продолжительнее на 1 месяц [1]. Преобладающая дневная температура воздуха в наиболее холодные месяцы (январь и февраль) — -13 ... -18 °С, ночная — -16 ... -23 °С (абс. мин. — -41 °С). В горах климат отличается большей территориальной изменчивостью: падением температуры воздуха, силой ветра и продолжительностью залегания снежного покрова. Осадки довольно значительны (в среднем 577 мм/год), распределяются по площади сравнительно равномерно, но в горах быстро возрастают с высотой.

Характерные почвы Мурманской обл. — подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности, которые развиваются в зоне тайги, в местах развития лесотундровых ассоциаций, часто встречаются в тундровой зоне. В условиях значительного увлажнения бедные растворимыми веществами подзолистые почвы очень мало минерализованы. Мелкоземистые тундровые почвы в некоторых случаях проникают в леса, например долинная тундра вблизи оз. Малый Вудъявр в Хибинах. Распространены также торфяно-болотные почвы, среди которых встречаются примитивные тундровые почвы, приуроченные к возвышенным и более расчлененным местам. Тундровые почвы свойственны зоне тундр, а также горным вершинам и склонам над границей лесной растительности. Небольшие площади в долине рек Тулома и Ена заняты дерновыми почвами естественного происхождения, связанными с особенностями речных отложений, богатых питательными веществами.

В прямой связи с почвами описываемых районов находится развитие растительного покрова, который представлен различными комплексами лесотундровой и таежной растительности. Наиболее распространены комплексы лесов, лесотундры и болотной растительности. Таежная зона, включая лесотундру, занимает основную часть территории. Леса состоят в основном из ели, сосны и березы с преобладанием хвойных пород. На участках горелого и вырубленного леса распространена поросль березы и сосны. Тундры представлены чаще всего горными тундрами, для которых характерны каменные россыпи и выходы скал. Площади тундр заняты преимущественно кустарничковыми тундрами, мхами и лишайниками. Среди растительности болот наибольшее распространение имеют грядово-мочажинные, кустарничко-сфагновые и осоковые комплексы. Большое распространение имеют болота, заросшие сосной и березой.

Наряду с другими природными факторами (климатическими, географическими, ландшафтными и геологическими условиями), гидрохимические параметры определяют формирование химического состава ДО. Загрязнение водных объектов, вызывая физико-химические изменения состояния воды, приводит к нарушению экологического баланса системы. Изучение уровней содержания загрязняющих веществ и закономерностей перераспределения элементов при движении потока загрязненных вод — необходимое условие для обоснованного прогнозирования качества природных вод.

Для природных вод озер, расположенных в центре и на юго-западе Мурманской обл., типичен следующий порядок распределения главных ионов:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ;  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ . В 90 % исследованных озер состав вод соответствует природному распределению и относится к классу гидрокарбонатных вод. Кальций и натрий характеризуются высоким содержанием в земной коре (2.96 и 2.50 % соответственно [2]), где находятся, главным образом, в виде силикатов и алюмосиликатов. Сопоставление содержания катионов показывает, что в водоемах исследуемых районов  $\text{Na}^{2+}$  и  $\text{Ca}^+$  распределены равномерно (в среднем 4.13 и 3.61 мг/л соответственно). На их долю в катионном составе приходится от 2 до 87 %. Меньшая вариабельность наблюдается по  $\text{Mg}^{2+}$  (0.01–11.0 мг/л) и  $\text{K}^+$  (0.07–17.0 мг/л). В распределении главных ионов в озерах по мере удаления от центрального промышленного района увеличения

или уменьшения их содержания не наблюдается. Исследуемые водоемы характеризуются нейтральными величинами pH. Среди обследованных водоемов в центре и на юго-западе Мурманской обл. озера с  $\text{pH} < 6$  составили всего 6%. Озера с низкими значениями pH, как правило, невелики по размерам — их площадь составляет в среднем менее  $0.1 \text{ км}^2$ , и в них наблюдается увеличение содержания органического вещества.

На исследуемой территории для водоемов преобладающими загрязняющими веществами с токсичным эффектом являются тяжелые металлы (ТМ), в первую очередь выпускаемые на промышленных предприятиях региона Ni, Cu, Co и др. В целом территория юго-западной части Мурманской обл. не подвержена серьезному антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов. Центральные районы, наоборот, расположены в непосредственной близости от промышленных предприятий на водосборах рек Ньюдай, Белая и Ковдора. В эти реки сбрасываются недостаточно очищенные сточные воды после очистных сооружений и дренажные воды рудников. В настоящее время в большинстве озер на территории центрального района Мурманской обл. вследствие значительного антропогенного воздействия наблюдается значительное превышение в содержании многих загрязняющих веществ. Химический состав вод малых озер исследованной территории явно отражает антропогенную специфику условий его формирования.

### **Материалы и методы**

При написании этой статьи использовались результаты научно-исследовательских работ Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая инженерно-экологические изыскания в зоне влияния выбросов и стоков промышленных предприятий [3–7], а также монографии [8–16]. Настоящая статья продолжает предыдущие публикации [17–19], касающиеся оценки экологического состояния озер Мурманской обл. по результатам исследования химического состава ДО.

Этот состав исследовался в 59 озерах центральной и юго-западной частей Мурманской обл., из которых 42 озера находятся на водосборе р. Нива, 12 — на водосборе р. Тулома, 3 — на водосборе р. Ковда и по одному озеру на водосборе р. Кола и на побережье Белого моря. Указанная часть Мурманской обл., особенно водосбор р. Нива, индустриально интенсивно развита. Здесь располагаются главные источники загрязнения Мурманской обл., которые оказывают большое влияние на формирование химического состава современных ДО. Вместе с тем, на химический состав ДО влияют природные условия, такие как геохимический состав подстилающих горных пород и почв, климатические характеристики (температура, осадки, испарение), жизнедеятельность гидробионтов, химический состав воды, в том числе и растворенные там газы, геохимическая обстановка в водной толще и ДО и т. д. По этим показателям и параметрам, как и по источникам загрязнения, водосборы озер очень разнообразны, что выражается также в разнообразии химического состава ДО и в поверхностных слоях, отражающих современное состояние водосборов озер, и в толщах ДО, где находят отражение природные условия формирования химического состава.

Для оценки экологического состояния озер производился отбор колонок ДО и определение содержания элементов, в том числе ТМ, в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [12, 20].

### **Результаты и их обсуждение**

Для оценки качества ДО озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл., аккумуляции и распределения в них химических элементов, как и в предыдущих статьях [17–19], рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации элементов; 2) их вертикальное распределение в толще ДО; 3) концентрации элементов в поверхностных ДО; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, которое создают ТМ, накопленные в ДО.

*Фоновые концентрации тяжелых металлов*

При оценке интенсивности загрязнения очень важно иметь достоверные значения фоновых концентраций, которые сравниваются с содержаниями элементов в верхних слоях ДО, отражающими современное состояние окружающей среды. Фоновые содержания элементов определялись в образцах, отобранных из самых глубоких слоев колонок ДО (обычно более 20 см) и отложившихся более 200 лет тому назад, они характеризуют период до любого заметного загрязнения [12, 21–23].

Фоновые концентрации элементов в ДО рассматривались отдельно в озерах водосборов рек Нива и Тулома вследствие различия в геохимических и климатических особенностях водосборной территории (табл. 1). Средние фоновые концентрации ряда ТМ (Cu, Ni, Zn, Co, Hg) в ДО озер водосборов рек Нива и Тулома подобны, фоновые концентрации Cd в 1.7 раз больше в озерах водосбора р. Туломы, а фоновые концентрации Pb и As больше в озерах водосбора р. Нивы в 3.1 и 2.6 раз соответственно. В целом средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. подобны или ниже, чем в малых озерах Мурманской обл., определенных ранее [24].

Интенсивность осадконакопления и содержание элементов в ДО могут зависеть от морфометрических характеристик озер [25] и от ряда геологических, геохимических, физических, химических и биологических факторов. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава фоновых ДО исследуемых озер, проведен корреляционный и факторный анализ (табл. 2–5) для озер водосборов рек Нива и Тулома.

Таблица 1

Фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора р. Нива (числитель)  
и озер водосбора р. Тулома (знаменатель)

| Значение | ППП, % | Металлы, мкг/г сухого веса |      |    |      |      |     |      |       |
|----------|--------|----------------------------|------|----|------|------|-----|------|-------|
|          |        | Cu                         | Ni   | Zn | Co   | Cd   | Pb  | As   | Hg    |
| Среднее  | 23.90  | 23.1                       | 24.3 | 72 | 10.8 | 0.18 | 5.2 | 2.50 | 0.028 |
|          | 25.32  | 23.0                       | 29.9 | 74 | 10.8 | 0.30 | 1.7 | 0.97 | 0.038 |

Окончание таблицы 1

|                                 |       |      |      |     |      |      |      |      |       |
|---------------------------------|-------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|
| Медианное                       | 19.98 | 20.5 | 19.7 | 70  | 9.8  | 0.11 | 4.0  | 1.22 | 0.024 |
|                                 | 24.88 | 18.0 | 19.5 | 56  | 4.2  | 0.29 | 1.5  | 0.88 | 0.030 |
| Минимальное                     | 2.19  | 5.8  | 4.9  | 16  | 1.3  | 0.01 | 0.4  | 0.10 | 0.006 |
|                                 | 14.60 | 3.4  | 6.0  | 24  | 2.0  | 0.03 | 0.9  | 0.50 | 0.022 |
| Максимальное                    | 88.85 | 67.9 | 71.7 | 200 | 27.5 | 0.76 | 27.2 | 9.62 | 0.069 |
|                                 | 38.19 | 53.9 | 73.9 | 207 | 53.0 | 0.78 | 2.5  | 1.62 | 0.071 |
| Стандартное отклонение          | 17.62 | 14.2 | 15.9 | 42  | 7.2  | 0.20 | 4.6  | 2.79 | 0.018 |
|                                 | 7.07  | 15.4 | 21.4 | 56  | 14.3 | 0.21 | 0.4  | 0.47 | 0.023 |
| Средние по Мурманской обл. [24] | —     | 27   | 27   | 96  | 13   | 0.23 | 4.4  | 3.2  | 0.035 |

Корреляционный анализ (табл. 2 и 3) выявил две группы ТМ, имеющих достаточно высокую корреляционную связь между собой: 1) металлы, имеющие широкое распространение в минералах и горных породах Мурманской обл., особенно в центральном районе (Ni, Cu, Co, Zn), к ним присоединяется также Hg; 2) халькофильные элементы Pb и As, одним из основных источников поступления которых является воздушный перенос с других территорий. Эти две группы элементов также отличаются и корреляцией с морфометрическими характеристиками озер. Если первая группа имеет высокие коэффициенты корреляции с площадью водосборов и самих озер, то вторая группа — с высотой уреза воды над уровнем моря, что подтверждает наше предположение о разных путях поступления элементов в водоемы в естественных условиях. Первая группа поступает в водоемы главным образом путем выветривания горных пород водосбора озер, а вторая группа — за счет приноса воздушными массами с более удаленных территорий.

Таблица 2

Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора р. Нива, глубины станций отбора проб, глубины слоя в колонке ДО, площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.30$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 42$  (выделено жирным шрифтом)

| Показатель                         | ППП          | Cu          | Ni          | Zn           | Co          | Cd          | Pb          | As           | Hg    |
|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|
| ППП                                | 1.00         |             |             |              |             |             |             |              |       |
| Cu                                 | <b>-0.32</b> | 1.00        |             |              |             |             |             |              |       |
| Ni                                 | -0.20        | <b>0.58</b> | 1.00        |              |             |             |             |              |       |
| Zn                                 | 0.02         | 0.27        | 0.24        | 1.00         |             |             |             |              |       |
| Co                                 | -0.15        | <b>0.50</b> | <b>0.75</b> | <b>0.58</b>  | 1.00        |             |             |              |       |
| Cd                                 | <b>0.47</b>  | -0.07       | 0.05        | 0.13         | -0.05       | 1.00        |             |              |       |
| Pb                                 | -0.19        | 0.11        | -0.04       | 0.11         | 0.08        | 0.10        | 1.00        |              |       |
| As                                 | -0.14        | 0.17        | 0.02        | 0.18         | 0.15        | 0.24        | <b>0.75</b> | 1.00         |       |
| Hg                                 | 0.08         | <b>0.35</b> | <b>0.38</b> | <b>0.52</b>  | <b>0.37</b> | <b>0.60</b> | -0.01       | 0.02         | 1.00  |
| Глубина станции, м                 | -0.29        | <b>0.35</b> | 0.12        | 0.20         | 0.23        | 0.15        | <b>0.53</b> | <b>0.59</b>  | 0.22  |
| Слой, см                           | <b>0.33</b>  | -0.25       | -0.22       | <b>-0.34</b> | -0.18       | -0.23       | -0.13       | <b>-0.34</b> | -0.05 |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | -0.22        | 0.15        | <b>0.35</b> | <b>0.31</b>  | <b>0.47</b> | -0.14       | 0.00        | 0.11         | -0.05 |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | -0.20        | 0.22        | <b>0.31</b> | <b>0.38</b>  | <b>0.46</b> | -0.03       | -0.02       | 0.12         | 0.28  |
| Уровень, м над ур. моря            | -0.05        | -0.04       | -0.19       | 0.06         | -0.11       | 0.15        | <b>0.67</b> | <b>0.57</b>  | -0.13 |
| Площадь / водосбор                 | 0.15         | -0.11       | -0.04       | 0.13         | -0.09       | 0.24        | 0.04        | -0.16        | 0.01  |

Таблица 3

Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора р. Тулома, глубины станций отбора проб, глубины слоя в колонке ДО, площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.53$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 12$  (выделено жирным шрифтом)

| Показатель                         | ППП          | Cu          | Ni          | Zn          | Co          | Cd    | Pb          | As          | Hg          |
|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|
| Cu                                 | -0.08        | 1.00        |             |             |             |       |             |             |             |
| Ni                                 | -0.11        | <b>0.95</b> | 1.00        |             |             |       |             |             |             |
| Zn                                 | -0.15        | <b>0.89</b> | <b>0.90</b> | 1.00        |             |       |             |             |             |
| Co                                 | 0.09         | <b>0.65</b> | <b>0.72</b> | <b>0.80</b> | 1.00        |       |             |             |             |
| Cd                                 | 0.34         | 0.04        | -0.12       | -0.07       | -0.09       | 1.00  |             |             |             |
| Pb                                 | 0.15         | 0.37        | 0.42        | <b>0.59</b> | <b>0.59</b> | 0.29  | 1.00        |             |             |
| As                                 | <b>-0.79</b> | <b>0.76</b> | <b>0.79</b> | <b>0.92</b> | <b>0.76</b> | 0.26  | <b>0.94</b> | 1.00        |             |
| Hg                                 | <b>-0.64</b> | <b>0.79</b> | <b>0.81</b> | <b>0.91</b> | <b>0.76</b> | 0.24  | <b>0.85</b> | <b>0.97</b> | 1.00        |
| Глубина станций, м                 | -0.36        | <b>0.84</b> | <b>0.81</b> | <b>0.82</b> | 0.50        | -0.07 | 0.27        | <b>0.55</b> | <b>0.53</b> |
| Слой, см                           | <b>0.72</b>  | -0.02       | -0.14       | -0.26       | -0.20       | 0.30  | -0.19       | -0.33       | -0.12       |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | <b>-0.59</b> | <b>0.74</b> | <b>0.72</b> | <b>0.75</b> | 0.37        | -0.27 | 0.21        | <b>0.73</b> | <b>0.72</b> |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | <b>-0.58</b> | <b>0.75</b> | <b>0.72</b> | <b>0.75</b> | 0.37        | -0.26 | 0.22        | <b>0.73</b> | <b>0.72</b> |
| Уровень, м над ур. моря            | -0.07        | -0.18       | -0.16       | 0.00        | -0.05       | 0.46  | <b>0.64</b> | <b>0.69</b> | 0.51        |
| Площадь / водосбор                 | <b>-0.55</b> | <b>0.53</b> | 0.47        | 0.48        | 0.12        | 0.08  | 0.28        | <b>0.72</b> | <b>0.56</b> |

В факторной модели химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Нива (табл. 4) наибольшим весом (30 %) обладает первый фактор, в котором наибольшие коэффициенты с отрицательными значениями имеют металлы, объединенные корреляционным

анализом в первую группу (Ni, Cu, Co, Zn), а также площадь озера. Это подтверждает версию о разных путях поступления элементов в водоемы в естественных условиях, а данную группу металлов — в результате выветривания минералов и горных пород, содержащих значительное количество этих металлов. Второй фактор объединяет содержание органического вещества (ППП) и халькофильные элементы — Cd, Hg, Pb, As. Третий фактор выделил высоту уреза воды озер над уровнем моря, т. е. одну из главных морфологических характеристик формирования химического состава озер, ответственную за дальний трансграничный перенос элементов воздушными массами, отмеченную Н. М. Страховым [25].

Таблица 4

Факторная модель химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Нива

| Показатель                         | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| ППП                                | 0.234    | 0.713    | 0.227    |
| Cu                                 | -0.696   | -0.032   | 0.119    |
| Ni                                 | -0.777   | 0.142    | -0.291   |
| Zn                                 | -0.601   | 0.466    | 0.386    |
| Co                                 | -0.806   | 0.347    | -0.025   |
| Cd                                 | -0.575   | 0.694    | 0.050    |
| Pb                                 | -0.555   | -0.527   | 0.143    |
| As                                 | -0.460   | -0.504   | 0.407    |
| Hg                                 | -0.500   | 0.671    | -0.097   |
| Глубина станций, м                 | -0.514   | -0.237   | 0.535    |
| Слой, см                           | 0.576    | 0.389    | -0.102   |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | -0.497   | -0.413   | -0.551   |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | -0.626   | -0.073   | -0.459   |
| Уровень, м над ур. моря            | 0.000    | -0.219   | 0.895    |
| Площадь / водосбор                 | 0.165    | 0.576    | 0.215    |
| Вес фактора, %                     | 30.1     | 20.6     | 14.4     |

Таблица 5

Факторная модель химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Тулома

| Показатель                         | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| ППП                                | 0.645    | -0.763   | -0.032   |
| Cu                                 | -0.941   | -0.323   | 0.101    |
| Ni                                 | -0.945   | -0.297   | 0.136    |
| Zn                                 | -0.981   | -0.027   | 0.192    |
| Co                                 | -0.960   | -0.278   | 0.005    |
| Cd                                 | -0.697   | -0.545   | -0.470   |
| Pb                                 | -0.939   | 0.335    | 0.072    |
| As                                 | -0.868   | 0.289    | 0.404    |
| Hg                                 | -0.820   | 0.125    | 0.558    |
| Глубина станций, м                 | -0.889   | -0.360   | -0.283   |
| Слой, см                           | 0.172    | -0.954   | 0.244    |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | -0.962   | -0.263   | -0.069   |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | -0.964   | -0.256   | -0.072   |
| Уровень, м над ур. моря            | -0.790   | 0.502    | -0.351   |
| Площадь / водосбор                 | -0.845   | 0.422    | -0.329   |
| Вес фактора, %                     | 72.6     | 19.8     | 7.7      |

Таким образом, установлено, что геохимический состав подстилающих коренных и четвертичных пород, воздушные переносы из соседних территорий, а также морфометрические характеристики озер являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых ДО озер.

Концентрации элементов в фоновых слоях ДО служат маркером, по которому можно судить об интенсивности антропогенной нагрузки на территории водосбора и на сами озера, поэтому установленные в данной работе величины фоновых концентраций металлов в ДО озер имеют очень большую экологическую и геохимическую ценность. Исследуя вертикальное распределение металлов в толще ДО, можно восстановить историю событий, происходящих на территории водосбора конкретного озера с установлением источника поступления элементов.

#### *Вертикальное распределение элементов в донных отложениях*

В ДО исследуемых водоемов выявлено увеличение содержания ТМ в направлении к поверхности ДО. Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–5 см ДО. В озерах, принимающих сточные воды промышленных предприятий (Нюдъявр, Большой Вудъявр, Ковдор), ДО загрязнены на большую мощность — до 15 см (рис. 2). Встречаются также озера с повышенными скоростями седиментации (например Молевое), где загрязнены 10 см поверхностных ДО. Это, как правило, мелкие озера с высокой трофностью и высоким содержанием органического материала в ДО. Донные отложения практически всех озер загрязнены халькофильными элементами, в первую очередь Pb и Cd. К сожалению, не во всех озерах определялись концентрации Hg и As, но там, где они определены, их концентрации также увеличиваются в направлении к поверхности ДО. Таким образом, подтвердился результат исследований химического состава ДО озер северо-западной и восточной частей Мурманской обл., когда было установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) во всех исследуемых водных объектах вне зависимости от того, испытывают они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [16–20, 26]. Эти халькофильные элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов [27].

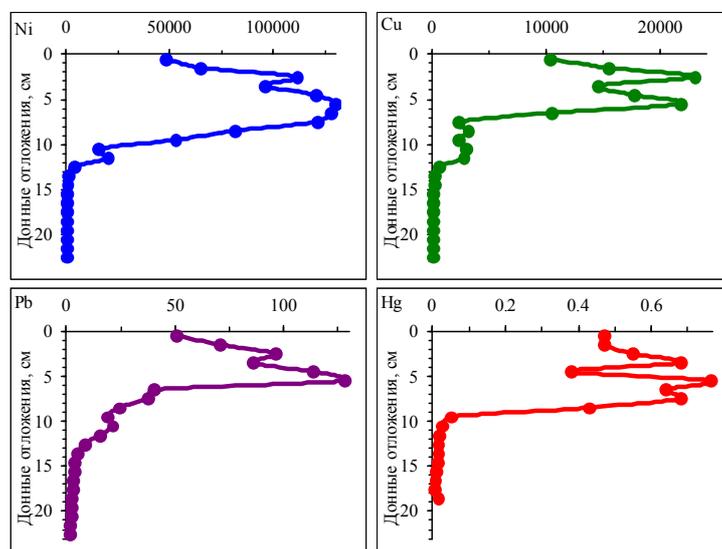


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Ni, Cu, Pb, Hg (мкг/г сухого веса) в ДО оз. Нюд-явр

#### *Распределение элементов в поверхностном слое донных отложений*

Как было сказано выше, по факторам формирования химического состава ДО, в том числе и по источникам загрязнения, водосборы озер очень разнообразны, что отражается и в разнообразии химического состава ДО в поверхностных слоях, отражающих современное

состояние водосборов озер. В табл. 6 представлены результаты исследований содержания металлов в поверхностном 1-сантиметровом слое ДО озер водосборов рек Нива и Тулома. Водосборы этих рек отличаются как природными условиями формирования качества воды и ДО, так и степенью антропогенной нагрузки. Как было сказано выше, территория водосбора р. Нива индустриально интенсивно развита, уровень антропогенной нагрузки здесь намного выше, чем на водосборе р. Тулома (табл. 6). Средние и медианные значения концентраций ТМ в поверхностных ДО водосбора р. Нива намного выше, чем водосбора р. Тулома, например Ni — в 57 и 4 раза, Cu — в 23 и 4.5 раза, Co — в 5.6 и 4.6 раза, Pb — в 5.1 и 7.2 раза, As — в 6.1 и 4.3 раз соответственно.

Таблица 6

Концентрации ТМ и стандартное отклонение в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер водосбора р. Нива (числитель) и озер водосбора р. Тулома (знаменатель)

| Значение               | ППП, %       | Металлы, мкг/г сухого веса |               |              |             |              |              |             |              |
|------------------------|--------------|----------------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|                        |              | Cu                         | Ni            | Zn           | Co          | Cd           | Pb           | As          | Hg           |
| Среднее                | <u>34.76</u> | <u>359</u>                 | <u>1312</u>   | <u>108.1</u> | <u>40.9</u> | <u>1.04</u>  | <u>24.5</u>  | <u>6.0</u>  | <u>0.151</u> |
|                        | 30.03        | 15.4                       | 23.1          | 54.7         | 7.3         | 0.93         | 4.8          | 1.0         | 0.104        |
| Медианное              | <u>26.16</u> | <u>55.8</u>                | <u>87.8</u>   | <u>100.8</u> | <u>18.4</u> | <u>0.39</u>  | <u>18.1</u>  | <u>4.2</u>  | <u>0.096</u> |
|                        | 27.65        | 12.5                       | 21.5          | 44.7         | 4.0         | 0.47         | 2.5          | 1.0         | 0.104        |
| Минимальное            | <u>6.06</u>  | <u>11.9</u>                | <u>13.0</u>   | <u>10.7</u>  | <u>1.9</u>  | <u>0.03</u>  | <u>1.5</u>   | <u>0.1</u>  | <u>0.018</u> |
|                        | 20.04        | 7.0                        | 11.9          | 23.4         | 2.0         | 0.18         | 1.5          | 0.7         | 0.062        |
| Максимальное           | <u>96.40</u> | <u>10234</u>               | <u>47805</u>  | <u>270.0</u> | <u>661</u>  | <u>14.37</u> | <u>101.6</u> | <u>39.1</u> | <u>1.133</u> |
|                        | 44.09        | 34.0                       | 43.0          | 109.0        | 34.0        | 3.12         | 14.0         | 1.3         | 0.145        |
| Стандартное отклонение | <u>22.12</u> | <u>1503.5</u>              | <u>7024.4</u> | <u>58.3</u>  | <u>98.3</u> | <u>2.16</u>  | <u>22.1</u>  | <u>7.4</u>  | <u>0.209</u> |
|                        | 6.90         | 7.5                        | 8.3           | 31.3         | 8.8         | 0.91         | 4.9          | 0.4         | 0.058        |

Ареалы высоких значений концентраций в поверхностных ДО исследуемых озер для тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий (рис. 3), как это было отмечено предыдущими исследованиями вокруг комбината «Печенганикель» [17, 20, 28, 29].

Увеличение содержания Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, Cd также является глобальным загрязнителем [16], поэтому Cd не показал зависимости концентраций в поверхностных слоях от расстояния от источника загрязнения. Вследствие наличия большого количества источников поступления ТМ в окружающую среду (ОАО «Апатит», ОАО «Олкон», Ковдорский ГОК, Кандалакшский алюминиевый завод, а также Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ и другие энергетические предприятия, в том числе котельные, работающие на угле и мазуте), преобладающие загрязняющие ТМ, Ni и Cu, не имели таких высоких зависимостей концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской области, где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель» и другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним [17, 28, 29]. Но величина достоверности аппроксимации регрессионных уравнений зависимости концентраций ТМ в поверхностных слоях ДО от расстояния от источника загрязнения (комбината «Североникель») достаточно высокая, прежде всего для приоритетных загрязняющих элементов Ni и Cu, а также для Co и Hg и немного меньше для As. Это говорит в пользу вывода, что комбинат «Североникель» — основной источник загрязнения Ni, Cu, Co, Hg и As водосборов озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл.

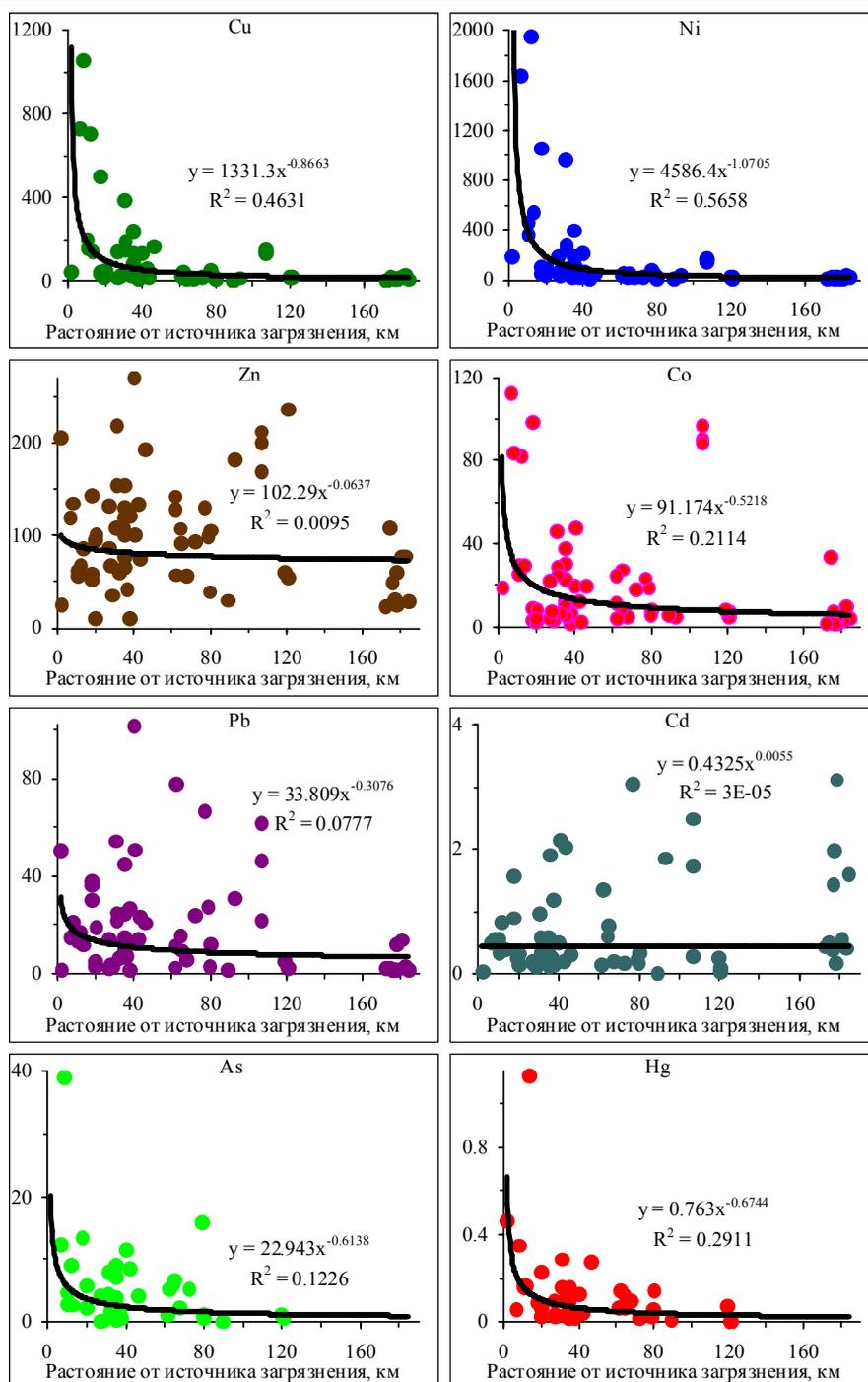


Рис. 3. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов в поверхностном слое (0-1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель»

Корреляционный анализ также выделил группу ТМ, имеющих высокие достоверные корреляционные связи (табл. 7). К ней относятся, прежде всего, загрязняющие ТМ, основной источник которых — выбросы комбината «Североникель» (Ni и Cu), а также отмеченные ранее Co, Hg и As. Выявлена высокая корреляция содержаний Pb в поверхностном слое (0-1 см) ДО и высоты уреза воды озера над уровнем моря, что говорит в пользу высказанной ранее идеи, что этот халькофильный элемент привносится на территории водосборов озер главным образом

воздушными массами с более удаленных территорий. В виде атмосферных выпадений металл достигает территории водосборов и далее, мигрируя в поверхностном стоке, попадает в озеро.

Таблица 7

Значения коэффициентов линейной корреляции величин ППП, концентраций ТМ в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл., расстояния от станции отбора пробы до комбината «Североникель», площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.25$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 64$  (выделено жирным шрифтом)

| Показатель                         | ППП          | Cu          | Ni          | Zn          | Co          | Cd          | Pb          | As           | Hg           |
|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Cu                                 | 0.03         | 1.00        |             |             |             |             |             |              |              |
| Ni                                 | 0.04         | <b>1.00</b> | 1.00        |             |             |             |             |              |              |
| Zn                                 | <b>-0.36</b> | 0.26        | 0.24        | 1.00        |             |             |             |              |              |
| Co                                 | -0.06        | <b>0.97</b> | <b>0.96</b> | <b>0.36</b> | 1.00        |             |             |              |              |
| Cd                                 | 0.01         | <b>0.91</b> | <b>0.91</b> | <b>0.28</b> | <b>0.89</b> | 1.00        |             |              |              |
| Pb                                 | -0.13        | 0.21        | 0.20        | <b>0.55</b> | <b>0.28</b> | <b>0.37</b> | 1.00        |              |              |
| As                                 | -0.13        | <b>0.79</b> | <b>0.71</b> | <b>0.35</b> | <b>0.66</b> | <b>0.36</b> | <b>0.36</b> | 1.00         |              |
| Hg                                 | -0.14        | <b>0.31</b> | <b>0.30</b> | 0.22        | <b>0.32</b> | <b>0.30</b> | 0.18        | 0.19         | 1.00         |
| Расстояние от станции отбора, км   | -0.11        | -0.20       | -0.17       | -0.18       | -0.21       | -0.04       | -0.24       | <b>-0.29</b> | <b>-0.35</b> |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | -0.23        | -0.03       | -0.04       | 0.10        | 0.03        | 0.01        | 0.12        | 0.21         | -0.03        |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | <b>-0.25</b> | -0.01       | -0.02       | 0.20        | 0.06        | -0.02       | 0.16        | 0.20         | 0.01         |
| Уровень, м над ур. моря            | -0.05        | -0.08       | -0.08       | <b>0.28</b> | -0.09       | -0.04       | <b>0.45</b> | 0.12         | -0.04        |
| Площадь / водосбор                 | 0.22         | -0.04       | -0.04       | -0.04       | -0.08       | 0.01        | 0.00        | 0.21         | -0.08        |

В факторной модели химического состава в поверхностном слое (0–1 см) ДО (табл. 8) с весом (35 %) преобладает первый фактор, в котором наибольшие коэффициенты имеют металлы, объединенные корреляционным анализом в первую группу: Ni, Cu, Co, As, а также расстояние от источника загрязнения с отрицательным значением. Это подтверждает версию о поступлении данной группы металлов в результате выбросов источниками загрязнения, в первую очередь комбинатом «Североникель». Второй фактор объединяет содержание органического вещества (ППП), Zn и Pb (металлы с отрицательным значением). Свинец, как и говорилось ранее, имеет другой главный источник поступления. Это, скорее всего, глобальное загрязнение Северного полушария этим элементом, а также поступление от местных источников, таких как энергетические установки, в том числе передвижной транспорт и котельные, на которых сжигается твердое и жидкое топливо с высоким содержанием Pb. Третий фактор выделил площади водосбора и озер — главные морфологические характеристики формирования химического состава ДО озер, отмеченные Н. М. Страховым [25].

#### Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Для оценки геоэкологического состояния исследуемых озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл. определялись величины коэффициента и степени загрязнения [30], как это было сделано в ранее опубликованных статьях [17–19]. Коэффициент загрязнения ( $C_f^j$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих ТМ.

Факторная модель химического состава в поверхностном слое (0-1 см) ДО озер центрального и юго-западного районов Мурманской обл.

| Показатель | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|------------|----------|----------|----------|
| ППП        | -0.255   | -0.389   | -0.630   |
| Cu         | 0.922    | -0.285   | -0.041   |
| Ni         | 0.890    | -0.361   | -0.043   |
| Zn         | 0.429    | 0.723    | 0.123    |
| Co         | 0.920    | -0.214   | 0.125    |
| Cd         | 0.601    | 0.045    | -0.386   |
| Pb         | 0.419    | 0.719    | -0.275   |

Окончание таблицы 8

|                                    |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| As                                 | 0.822  | 0.022  | -0.017 |
| Hg                                 | 0.342  | -0.040 | -0.030 |
| Расстояние от станции отбора, км   | -0.513 | 0.242  | 0.293  |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | 0.220  | 0.095  | 0.740  |
| Площадь озера, км <sup>2</sup>     | 0.328  | 0.134  | 0.622  |
| Уровень, м над ур. моря            | 0.123  | 0.746  | -0.443 |
| Площадь / водосбор                 | 0.137  | 0.047  | -0.312 |
| Вес фактора, %                     | 32.3   | 15.0   | 14.1   |

В исследуемых озерах отмечено уменьшение значений степени загрязнения по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель» (рис. 4).

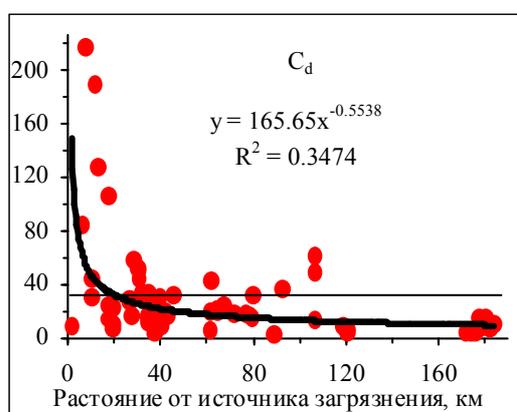


Рис. 4. Распределение величин степени загрязнения ( $C_d$ ) исследуемых озер по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель». Прямая линия соответствует высокой степени загрязнения ( $C_d \geq 32$ ), свидетельствующей о серьезном загрязнении озера и его водосбора

Значения степени загрязнения не показали высоких зависимостей от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской обл., где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель», а другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним [17]. Но величина достоверности аппроксимации регрессионного уравнения зависимости значений степени загрязнения от расстояния до источника загрязнения достаточно высока, вследствие чего можно сделать вывод, что комбинат «Североникель» является основным источником поступления ТМ на водосборы озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл. Высокие значения степени загрязнения отмечены в озерах на

расстоянии до 40 км от комбината «Североникель», хотя и в более удаленных озерах также отмечено высокое загрязнение. Это, в первую очередь, озера, принимающие стоки промышленных предприятий: Ковдор (Ковдорский ГОК), Большой Вудъявр (ОАО «Апатит»).

Наибольшие величины коэффициента загрязнения в озерах вблизи комбината «Североникель» имеют приоритетные загрязняющие ТМ — Ni, Cu и Co. В озерах, удаленных на расстояние более 40 км, наибольшие величины коэффициента загрязнения отмечены для Pb. Существенное загрязнение также оказывают другие исследуемые халькофильные элементы — Cd, Hg, As. Величины коэффициентов загрязнения этими элементами для более чем половины озер относятся к значительным и высоким по классификации [30]. Приоритетные для Мурманской обл. загрязняющие ТМ в преобладающем большинстве озер на расстоянии более 40 км от комбината «Североникель» имеют умеренные величины коэффициента загрязнения.

Таким образом, практически во всех исследуемых озерах зафиксировано загрязнение ДО халькофильными элементами различной степени — от умеренного до высокого, причем не всегда это напрямую связано с точечными источниками загрязнения. Хотя по зависимостям концентрации Hg в поверхностном слое ДО от удаления от комбината «Североникель» можно предположить, что он также является одним из источников поступления этого халькофильного элемента в озера. В ранних работах [16–20, 26] было также установлено, что загрязнение халькофильными элементами в основном носит глобальный характер, в отличие от других ТМ, таких как Ni, Cu, Co, загрязнение которыми воды и ДО озер явно проявляется в радиусе нескольких десятков километров от основного источника загрязнения — комбината «Североникель».

### **Заключение**

Центральная и юго-западная часть Мурманской обл. представлены в основном водосборами двух рек — Туломы и Нивы. Эта часть Мурманской обл., особенно водосбор р. Нива, индустриально интенсивно развита. Здесь располагаются главные источники загрязнения Мурманской обл., оказывающие большое влияние на формирование химического состава современных ДО. Геохимический состав подстилающих коренных и четвертичных пород, воздушные переносы из соседних территорий, а также морфометрические характеристики озер являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых слоев ДО озер. В целом средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. подобны или ниже, чем в малых озерах Мурманской обл., определенные в результате предыдущих исследований. В ДО исследуемых водоемов, особенно на водосборе р. Нива, выявлено увеличение содержания ТМ в направлении к поверхности ДО. Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–5 см ДО. В озерах, принимающих сточные воды промышленных предприятий, ДО загрязнены на глубину до 15 см. В мелких озерах с высокой трофностью и высоким содержанием органического материала скорости седиментации повышены, и в них загрязнены верхние 10 см ДО. Водосбор р. Нива характеризуется более высоким уровнем антропогенной нагрузки, чем водосбор р. Тулома, поэтому в его водоемах средние и медианные значения концентраций ТМ в поверхностных ДО выше, чем в водоемах водосбора р. Тулома, например, Ni — в 57 и 4 раза, Cu — в 23 и 5 раз, Co — в 6 и 5 раз, Pb — в 5 и 7 раз, As — в 6 и 4 раза соответственно. Ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых ТМ Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО исследуемых озер совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Pb и Cd, являясь глобальными загрязняющими металлами, не показали зависимости концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния до источника загрязнения. Значения степени загрязнения не имеют высоких зависимостей от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской обл., где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель», а другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним. Но величина достоверности

аппроксимации регрессионного уравнения зависимости значений степени загрязнения от расстояния до источника загрязнения все же достаточно высока для того, чтобы сделать заключение, что комбинат «Североникель» является основным источником загрязнения ТМ водосборов озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл. на расстоянии до 40–50 км.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсы поверхностных вод СССР / Т. С. Антонова [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Т. 1. 316 с.
2. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Долговременные изменения биологического разнообразия водоемов Лапландского биосферного заповедника как индикаторы фоновых изменений: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2000. 279 с.
4. Подготовительный предпроектный мониторинг состояния поверхностных вод в зоне влияния ОАО «Ковдорский ГОК»: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2002. 197 с.
5. Исследование состояния северной части оз. Нюд-явр и разработка практических рекомендаций по снижению поступления загрязняющих веществ на контрольный створ: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2006. 152 с.
6. Инженерно-экологические изыскания по объекту «Внешние отвалы вскрышных пород карьера Восточного участка Южно-Кахозерского месторождения» в Оленегорском районе: отчет о НИР. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2010. 252 с.
7. Оценка современного состояния и самоочищающей способности поверхностных вод в зоне деятельности промышленных объектов ОАО «Апатит»: отчет о НИР. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2013. 273 с.
8. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / Т. И. Моисеенко [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 263 с.
9. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 1: Ковдорский район / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 234 с.
10. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 2: Озерно-речная система реки Чуна в условиях аэротехногенного загрязнения / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. 238 с.
11. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. Ч. 1. 250 с.; ч. 2. 282 с.
12. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.
13. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейны Баренцева и Белого морей и Ботнического залива Балтийского моря): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2013. Ч. 1. 298 с.; ч. 2. 253 с.
14. Даувальтер В. А., Даувальтер М. В. Геоэкологическая оценка состояния природных вод в зоне влияния комбината «Североникель». Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2014. 216 с.
15. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: в 3 ч. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2014. Ч. 1. 188 с.; ч. 2. 222 с.; ч. 3. 214 с.
16. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2015. 136 с.
17. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 101–112.
18. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 69–80.
19. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер восточной части Мурманской области бассейна Белого моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016.
20. 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 Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 1. 2012. № 2 (9). С. 54–87.
21. Trace metal pollution in Eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments / S. A. Norton, A. Henriksen, P. G. Appleby, L. L. Ludwig, D. V. Vereault, T. S. Traaen. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.
22. Trace metal pollution in Eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment / S. A. Norton, P. G. Appleby, V. Dauvalter, T. S. Traaen // NIVA-Report 41/1996. Oslo, 1996. 18 p.
23. 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.
24. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н. А. Кашулин [и др.] // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №1. С. 98–107.
25. Образование осадков в современных водоемах / Н. М. Страхов [и др.]. М.: АН СССР, 1954. 792 с.
26. 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.
27. Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environmental Reviews. 2001. Vol. 4. P. 269–298.
28. Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61.
29. Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18.
30. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

**Сведения об авторах**

*Даувальтер Владимир Андреевич* — доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН;

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Кашулин Николай Александрович* — доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией водных экосистем, заместитель директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН;

e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

**Author Affiliation**

*Vladimir A. Dauvalter* — Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Major Researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Nikolay A. Kashulin* — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory on Aquatic Ecosystems, Vice Director on Science of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;

e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Даувальтер, В. А.* Тяжелые металлы в донных отложениях озер центральной и юго-западной частей Мурманской области / *В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 73–88.

**Reference**

*Dauvalter Vladimir A., Kashulin Nikolai A.* Heavy Metals in Lake Sediments of the Central and Southwest Parts of the Murmansk Region. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 73–88. (In Russ.).