

УДК 624.131.41

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРА ФЕННОСКАНДИИ В ПОСЛЕДНИЕ СТОЛЕТИЯ

В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, Д. Б. Денисов

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН

Для изучения тенденций изменения нагрузки тяжелых металлов на водосборы озер Севера Фенноскандии и их экологического состояния были отобраны колонки донных отложений (ДО) озер приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией, находящейся в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель». В пробах ДО было проведено определение возраста по хронологии ^{210}Pb . Установлено, что средние скорости осадконакопления в исследуемых озерах довольно постоянны и находятся в пределах 0,7–1,6 мм/год. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–30-ми годами, а максимальный рост зафиксирован в 70–80-е годы прошлого столетия, как результат металлургической деятельности в этом регионе. Заметный рост концентраций Pb в датируемых ДО зафиксирован в начале 18 века. Снижение содержания Pb в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями. Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат также Hg, As и Cd, начало загрязнения которыми датируется началом-серединой 19 в.

Ключевые слова: тяжелые металлы; донные отложения; озера; Север Фенноскандии; датирование.

V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin, D. B. Denisov. TENDENCIES IN THE CONTENT CHANGE OF HEAVY METALS IN LAKE SEDIMENTS IN NORTHERN FENNO-SCANDIA OVER THE LAST CENTURIES

To study trends in the heavy metal load on lake catchments in Northern Fennoscandia and their ecological status, lake sediment cores were collected in the border area between Russia, Norway and Finland within the impact zone of the «Pechenganikel» smelter emissions. Age determination by ^{210}Pb chronology was carried out in the sediment samples. The average sedimentation rate in the studied lakes was found to be fairly constant and range within 0.7–1.6 mm/year. A rise Ni, Cu and Co levels in lake sediments was generally found in the layers dates to the 1920s–1930s, and the greatest increase happened in the 1970s–1980s as a result of mining and metal processing in the region. A marked increase in Pb concentrations in the dated sediments was recorded at the beginning of the 18th century. Pb amounts in the surface layer of the sediments have been decreasing in most of the lakes over the past one or two decades. Hg, As and Cd also serve as markers of contamination of the catchments. According to our datings, contamination by the latter elements began in the early or mid-19th century.

Keywords: heavy metals; sediments; lakes; Northern Fennoscandia; dating.

Введение

Приграничная территория между Россией, Норвегией и Финляндией испытывает серьезное антропогенное влияние, в том числе со стороны комбината «Печенганикель». Вся система пограничной реки Пасвик, а также озера и реки данного района, входящие в водосбор этой реки, подвергаются загрязнению посредством атмосферных выпадений. К основным загрязняющим веществам относятся соединения серы и тяжелых металлов (ТМ) – Ni, Cu, Cd, Zn, As, Hg и др., полициклические ароматические углеводороды и стойкие органические загрязнители. Выбросы диоксида серы приводят к закислению поверхностных вод и их загрязнению вследствие интенсификации процессов выщелачивания элементов из горных пород.

Исследование химического состава толщи ДО позволяет восстановить историю условий формирования озер, базируясь на определении фоновых значений содержания различных элементов в ДО и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Особую научную значимость они приобретают, когда известна скорость осадконакопления, что позволяет реконструировать хронологию процессов, происходивших на территории водосбора и в самом озере.

Для оценки истории регионального загрязнения водосборных бассейнов приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией начиная с 90-х годов прошлого века использовались палеолимнологические исследования, радиометрическое датирование образцов колонок ДО и определение возраста по хронологии ^{210}Pb с применением модели датирования CRS и CIC [Appleby, Oldfield, 1978]. По результатам датирования ДО были определены скорости осадконакопления, поток осадочного материала и аккумуляция отдельных элементов в ДО [Norton et al., 1992, 1996; Rognerud et al., 1993]. Хронология по ^{210}Pb с уверенностью может быть использована только до 150 лет, т. к. период полураспада этого изотопа 22 года. Возраст ДО экстраполирован далее по времени, основываясь на скорости аккумуляции в период 1850–1900 гг., и таким образом был определен качественно. Средние скорости осадконакопления за последние полтора столетия в озерах довольно постоянны и оценивались равными 0,3–1,25 мм/год.

С целью изучения изменений интенсивности антропогенной нагрузки, в том числе выбросов комбината «Печенганикель», на водосборы озер были проведены исследования по

вертикальному распределению концентраций ТМ в ДО исследуемых озер, находящихся на различном расстоянии от плавильных цехов.

Материалы и методы

Разработка печенгских медно-никелевых месторождений началась в 1932 г. совместной канадско-финской компанией (после Октябрьской революции территория нынешнего Печенгского района отошла к Финляндии до возвращения в состав СССР по окончании советско-финской войны в 1940 г.). Комбинат «Печенганикель» функционирует с 1946 г., когда в пос. Никель возобновилась переработка местных сульфидно-никелевых руд. В 1959 г. развернулась добыча руд Ждановского месторождения и их переработка на заводе в г. Заполярный. В состав выбросов комбината входят сернистый газ, Ni, Cu, пыль, а также оксиды N и оксид S (II) от котельных [Крючков, Макарова, 1989]. Начиная с 1971 г. здесь ведется переработка высокосернистой (содержание S достигает 30 %) Cu-Ni-руды Норильского горно-металлургического комбината. Максимальные выбросы основных загрязняющих веществ, в том числе ТМ, были зафиксированы в 80-е годы XX столетия. В пограничном слое атмосферы (до 1500 м) воздушные потоки переносят выбросы медно-никелевых комбинатов на дальние расстояния с запада на восток, т. е. не в направлении сопредельных западных государств [Крючков, Макарова, 1989], поэтому именно сточные воды комбината «Печенганикель», а не атмосферные выбросы – главный источник загрязнения Ni, Cu, Co и другими ТМ, выбрасываемыми комбинатом, нижнего течения р. Пасвик. За 80-летнюю историю деятельности комбината в водоемы и в атмосферу отправлены миллионы тонн сернистого газа, тысячи тонн Ni, Cu, Co и других сопутствующих ТМ.

В рамках проекта «Коларктик» для изучения экологического состояния озер и изменений интенсивности антропогенной нагрузки на приграничную территорию между Россией, Норвегией и Финляндией в 2012–2013 годах были отобраны колонки ДО из 16 озер (рис. 1).

Колонки ДО взяты в наиболее глубоких местах исследуемых водоемов отборником колонок ДО открытого гравитационного типа (внутренний диаметр 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник изготовлен из плексигласа по образцу, разработанному Скогхеймом [Skogheim, 1979], он позволяет транспортировать колонки ненарушенными для дальнейшего использования. Длина колонок

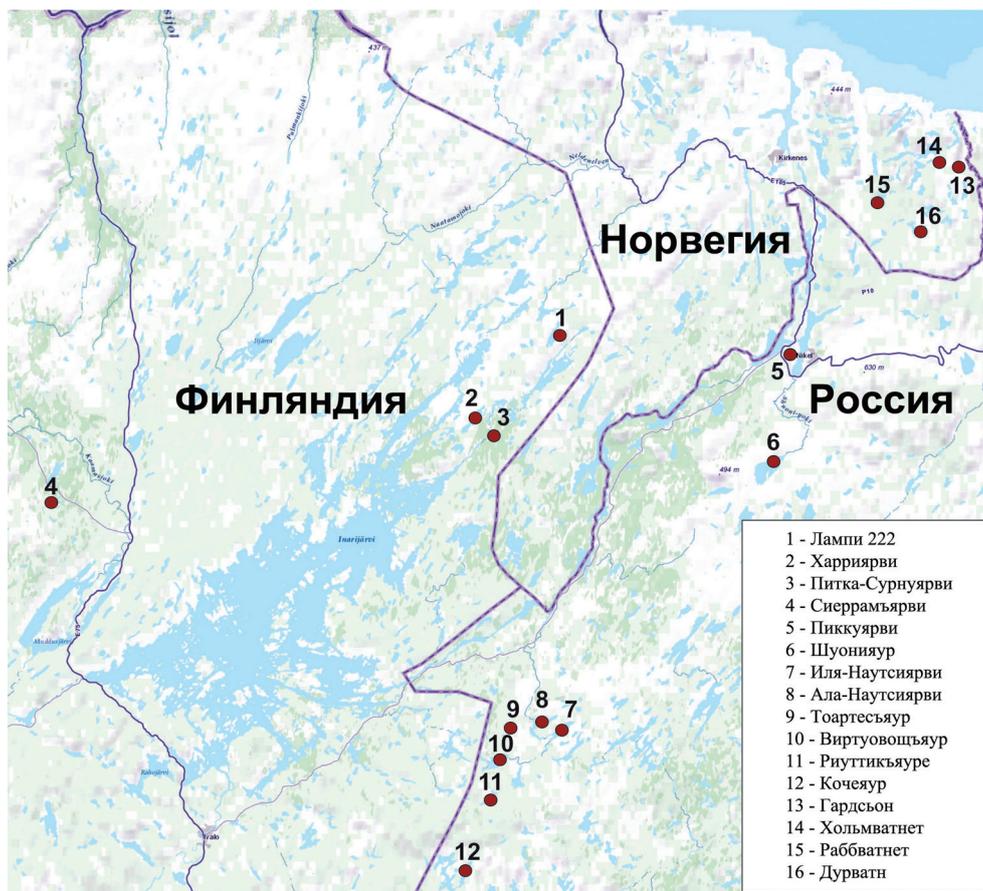


Рис. 1. Схема расположения исследуемых озер пограничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией (2012–2013 гг.)

ДО составляла от 15 до 45 см, в зависимости от условий их формирования и физико-химических особенностей. Колонки ДО были разделены на слои по 1 см, помещены в полиэтиленовые контейнеры и отправлены для анализа в лабораторию, где хранились при температуре 4 °С до анализа. Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение потерь при прокаливании) и определение содержания элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Hg, Mn, Fe, Ca, Mg, Na, K, Al, Cr, P, Sr) проводились в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН. Подробно методика определения содержания элементов описана ранее [Даувальтер и др., 2012; Даувальтер, 2012].

Для оценки долговременных изменений, происходивших на водосборной площади озерно-речной системы Пасвик, использовались данные хемотратиграфических анализов ДО малых озер. Палеоэкологические исследования и реконструкция истории развития водных экосистем невозможна без корректной оценки скоростей осадконакопления, позволяющей определить возраст исследуемых ДО. Анализ

содержания радионуклидов и расчет средних скоростей осадконакопления был выполнен для шести исследуемых озер в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН. Определение активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{210}Pb в пробах ДО проводили с использованием метода неструктивной гамма-спектрометрии на низкофоновом гамма-спектрометре Canberra Industries с полупроводниковым детектором на основе особо чистого Ge с активным диаметром 70 мм и толщиной 25 мм. Рассчитанные величины абсолютных скоростей седиментации шести водоемов указаны в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Главным источником поступления Ni, Cu, Co и других ТМ в окружающую среду приграничной территории является комбинат «Печенганикель». Это ясно из исследований водных и наземных экосистем региона [Rognerud, 1990; Traaen et al., 1991; Dauvalter, 1992, 1994, 1998, 2003; Rognerud, Fjeld, 1993; Rognerud et al., 1993, 1998, 2013; Åjrås et al., 1995, 1997; Moiseenko et al., 1995; Даувальтер, 1995, 1997,

Таблица 1. Рассчитанные величины абсолютных скоростей осадконакопления исследованных водоемов

Озеро	Длина колонки ДО, мм	Скорость седиментации, мм/ год	Примерный возраст колонки ДО, лет
Кочеяур	160	1,5	106
Виртуовощъяур	180	0,7	257
Шуонияур	140	0,7	210
Ала-Наутсиярви	175	1,6	106
Харриярви	300	1,3	240
Раббватнет	440	0,65	687

1998, 1999, 2002, 2012; Cariat et al., 1996a, b; Gregurek et al., 1999; Reimann et al., 1999; Dauvalter, Rognerud, 2001; Lukin et al., 2003; Dauvalter, Sandimirov, 2007; Kashulin et al., 2008; Current State..., 2008; Кашулин и др., 2009; Барышев, 2010; Dauvalter et al., 2011]. Увеличение концентраций и скоростей аккумуляции ТМ датируется за десятилетие до начала индустриальной деятельности комбината «Печенганикель». Увеличение обычно обнаруживалось в ДО, датированных 1920–30-ми годами [Rognerud et al., 1993; Norton et al., 1996]. Этому явлению существует три объяснения. Во-первых, региональное загрязнение Со, Си и Ni, возможно, существовало как результат деятельности металлургических предприятий в промышленных районах России. До 1940 г. Печенгский район был территорией Финляндии, где уже начала осваиваться рудничная база. В начале 20 в. началась разработка железорудного месторождения Бьорневатн, расположенного в нескольких километрах от комбината на другом берегу р. Пасвик. Во-вторых, ТМ из водной толщи озер могут оседать и перераспределяться в ДО, которые датируются временем до начала антропогенных нагрузок. Такие диагенетические процессы уже описывались для Zn [Carignan, Tessier, 1985] и других ТМ. И в-третьих, в ДО, датированных 20–30-ми годами прошлого столетия, возрастает содержание органического вещества (в оз. Дальватн значения ППП увеличиваются с 29 до 38 %, в оз. Дурватн – с 27 до 30 %), что является существенной причиной увеличения адсорбции ТМ осадками [Norton et al., 1992]. Синхронность повышения к поверхности концентраций ТМ в ДО изолированных озер, имеющих сходную геохимическую природу, вероятно, указывает на то, что атмосферные выпадения, а не специфические процессы водосбора, являются причиной повышенной аккумуляции ТМ.

Настоящими исследованиями установлено, что наиболее загрязненными одним из приоритетных загрязняющих ТМ – медью – являются российские озера (Пиккуярви, Шуонияур), расположенные ближе к источнику выбросов этого

металла (комбинату «Печенганикель»), а также все исследуемые норвежские озера Ярфьорда, испытывающие интенсивное атмосферное загрязнение выбросами плавильных цехов комбината. Вертикальное распределение Си в ДО этих озер говорит о главенствующей роли атмосферных выбросов комбината «Печенганикель» в их загрязнении. Увеличение содержания меди в поверхностных слоях ДО зафиксировано также и в озерах Иля-Наутсиярви и Виртуовощъяур, расположенных в 80 и 90 км от плавильных цехов соответственно. Все финляндские озера и оставшиеся российские озера не показали загрязнения поверхностных слоев ДО.

Увеличение содержания Си в колонках ДО зафиксировано в 70–80-х годах прошлого столетия в российских озерах, расположенных как вблизи комбината (Шуонияур), так и на удалении около 100 км (Виртуовощъяур, Кочеяур). Наиболее интересными получились результаты по длинной колонке из норвежского озера Раббватнет – первое заметное увеличение содержания Си датируется серединой 17 века, что, вероятно, связано с началом индустриальной революции в европейских странах, увеличением атмосферных выбросов ТМ и их воздушной миграцией в направлении Арктики (рис. 2). Следующее увеличение содержания Си происходило в 19 веке, особенно во второй половине, что вызвано, возможно, индустриализацией в Европе, в том числе и в европейской части России. С этого времени концентрации меди все более увеличиваются, и особенно интенсивный рост ее содержания связан с началом медно-никелевого производства в Печенгском районе (в 30-е годы 20 века), а также с началом разработки железорудного месторождения Бьорневатн (в начале 20 века). Стремительный рост содержания Си в 1970–80-е годы обусловлен началом переработки норильской руды и интенсификацией медно-никелевого производства. В последние два десятилетия производство упало после распада СССР, но концентрации Си в ДО оз. Раббватнет (так же как и в российских озерах Шуонияур, Виртуовощъяур, Кочеяур) только увеличиваются, что

объясняется аккумуляцией ТМ на территории водосборов озер [Даувальтер и др., 2012].

В российских озерах (Пиккуярви, Шуонияур), расположенных ближе к источнику выбросов (комбинату «Печенганикель»), наблюдается увеличение концентраций Ni в поверхностных слоях ДО, так же как и описанное ранее повышение концентраций Cu. Все исследуемые норвежские озера Ярфьорда, испытывающие интенсивное атмосферное загрязнение выбросами плавильных цехов комбината, показывают увеличение содержания Ni в поверхностных слоях ДО. Увеличение его содержания в поверхностных 2 см ДО зафиксировано также и в других российских озерах Риуттикияуре и Виртуовощьяур, расположенных в 90 км от плавильных цехов. В отличие от ситуации с медью во всех финляндских озерах, в том числе и в Сиеррамъярви (более 130 км от комбината), отмечается увеличение содержания Ni в поверхностных 2–3 см ДО.

Увеличение содержания Ni (так же как и Cu) в колонках ДО зафиксировано в 70–80-х годах прошлого столетия в российских озерах (рис. 3), расположенных как вблизи комбината (Шуонияур), так и на удалении около 100 км (Виртуовощьяур). Заметное увеличение содержания

Ni в длинной колонке ДО норвежского озера Раббватнет датируется 17-м веком, что, вероятно, связано (как и в случае с Cu) с началом промышленной революции в европейских странах, увеличением выбросов ТМ в окружающую среду и их воздушной миграцией в направлении Арктики (см. рис. 3). Следующее увеличение содержания Ni датируется серединой 19 века, что вызвано, возможно, индустриализацией в Европе, в том числе и в европейской части России. С этого времени концентрации Ni постепенно увеличиваются. Интенсивный рост содержания Ni в начале 20 века связан с освоением медно-никелевых месторождений в Печенгском районе и железорудного месторождения Бьорневатн в Сер-Варангере, однако в середине 20 века происходит практически двукратный спад содержания Ni во время снижения производства в годы Второй мировой войны. Начало переработки норильской руды и интенсивный рост медно-никелевого производства на комбинате «Печенганикель» вызвали стремительный рост содержания Ni в 70–80-е годы 20 века. В последние два десятилетия производство упало после распада СССР, но концентрации Ni в ДО оз. Раббватнет (как и в российских озерах Шуонияур, Виртуовощьяур) только

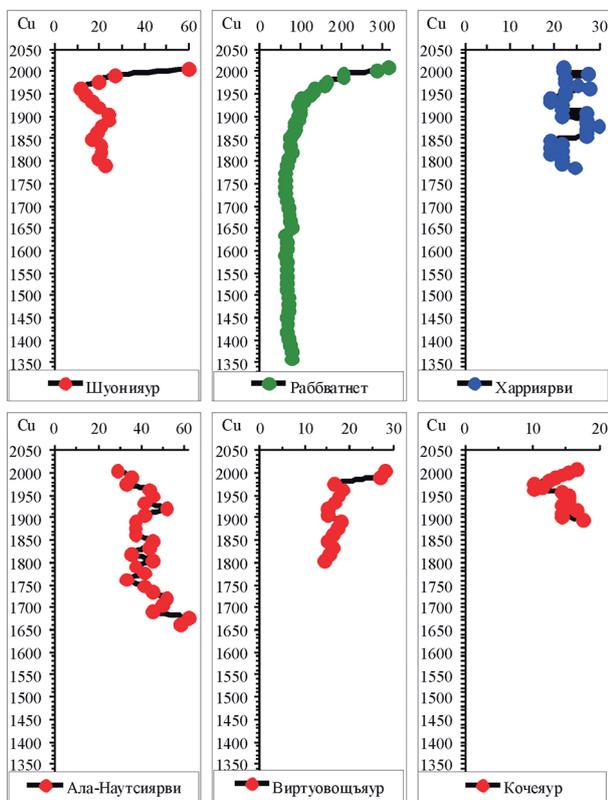


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Cu (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

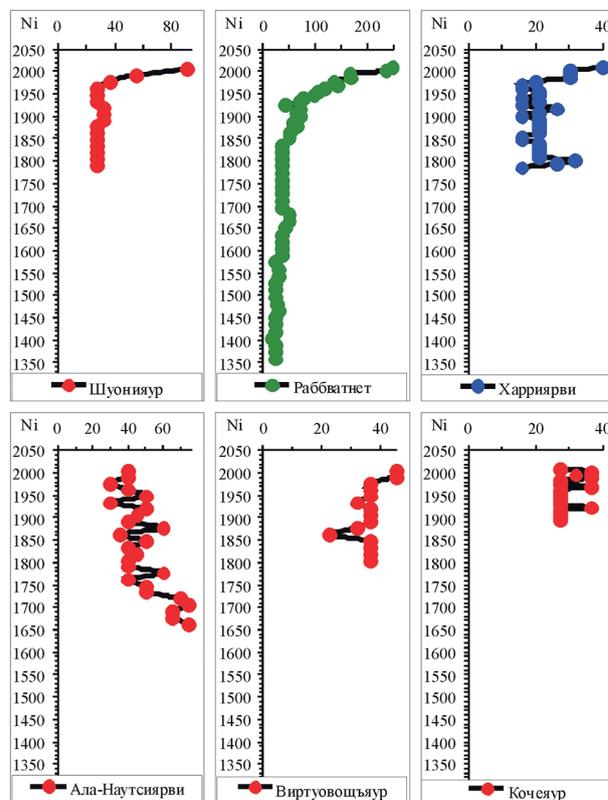


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций Ni (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

увеличиваются, что объясняется аккумуляцией ТМ, в том числе и Ni, на территории водосборов озер [Даувальтер и др., 2012].

В вертикальном распределении содержания Co в ДО исследуемых водоемов обнаружено увеличение концентраций в поверхностных слоях всех норвежских озер, а также российских, расположенных близко к комбинату «Печенганикель» (Пиккуярви и Шуонияур). Кроме того, зафиксировано значительное повышение концентраций Co в слое 6–7 см ДО озера Лампи 222, ближе других из финляндских озер расположенного к комбинату. В остальных исследуемых водоемах проявляется тенденция уменьшения содержания Co по направлению к поверхности ДО.

В датируемой колонке ДО норвежского озера Раббватнет четко отмечается период снижения содержания Co к началу 20 века (рис. 4), после которого концентрации Co постоянно увеличивались до максимальных значений в начале 21 века, а затем к поверхности ДО содержание Co немного уменьшается. В оз. Шуонияур увеличение содержания Co датируется 70-ми годами прошлого века, когда на комбинате приступили к переработке норильской руды. Одновременное увеличение

содержания кобальта зафиксировано и в ДО оз. Виртуовощьяур.

Повышенное содержание и скорость аккумуляции Ni, Cu и Co в ДО, датированных последним столетием, в российских и норвежских озерах зафиксированы и предыдущими исследованиями [Norton et al., 1992, 1996; Rognerud et al., 1993].

В вертикальном распределении содержания Zn в ДО исследуемых озер не обнаружено увеличения концентрации в поверхностных слоях, за исключением российского озера Пиккуярви, близко расположенного к комбинату «Печенганикель» (в 5 км на запад). Зафиксировано также незначительное повышение концентрации Zn к поверхности ДО в озерах Виртуовощьяур (с начала 20 века, рис. 5) и Гардсьон, а также в приповерхностном слое 1–2 см оз. Риуттияуре.

В большей части исследуемых озер отмечается тенденция снижения содержания Zn к поверхности ДО (см. рис. 5). Вероятно, это связано с геохимическими особенностями данного ТМ, такими как довольно высокая миграционная подвижность, чуткая реакция его на изменения физико-химических условий в водоеме и на водосборе озер (в первую очередь снижение

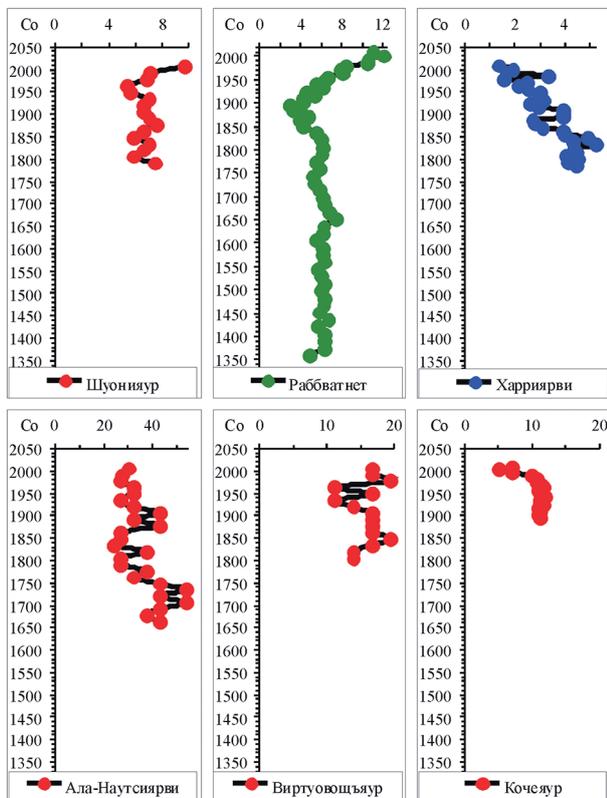


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций Co (мкг/г сухого веса) в датируемых ДО исследуемых озер

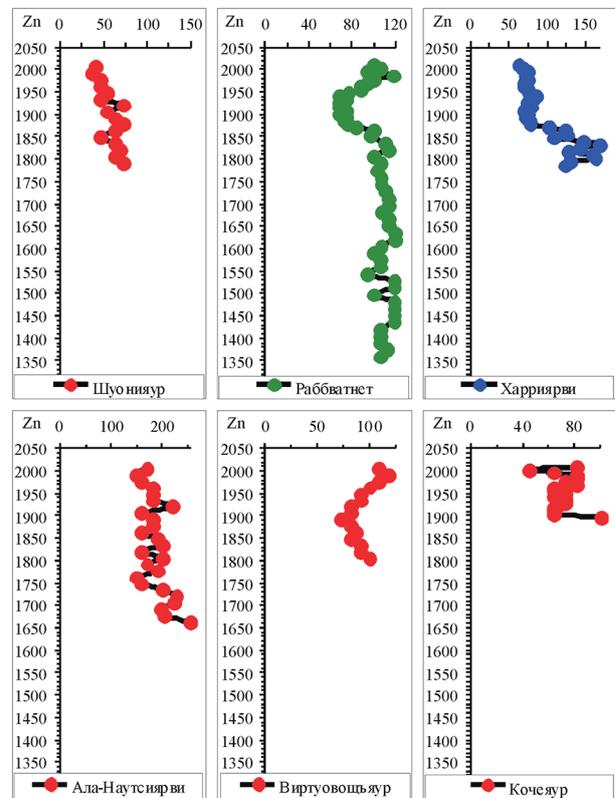


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций Zn (мкг/г сухого веса) в датируемых ДО исследуемых озер

величины pH и проявляющееся закисление), повышенная (по сравнению с другими ТМ) потребность живых организмов в этом металле и т. д.

В датированной колонке ДО норвежского озера Раббватнет четко отмечается период двукратного снижения содержания Zn в период с середины 19-го до середины 20 века (см. рис. 5), после которого концентрации его увеличились до максимальных значений в 80-х годах 20 века (по времени этот период совпадает с максимальным производством ТМ на комбинате «Печенганикель»), а затем к поверхности ДО концентрации Zn вновь уменьшаются.

Халькофильные высокотоксичные элементы Cd, Pb, As и Hg в последние десятилетия рассматриваются многими экологами как глобальные элементы-загрязнители [например, Расуна, Расуна, 2001]. В толще ДО подавляющего большинства исследуемых озер отмечается тенденция увеличения содержания Cd по направлению к их поверхности. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 5 см) более половины озер происходит снижение содержания Cd. Этот факт зафиксирован в финляндских и норвежских озерах, а также в российских, наиболее удаленных от металлургического производства. В озерах Пиккуярви, Иля-Наутсиярви

и Дурватн происходит постепенное увеличение концентраций Cd, и максимальное содержание отмечается в поверхностном слое.

Заметный рост концентраций Cd в датированных ДО исследуемых озер зафиксирован в начале 20 века (рис. 6), но особенное увеличение его содержания в середине прошлого века связано с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны (в озерах, удаленных от основного источника загрязнения комбината «Печенганикель» на сто километров, – Кочеяур и Виртуовощьяур) и возобновлением металлургического производства на комбинате (в озерах, находящихся в зоне влияния воздушных выбросов, – Раббватнет). Снижение содержания Cd в поверхностном слое датированных ДО зафиксировано во всех исследуемых озерах и относится к одному-двум десятилетиям, что может быть связано как со снижением производства ТМ после распада СССР, так и со снижением глобально-го выброса кадмия в последние десятилетия.

Во всех без исключения исследуемых озерах отмечается увеличение содержания Pb по направлению к поверхности ДО, вне зависимости от того, расположены озера вблизи точечных источников загрязнения или находятся

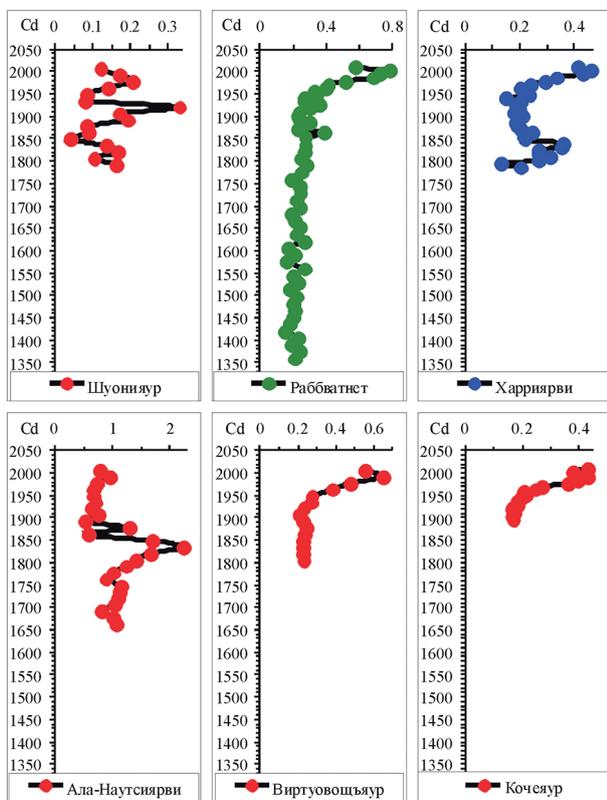


Рис. 6. Вертикальное распределение концентраций Cd (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

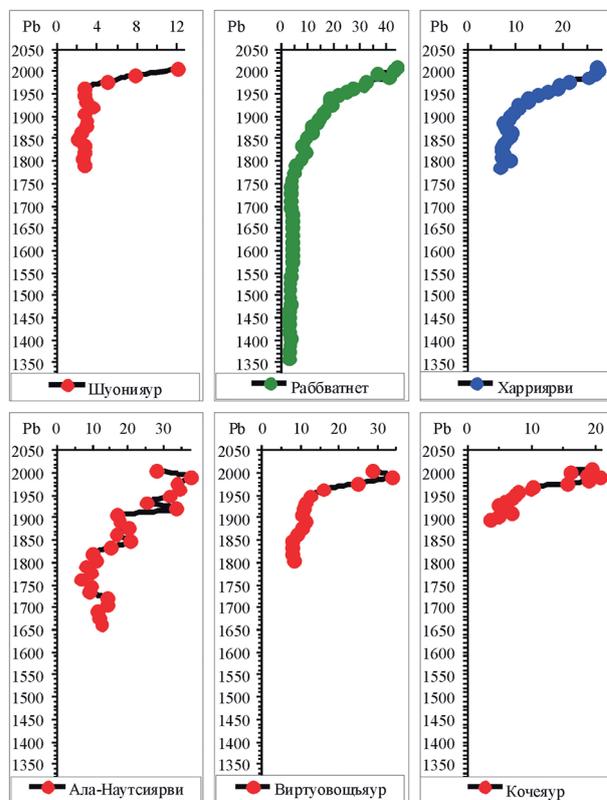


Рис. 7. Вертикальное распределение концентраций Pb (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

на значительном удалении от них. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) половины озер происходит снижение содержания Pb. Этот факт зафиксирован в финляндских и норвежских водоемах, а также в российских, наиболее удаленных от металлургического производства. В других озерах происходит постепенное увеличение концентраций Pb, и максимальные содержания отмечаются в поверхностном слое.

Заметный рост концентрации Pb в датированных ДО оз. Раббватнет зафиксирован в середине 18 века (рис. 7), что может быть связано с развитием индустриальной революции в европейских странах. С этого времени происходит постоянное увеличение содержания свинца вследствие усиления металлургического производства. Особенно заметное увеличение содержания Pb в ДО всех датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны, в том числе с усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания Pb в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве

исследуемых озер и датируется одним-двумя десятилетиями, что может быть связано как со снижением производства ТМ после распада СССР, так и со снижением глобального выброса свинца в последние десятилетия. Возможно, основной причиной снижения его содержания в последние годы является запрещение использования этилированного бензина вначале в европейских странах, а затем и в России.

Увеличение содержания Pb в ДО исследуемых озер датируется временем, слишком ранним, чтобы быть связанным с индустриальной деятельностью в этом регионе. Имеются данные по ДО озер южной части Швеции об атмосферном загрязнении Pb в результате его интенсивного производства и использования в Европе начиная со времен древнегреческой и древнеримской цивилизаций [Renberg et al., 1994]. Отмечено, что атмосферные выпадения Pb увеличились по сравнению с фоновыми значениями более чем 2600 лет назад (на глубине ДО от 1,5 до 4 м). Существует незначительное, но заметное увеличение осадения Pb около 2000 лет назад, более существенное увеличение началось примерно 1000 лет назад, ускоренная аккумуляция стала происходить в 19-м и особенно в 20 веке. Максимальная аккумуляция приходится на 1970-е годы.

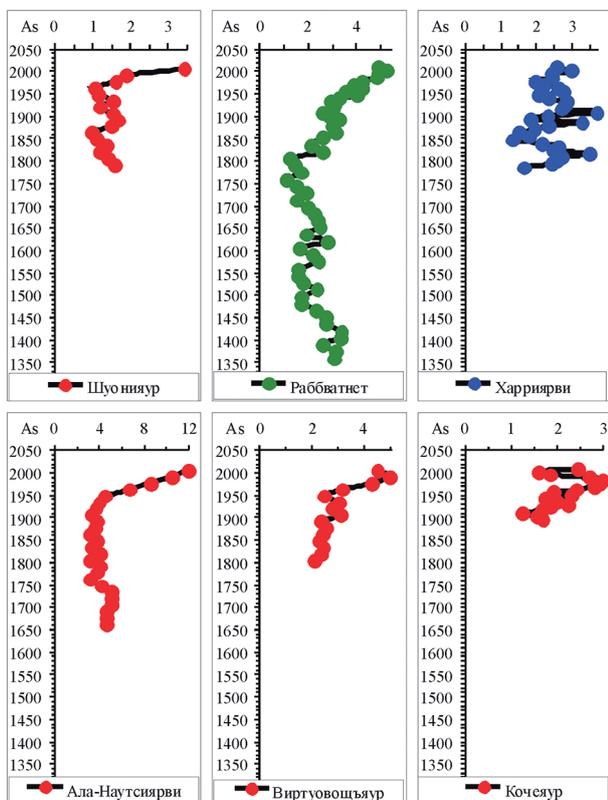


Рис. 8. Вертикальное распределение концентраций As (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

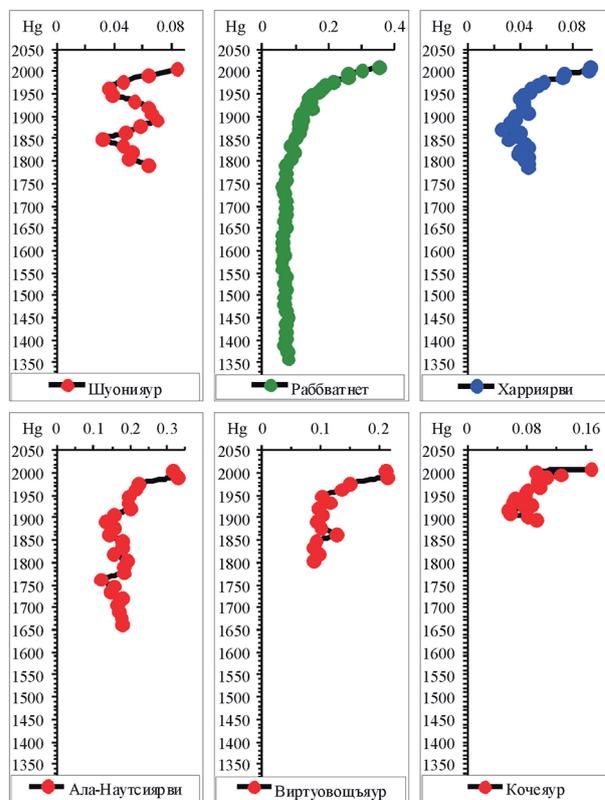


Рис. 9. Вертикальное распределение концентраций Hg (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

До индустриализации 19 в. концентрации свинца в ДО озер южной части Швеции уже увеличились в результате атмосферных выпадений в 10–30 раз по сравнению с фоновым уровнем. Фоновые концентрации Pb (на глубине ДО более 1 м) в 19 шведских озерах находились в пределах от 2 до 15 мкг/г (сух. веса), но обычно были менее 10 мкг/г [Renberg et al., 1994]. Эти значения совпадают с нашими исследованиями фоновых значений. В Северной Америке скорость аккумуляции Pb в ДО озер увеличивается последовательно с 1850–70-х до 1980-х годов и затем уменьшается до настоящего времени [Norton et al., 1990]. В Европе увеличение подобно вышеописанному, но резкое увеличение начинается на 50–70 лет раньше. Свинец антропогенного происхождения имеет много источников, включая металлургию, стекольные заводы и использование тетраэтила Pb как антидетонационной добавки к бензину. Прекращение использования последнего вызвало снижение объема выпадений Pb в Северной Америке и Европе. Увеличение его концентраций может быть связано с трансграничным переносом Pb из источников в Северной Америке и южных регионах Европы. Аккумуляция Pb в ДО озер северных регионов Норвегии меньше, чем южных [Norton, Hess, 1980] или юга Северной Америки [Norton et al., 1990].

Отмечается увеличение содержания As по направлению к поверхности ДО подавляющего большинства исследуемых водоемов, за исключением двух озер – Харриярви и Тоартесьяур. Максимальное содержание элемента зафиксировано в поверхностном слое колонок ДО большинства озер – всех норвежских, российских, расположенных ближе к комбинату, а также финляндских озер Сиеррамъярви и Лампи 222. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) четырех озер, как правило, более удаленных от точечного источника загрязнения (комбината «Печенганикель»), происходит снижение содержания As, что может говорить о последствии снижения глобального выброса этого опасного для окружающей среды халькофильного элемента.

В датированных ДО оз. Раббватнет заметный рост концентраций As зафиксирован в начале 19 века (рис. 8), что может быть связано с развитием промышленности в европейских странах. До этого времени зафиксировано постоянное снижение содержания As с самых глубоких слоев ДО, начиная с 14 века. В течение 19 и 20 столетий происходит постоянное увеличение содержания данного элемента вследствие повышения промышленного производства, в том числе и As. Особенно заметное увеличение его содержания в ДО всех

датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности после Второй мировой войны, возрастающим использованием As в металлургии и возобновлением металлургического производства на комбинате. Снижение содержания As в поверхностном слое ДО некоторых исследуемых озер датируется одним-двумя десятилетиями. Это может быть связано как со снижением металлургического производства после распада СССР, так и с уменьшением глобального выброса As в последние десятилетия. Возможно, причиной снижения содержания As в последние десятилетия является запрещение его использования в европейских странах, в том числе и в России, в медицинских целях, главным образом в стоматологии.

Увеличение содержания Hg по направлению к поверхности ДО отмечается во всех исследуемых озерах, за исключением оз. Тоартесьяур. Максимальное содержание Hg зафиксировано в поверхностном слое ДО большинства озер – всех норвежских озер, российских озер Кочезяур и Иля-Наутсиярви, расположенных дальше от комбината, а также финляндских озер Харриярви и Лампи 222. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) шести озер происходит уменьшение содержания Hg, что может говорить о последствии снижения глобального выброса этого очень опасного для окружающей среды халькофильного элемента.

Заметный рост концентрации Hg в датированных ДО оз. Раббватнет зафиксирован, так же как и As, в начале 19 века (рис. 9), что может быть связано с развитием индустриальной революции в европейских странах. До этого времени зафиксировано довольно стабильное содержание Hg (0,06–0,08 мкг/г). В течение 19 и 20 столетий происходит постоянное увеличение содержания вследствие повышения промышленного производства, в том числе и Hg, применения соединений Hg в различных целях – в медицине, в технике, в сельском хозяйстве при производстве пестицидов. Особенно заметное увеличение содержания Hg в ДО всех датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны, с усиливающимся сжиганием топлива – в первую очередь угля, который содержит относительно высокие концентрации Hg, – в металлургии, с возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания Hg в поверхностном слое ДО некоторых исследуемых озер датируется одним-двумя десятилетиями. Это может быть связано со снижением металлургического

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции (r) между концентрациями ТМ и глубины слоя ДО в оз. Раббватнет

	Слой	Cu	Ni	Co	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Слой	1,00								
Cu	-0,60	1,00							
Ni	-0,70	0,98	1,00						
Co	-0,20	0,78	0,75	1,00					
Zn	0,61	-0,17	-0,24	0,33	1,00				
Cd	-0,63	0,90	0,90	0,75	-0,11	1,00			
Pb	-0,78	0,93	0,96	0,65	-0,38	0,90	1,00		
As	-0,49	0,82	0,81	0,57	-0,30	0,78	0,85	1,00	
Hg	-0,71	0,97	0,97	0,69	-0,32	0,91	0,98	0,85	1,00

Примечание. Корреляционная связь достоверно устанавливается при $r > 0,35$ ($p < 0,01$) при выборке $n = 53$.

производства после распада СССР, уменьшением глобального выброса Hg вследствие понимания чрезвычайно высокой опасности этого металла. Возможно, причиной снижения содержания Hg в последние десятилетия является утилизация бытовой техники, содержащей Hg, в первую очередь ртутьсодержащих ламп.

С целью выявления общих закономерностей распределения ТМ в ДО исследуемых озер был проведен корреляционный анализ результатов исследования оз. Раббватнет (табл. 2), по которому, как уже было сказано, отобрана самая длинная колонка ДО и имеется наибольший массив данных. Озеро расположено в 30 км в направлении преобладающих ветров от основных производственных площадок (плавильные цеха, цеха обжига руды и получения файнштейна) комбината «Печенганикель». Трансграничные переносы воздушных масс из стран Западной Европы также оказывают непосредственное влияние на формирование химического состава ДО озера. В толще ДО оз. Раббватнет наблюдается увеличение концентраций по направлению к поверхности ДО всех исследованных металлов, что отражено в высоких отрицательных значениях коэффициента корреляции содержания металлов с глубиной слоя ДО. Исключение составляет Zn, для которого отмечены отрицательные, довольно низкие, величины коэффициента корреляции с другими ТМ. Высокие значения коэффициентов корреляции зафиксированы между Ni, Cu и Co, главным источником поступления которых являются атмосферные выбросы комбината «Печенганикель». Вышеназванные металлы коррелируют также с халькофильными металлами Cd, Pb, As, Hg, поступление которых связано с глобальным загрязнением и атмосферными выбросами этих элементов из многочисленных источников загрязнения.

Выводы

Средние скорости осадконакопления в исследуемых озерах приграничной территории

между Россией, Норвегией и Финляндией довольно постоянны и находятся в пределах 0,7–1,6 мм/год. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–30-ми годами, а максимальный рост зафиксирован в 70–80-е годы прошлого столетия, во время максимального производства и наибольших атмосферных выбросов ТМ. Заметный рост концентраций Pb в ДО зафиксирован в начале 18 века, что, вероятно, связано с индустриальной революцией в европейских странах, увеличением атмосферных выбросов в окружающую среду и воздушной миграцией в направлении Арктики. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для финляндских озер. Заметное увеличение содержания исследуемых ТМ, за исключением Zn, произошло в середине прошлого века, что связано с интенсивным развитием промышленности после Второй мировой войны, все усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания халькофильных элементов (Cd, Pb, As) в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями. Вероятно, это связано с уменьшением выбросов и осознанием высокой опасности этих токсичных элементов.

Литература

- Барышев И. А. Формирование зообентоса пороговых участков рек северо-западной части Мурманской области в зоне повышенных концентраций тяжелых металлов // Труды КарНЦ РАН. 2010. № 1. С. 105–112.
- Даувальтер В. А. Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных

объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 24–35.

Даува́льтер В. А. Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. 1997. № 6. С. 43–53.

Даува́льтер В. А. Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500.

Даува́льтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 52 с.

Даува́льтер В. А. Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002, № 4. С. 65–73.

Даува́льтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Мурманский гос. техн. ун-т, 2012. 242 с.

Даува́льтер 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 НЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2012. Вып. 1, № 2 (9). С. 54–87.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даува́льтер В. А. и др. Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. I. 226 с. Ч. II. 262 с.

Крючков В. В., Макарова Т. Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: КНЦ, 1989. 96 с.

Åjräs M., de Cariat P., Chekushin V. A. et al. Ecological investigation, Kola Peninsula: sulfur and trace element contents in snow // Water, Air, Soil Pollut. 1995. Vol. 85. P. 749–754.

Åjräs M., Pavlov V. A., Reimann C. Comparison of sulfur and heavy metal contents and their regional distribution in humus and moss samples from vicinity of Nikel and Zapoljarnij, Kola Peninsula, Russia // Water, Air, Soil Pollut. 1997. Vol. 98. P. 361–380.

Appleby P. G., Oldfield F. The calculation of the ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to sediments // Catena. 1978. Vol. 5. P. 1–8.

de Cariat P., Reimann C., Åjräs M. et al. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 1. Element levels and sources // Appl. Geochem. 1996a. Vol. 2. P. 149–168.

de Cariat P., Reimann C., Åjräs M. et al. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 2. Time-series // Appl. Geochem. 1996b. Vol. 2. P. 169–184.

Carignan R., Tessier A. Zinc deposition in acid lakes: the role of diffusion // Science. 1985. Vol. 228. P. 1524–1526.

Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern

Fennoscandia // Working Paper of the Finnish Forest Research Institute. Eds. J. Derome, T. Myking, P. A. Aarstad. 2008. Vol. 85. 98 p.

Dauvalter V. Concentrations of heavy metals in superficial lake sediments of Pechenga district, Murmansk region, Russia // Vatten. 1992. Vol. 48, No. 2. P. 141–145.

Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula, Russia // Sci. Tot. Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61.

Dauvalter V. A. Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system // Water Resources. 1998. Vol. 25, No. 4. P. 451–457.

Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.

Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, No 1. P. 9–18.

Dauvalter V., Sandimirov S. Pollution of the Sediments of the Paz River basin / Eds. Stebel K., Chritensen G., Derome J., Grekela I. State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area. The Finnish Environment. 2007. No. 6. 55 p.

Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S. et al. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // J. Environ. Sci. Health, 2011. Part A. Vol. 46, iss 9. P. 1020–1033.

Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A. et al. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia // Miner. Petrol. 1999. Vol. 65. P. 87–111.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S. et al. Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area. Jyväskylä, Finland: Kopijyva Oy, 2008. 313 p.

Lukin A., Dauvalter V., Kashulin N. et al. Assessment of copper-nickel industry impact on a subarctic lake ecosystem // Sci. Tot. Environ. 2003. Vol. 306. P. 73–83.

Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Rodyushkin I. V. et al. Airborne contaminants by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) // Sci. Tot. Environ. 1995. Vol. 160–161. P. 715–727.

Norton S. A., Hess C. T. Atmospheric deposition in Norway during the last 300 years as recorded in SNSF lake sediments: I. Sediment dating and chemical stratigraphy // Proc. Intern. Ecol. Impact of Acidic Precipitation, SNSF-project, Sandefjorden, Norway, 1980. P. 274–275.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. et al. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments (Eds. S. E. Lindberg et al). Sources, Deposition and Capony Interactions. Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990. Vol. III. P. 73–101.

Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G. et al. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.

Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by

studies of lake sediment // NIVA-Report 41/1996, Oslo, 1996. 18 p.

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environ. Rev. 2001. Vol. 4. P. 269–298.

Reimann C., Banks D., Bogatyrev I. et al. Lake water geochemistry on the western Kola Peninsula, north-west Russia // Appl. Geochem. 1999. Vol. 14. P. 787–805.

Renberg I., Persson M. W., Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments // Nature. 1994. Vol. 368. P. 323–326.

Rognerud S. Sedimentundersøkelser i Pasvikela høsten 1989. Oslo: NIVA-Rapport 401/90, 1990. 10 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.

Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway // AMBIO. 1993. Vol. 22, No 4. P. 206–212.

Rognerud S., Skotvold T., Fjeld E. et al. Concentrations of trace elements in recent and preindustrial sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1998. Vol. 55. P. 1512–1523.

Rognerud S., Dauvalter V. A., Fjeld E. et al. Spatial Trends of Trace-Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni–Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic // AMBIO. 2013. Vol. 42, No. 6. P. 724–736.

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

Traaen T. S., Moiseenko T., Dauvalter V. et al. Acidification of surface waters, nickel and copper in water and lake sediments in the Russian-Norwegian border areas. Working Group for Water and Environmental Problems under the Norwegian-Soviet Environmental Protection Commission. Oslo and Apatity, 1991. 20 p.

Поступила в редакцию 15.12.2014

References

Baryshev I. A. Formirovanie zoobentosa porogovykh uchastkov rek severo-zapadnoi chasti Murmanskoi oblasti v zone povyshennykh kontsentratsii tyazhelykh metallov [Formation of zoobenthos in river rapids in the North-West of the Murmansk region under heavy metal impact]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of KarRC RAS]*. 2010. No 1. P. 105–112.

Dauval'ter V. A. Kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Kol'skogo poluoostrova kak indikator zagryazneniya vodnykh ekosistem [Heavy metal concentration in lake sediments of the Kola Peninsula as an indicator of aquatic ecosystems pollution]. *Problemy khimicheskogo i biologicheskogo monitoringa ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ob'ektov Kol'skogo Severa [Problems of chemical, biological and ecological state of water bodies of the Kola North]*. Apatity: KNTs RAN, 1995. P. 24–35.

Dauval'ter V. A. Zagryaznenie donnykh otlozhenii vodobora reki Pasvik tyazhelymi metallami [Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik River drainage]. *Geoekologiya*. 1997. No 6. P. 43–53.

Dauval'ter V. A. Tyazhelye metally v donnykh otlozheniyakh ozerno-rechnoi sistemy ozero Inari – reka Pasvik [Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system]. *Vod. Resursy [Water resources]*. 1998. Vol. 25, No 4. P. 494–500.

Dauval'ter V. A. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodnykh ob'ektakh Evropeiskoi subarktiki (prirodokhrannye aspekty problemy) [Sedimentation patterns in water bodies of European Subarctic (environmental aspects)]: avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk [PhD Diss. (Geogr.)]. Apatity: KNTs RAN, 1999. 52 p.

Dauval'ter V. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii subarkticheskogo ozera pod vliyaniem gornoi metallurgii [Chemical composition of subarctic lake sediments under impact of mining and metallurgy]. *Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya [Transactions of the Academy of Sciences. Geographical series]* 2002, No 4. P. 65–73.

Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geocology of lake bottom sediments]. Murmansk: Murmanskii gos. tekhn. un-t, 2012. 242 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Sandimirov S. S. Tendentsii izmenenii khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii presnovodnykh Subarkticheskikh i Arkticheskikh vodoemov pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov [Trends in the dynamics of chemical composition of sediments in freshwater Subarctic and Arctic reservoirs under natural and anthropogenic factors]. *Trudy Kol'skogo NTs RAN. Prikladnaya ekologiya Severa [Transactions of Kola SC RAS. Applied ecology of the North]*. 2012. Iss. 1, No 2 (9). P. 54–87.

Kashulin N. A., Sandimirov S. S., Dauval'ter V. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B. Ekologicheskii katalog ozer Murmanskoi oblasti [Ecological catalogue of lakes in the Murmansk region]. Severo-zapadnaya chast' Murmanskoi oblasti i prigranichnoi territorii sopredel'nykh stran [North-West of the Murmansk region and border areas of adjacent states]. Apatity: KNTs RAN, 2009. Part. I. 226 p. Part. II. 262 p.

Kryuchkov V. V., Makarova T. D. Aerotekhnogennoe vozdeistvie na ekosistemy Kol'skogo Severa [Aerotechnogenic impact on ecosystems of the Kola North]. Apatity: KNTs, 1989. 96 p.

Äjräs M., Cariat P. de, Chekushin V. A., Niska-vaara H., Reimann C. Ecological investigation, Kola Peninsula: sulfur and trace element contents in snow. *Water, Air, Soil Pollut.* 1995. Vol. 85. P. 749–754.

Äjräs M., Pavlov V. A., Reimann C. Comparison of sulfur and heavy metal contents and their regional distribution in humus and moss samples from vicinity of Nikel and Zapoljarnij, Kola Peninsula, Russia. *Water, Air, Soil Pollut.* 1997. Vol. 98. P. 361–380.

Appleby P. G., Oldfield F. The calculation of the ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to sediments. *Catena*. 1978. Vol. 5. P. 1–8.

Cariat P. de, Reimann C., Äjräs M., Niskavaara H., Chekushin V. A., Pavlov V. A. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 1. Element levels and sources. *Appl. Geochem.* 1996a. Vol. 2. P. 149–168.

Cariat P. de, Reimann C., Äjräs M., Niskavaara H., Chekushin V. A., Pavlov V. A. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 2. Time-series. *Appl. Geochem.* 1996b. Vol. 2. P. 169–184.

Carignan R., Tessier A. Zinc deposition in acid lakes: the role of diffusion. *Science.* 1985. Vol. 228. P. 1524–1526.

Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern Fennoscandia. Working Paper of the Finnish Forest Research Institute. Eds. J. Derome, T. Myking, P. A. Aarstad. 2008. Vol. 85. 98 p.

Dauvalter V. Concentrations of heavy metals in superficial lake sediments of Pechenga district, Murmansk region, Russia. *Vatten.* 1992. Vol. 48, No. 2. P. 141–145.

Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia. *Sci. Tot. Environ.* 1994. Vol. 158. P. 51–61.

Dauvalter V. A. Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system. *Water Resources.* 1998. Vol. 25, No. 4. P. 451–457.

Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia. *J. Environ. Monitor.* 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.

Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage. *Chemosphere.* 2001. Vol. 42, No 1. P. 9–18.

Dauvalter V., Sandimirov S. Pollution of the Sediments of the Paz River basin. Eds. Stebel K., Chritinsen G., Derome J., Grekela I. State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area. *The Finnish Environment.* 2007. No 6. 55 p.

Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P. A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *J. Environ. Sci. Health.* 2011. Part A, vol. 46, iss 9. P. 1020–1033.

Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A., Reimann C., Stumpf E. F. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia. *Miner. Petrol.* 1999. Vol. 65. P. 87–111.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Terentjev P. M., Koroleva I. M. Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area. Jyvaskyla, Finland: Kopijyva Oy, 2008. 313 p.

Lukin A., Dauvalter V., Kashulin N., Yakovlev V., Sharov A., Vandysh O. Assessment of copper-nickel industry impact on a subarctic lake ecosystem. *Sci. Tot. Environ.* 2003. Vol. 306. P. 73–83.

Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Rodyushkin I. V., Dauvalter V. A., Lukin A. A. and Kashulin N. A. Airborne contaminants by heavy metals and aluminium in the

freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia). *Sci. Tot. Environ.* 1995. Vol. 160–161. P. 715–727.

Norton S. A., Hess C. T. Atmospheric deposition in Norway during the last 300 years as recorded in SNSF lake sediments: I. Sediment dating and chemical stratigraphy. Proc. Intern. Ecol. Impact of Acidic Precipitation, SNSF-project, Sandefjorden, Norway, 1980. P. 274–275.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D., Mierle G., Kahl J. S. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments. Eds. S. E. Lindberg et al. Sources, Deposition and Capony Interactions. Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990. Vol. III. P. 73–101.

Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G. et al. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.

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

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environ. Rev.* 2001. Vol. 4. P. 269–298.

Reimann C., Banks D., Bogatyrev I., de Cariat P., Kashulina G., Niskavaara H. Lake water geochemistry on the western Kola Peninsula, north-west Russia. *Appl. Geochem.* 1999. Vol. 14. P. 787–805.

Renberg I., Persson M. W., Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments. *Nature.* 1994. Vol. 368. P. 323–326.

Rognerud S. Sedimentundersøkelser i Pasvikelva høsten 1989. Oslo: NIVA-Rapport 401/90, 1990. 10 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.

Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway. *AMBIO.* 1993. Vol. 22, No 4. P. 206–212.

Rognerud S., Skotvold T., Fjeld E., Norton S. A., Hobak A. Concentrations of trace elements in recent and preindustrial sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1998. Vol. 55. P. 1512–1523.

Rognerud S., Dauvalter V. A., Fjeld E., Skjelkvåle B. L., Christensen G., Kashulin N. Spatial Trends of Trace-Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni–Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic. *AMBIO.* 2013. Vol. 42, No 6. P. 724–736.

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As- NLH, 1979. No 2. 7 p.

Traaen T. S., Moiseenko T., Dauvalter V., Rognerud S., Henriksen A., Kudravseva L. Acidification of surface waters, nickel and copper in water and lake sediments in the Russian-Norwegian border areas. Working Group for Water and Environmental Problems under the Norwegian-Soviet Environmental Protection Commission. Oslo and Apatity, 1991. 20 p.

Received December 15, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Даувальтер Владимир Андреевич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем,
д. г. н., проф.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
эл. почта: vladimir@inep.ksc.ru
тел.: +7(8155)579774

Кашулин Николай Александрович

зам. директора, зав. лаб. водных экосистем,
д. б. н., проф.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
эл. почта: nikolay@inep.ksc.ru
тел.: +7(8155)579378

Денисов Дмитрий Борисович

старший научный сотрудник
лаб. водных экосистем, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
e-mail: denisow@inep.ksc.ru
тел.: +7(8155)579776

CONTRIBUTORS:

Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579774

Kashulin, Nikolai

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579378

Denisov, Dmitry

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: denisow@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579776