

УДК 624.131.41

## **АККУМУЛЯЦИЯ И МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АРКТИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ И ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБРОСОВ КОМБИНАТА «ПЕЧЕНГНИКЕЛЬ»**

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

*Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»,  
Апатиты Мурманской обл., Россия*

По результатам многолетних исследований проведен анализ распределения химических элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Cr, As, Hg, Fe, Mn, Al, Na, K, Ca, Mg, Sr) в различных звеньях наземных и водных экосистем в зоне влияния выбросов горно-металлургического комбината «Печенганикель», который является локальным источником повышенных концентраций тяжелых металлов в верхних горизонтах почвы, поверхностных водах и донных отложениях водоемов. Происходит увеличение содержания щелочных и щелочноземельных металлов, что проявилось в эффекте подщелачивания, поэтому значения pH воды озер и водных вытяжек подстилки и органогенного слоя почвы повышенные на расстоянии до 20–30 км от комбината. Для большинства исследуемых химических элементов отмечена закономерность увеличения содержания в звеньях водных и наземных экосистем в направлении: вода водоемов – подстилка – органогенный слой почвы – донные отложения водоемов. Тяжелые металлы, накопленные в наземных экосистемах (в почвах и растениях) территории водосборов за 80-летний период деятельности горно-металлургического комплекса, будут загрязнять водоемы еще не один десяток лет вследствие длительного периода самоочищения почв.

**Ключевые слова:** вода; донные отложения; озера; почва; загрязнение; тяжелые металлы.

### **V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin. ACCUMULATION AND MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE ARCTIC TERRESTRIAL AND AQUATIC ECOSYSTEMS IN THE IMPACT ZONE OF EMISSIONS FROM PECHENGANICKEL COMPANY**

The distribution of chemical elements (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Cr, As, Hg, Fe, Mn, Al, Na, K, Ca, Mg, Sr) in various components of terrestrial and aquatic ecosystems was analyzed based on the results of long-term investigations in the impact zone of the emissions from the Mining and Metallurgical Plant Pechenganikel, which is the local source of elevated heavy metal concentrations in the topsoil, surface waters and sediments of water bodies. There is an increase in the content of alkaline and alkaline-earth metals, which is manifested in the effect of alkalization, resulting in higher pH values of the lake water and aqueous extracts from the litter and soil organic layer at a distance of up to 20–30 km from the source. The content of a majority of the studied elements in aquatic and terrestrial ecosystems demonstrated a regular increase along the gradient lake water – litter –

soil organogenic layer – lake sediments. Heavy metals accumulated in terrestrial ecosystems (in soils and plants) in the catchments over the 80 years of operation of the mining and smelting company will continue contaminating the water bodies around it for decades to come because self-purification of soils takes a long time.

**Keywords:** water; sediments; lakes; soil; pollution; heavy metals.

## Введение

Разработка медно-никелевых месторождений на приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией началась в 1932 г. канадско-финской компанией (после Октябрьской революции территория нынешнего Печенгского района Мурманской области отошла Финляндии, а после советско-финской войны 1939–1940 гг. вошла в состав СССР). 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.

Приграничная территория между Россией, Норвегией и Финляндией испытывает многолетнее серьезное антропогенное воздействие со стороны комбината «Печенганикель» [Крючков, Макарова, 1989]. Нижнее течение пограничной реки Пасвик принимает сточные воды металлургических и сопутствующих производств [Даувальтер, 1997; Rognerud et al., 2013]. Вся система р. Пасвик, а также не входящие в нее водосборы озер и рек данного района подвергаются загрязнению посредством атмосферных выбросов комбината [Крючков, Макарова, 1989]. К главным загрязняющим веществам относятся соединения серы (в основном сернистый газ  $SO_2$ ), тяжелые металлы (ТМ – Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Cr, As, Hg и др.) и пыль. Выбросы диоксида серы приводят к закислению почв и поверхностных вод, их загрязнению вследствие интенсификации процессов выщелачивания химических элементов из горных пород [Гашкина, Моисеенко, 2016; Базова, 2017]. На прилегающей к комбинату территории в наземных и водных экосистемах за долгие годы функционирования предприятия накоплено огромное количество ТМ, а также щелочных и щелочноземельных металлов, выбрасываемых в составе производственной пыли комбината.

Целью статьи является анализ распределения элементов в звеньях арктических наземных и водных экосистем территории, длительное время испытывающей серьезное антропогенное воздействие горно-металлургического комбината «Печенганикель».

## Материалы и методы

Детальные исследования экологического состояния наземных и водных экосистем Мурманской области и приграничной территории Норвегии и Финляндии, в том числе в зоне влияния выбросов промышленных предприятий, проводятся Институтом проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН (КНЦ РАН) почти 30 лет, с момента образования института (1989 г.). Наибольшее количество результатов изучения химического состава почвы, воды и донных отложений (ДО) водоемов северо-западной части Мурманской области и приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией было получено во время проведения совместных российско-норвежских и российско-финляндских исследований состояния окружающей среды приграничной территории (рис. 1). Эти исследования можно разделить на три периода с разницей примерно в 10 лет:

1) в 1989–1993 гг. проводились междисциплинарные исследования в рамках совместного проекта «Состояние наземных и водных экосистем в приграничном районе между Финляндией, Норвегией и Россией»;

2) в 2002–2004 гг. содержание и поведение химических элементов исследовалось в рамках проекта Интеррег IIIA Коларктик «Развитие и реализация мониторинга окружающей среды и программа оценки в приграничном районе между Финляндией, Норвегией и Россией»;

3) в 2010–2014 гг. исследования химического состава наземных и водных экосистем проводились в рамках совместного проекта Коларктик «Трилатеральное экологическое сотрудничество в трансграничном регионе».

Пробы воды с поверхностного слоя (1 м от поверхности) озер отбирались 2-литровым пластиковым батометром. Колонки ДО на исследуемых водоемах взяты в наиболее глубоких местах отборником открытого гравитационного типа (внутренний диаметр 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник изготовлен из плексигласа по образцу, разработанному Скогхеймом [Skogheim, 1979], и позволяет транспортировать колонки

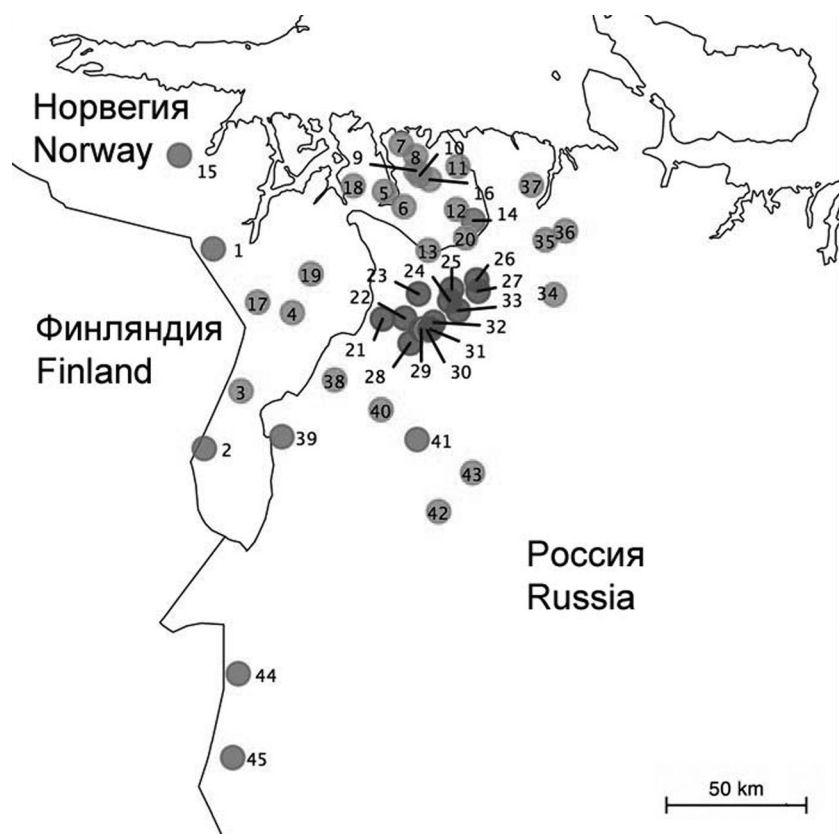


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных водных объектов. Комбинат «Печенганикель» в поселке Никель располагается между водными объектами 21 и 22

Fig. 1. Map-scheme of the studied lakes location. The Pechenganikel Company in the village of Nickel is located between the lakes 21 and 22

ненарушенными для дальнейшего использования. Длина колонок ДО составляла от 15 до 30 см, в зависимости от условий формирования ДО и физико-химических особенностей. Колонки ДО были разделены на слои по 1 см, помещены в полиэтиленовые контейнеры и отправлены в лабораторию, где хранились до анализа при температуре 4 °С. Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение потерь при прокаливании) и определение содержания химических элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Cr, As, Hg, Fe, Mn, Al, Na, K, Ca, Mg, Sr) проводились в лабораториях ИППЭС КНЦ РАН. Содержание химических элементов в пробах воды и ДО определялось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Контроль точности определения содержания химических элементов проводился анализом стандартного образца L6M (проба ДО, Центр окружающей среды Финляндии (SYKE) 06/2008), а также участием в сравнительных испытаниях в рамках международной интеркалибрации [Intercomparison..., 2016]. Подробно методика

определения содержания химических элементов описана ранее [Даувальтер, 2012].

## Результаты и обсуждение

По результатам исследований приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией [Даувальтер, 1997, 1999, 2012; Current..., 2008; Кашулин и др., 2009; Rognerud et al., 2013; Даувальтер и др., 2015] проведен анализ распределения химических элементов в различных звеньях наземных и водных экосистем. Были определены регрессионные зависимости типа  $y = kx^a$  содержания химических элементов ( $y$ ) в воде и поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер, в подстилке и органогенном слое почвы от расстояния ( $x$ ) от комбината «Печенганикель». На рис. 2 приведены графики этих зависимостей для некоторых элементов, а в таблице – расчетные параметры.

На комбинате «Печенганикель» перерабатываются медно-никелевые сульфидные руды, представленные такими минералами, как

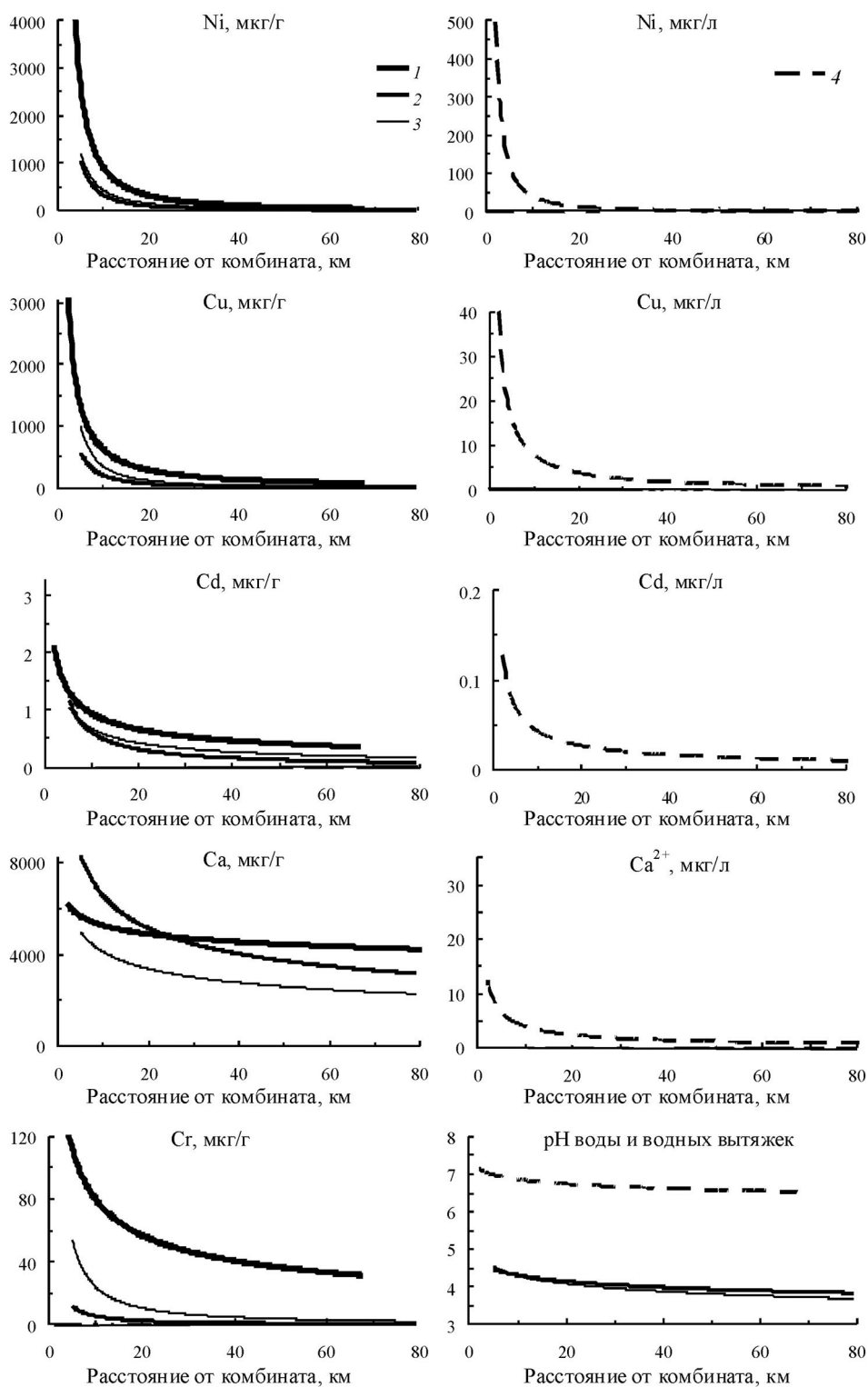


Рис. 2. Линии регрессионной зависимости распределения концентраций химических элементов в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер (1), в подстилке (2), органическом слое (3) почвы и воде озер (4) от расстояния от комбината «Печенганикель»

Fig. 2. Regression dependences lines of the distribution of the chemical elements concentrations in the sediment surface layer (0–1 cm) of the studied lakes (1), in the litter (2), the organic layer (3) of the soil (µg/g) and lake water (4, µg/l) from the distance to the Pechenganikel Company

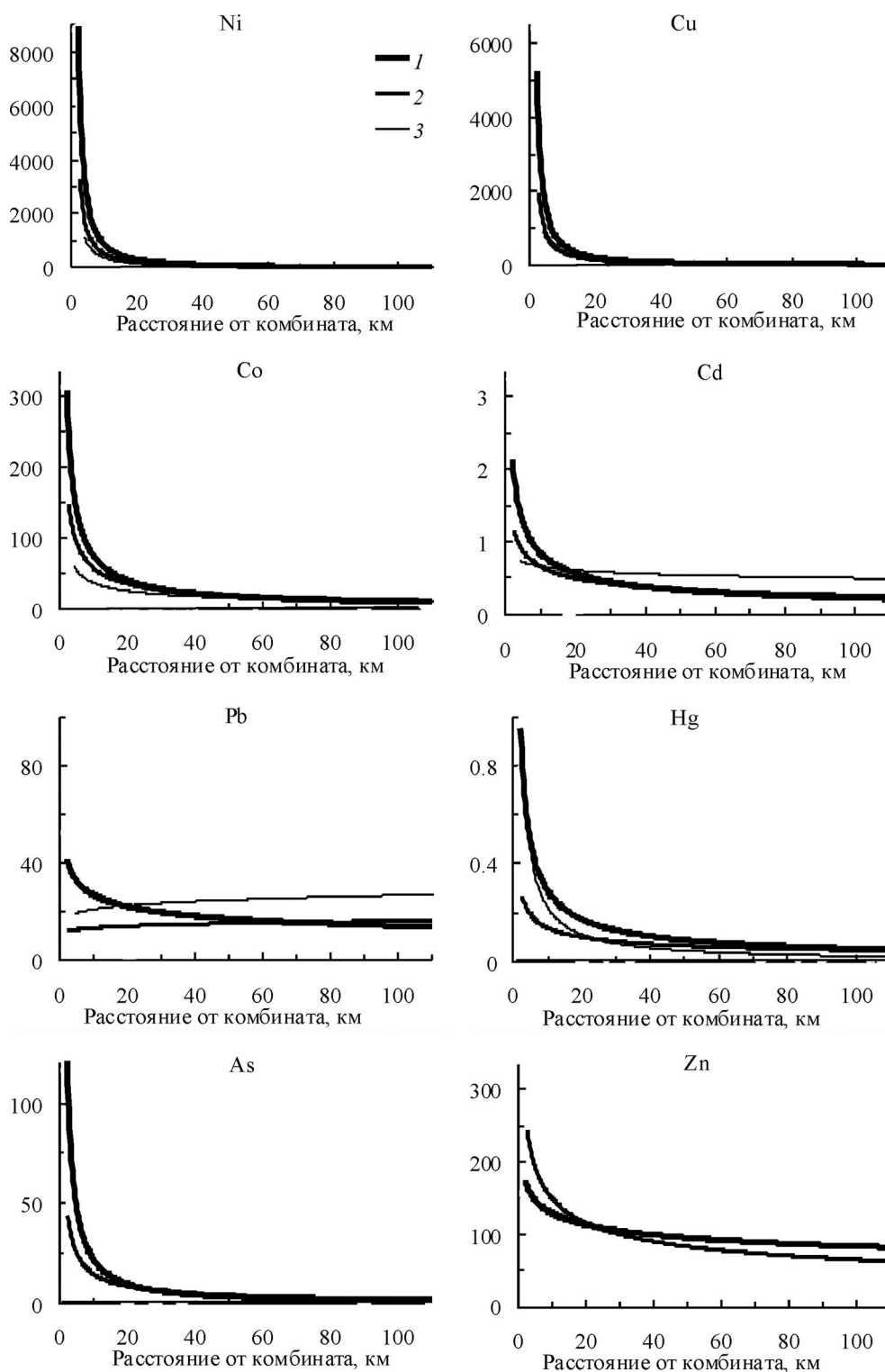


Рис. 3. Линии регрессионной зависимости распределения концентраций основных загрязняющих элементов ( $\mu\text{г/г}$ ) в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер от расстояния от комбината «Печenganикель» в разные годы: 1 – 2010–2014 гг., 2 – 2002–2004 гг., 3 – 1989–1993 гг.

Fig. 3. Regression dependences lines of the concentration distribution of the main pollutants ( $\mu\text{g/g}$ ) in the sediment surface layer (0–1 cm) of the studied lakes from the distance to the Pechenganikel Company in different years: 1 – 2010–2014, 2 – 2002–2004, 3 – 1989–1993

Параметры регрессионной степенной зависимости типа  $y = kx^a$  содержания химических элементов (y) в озерной воде, поверхностном слое (0–1 см) ДО озер и почвенных слоях (подстилке и органическом слое) от расстояния (x) от комбината «Печенганикель»

Parameters of regression power-law dependence  $y = kx^a$  of the chemical element content (y) in lake water, lake sediment surface layer (0–1 cm) and soil layers (litter and organic layer) from distance (x) from the Pechenganikel Company

Химический элемент Chemical element	Параметр Parameter	Вода Water	ДО Sediments	Подстилка Litter	Органогенный слой Organic layer
Ni	k*	1471	31168	18664	15359
	a*	-1,569	-1,534	-1,758	-1,558
	R <sup>2</sup> *	0,716	0,682	0,844	0,885
Cu	k	82	7821	7270	12651
	a	-1,020	-1,099	-1,553	-1,557
	R <sup>2</sup>	0,738	0,634	0,834	0,873
Zn	k	11,8	237	240	170
	a	-0,592	-0,274	-0,389	-0,346
	R <sup>2</sup>	0,306	0,134	0,253	0,346
Cd	k	0,205	3,020	5,650	3,086
	a	-0,682	-0,507	-0,964	-0,661
	R <sup>2</sup>	0,446	0,288	0,714	0,669
As	k	13,7	198	65	151
	a	-1,235	-0,903	-1,366	-1,212
	R <sup>2</sup>	0,423	0,585	0,623	0,700
Pb	k	0,47	32	48	32
	a	-0,56	-0,026	-0,721	-0,189
	R <sup>2</sup>	0,238	0,002	0,487	0,141
Cr	k	0,181	245	69	367
	a	-0,041	-0,487	-1,097	-1,182
	R <sup>2</sup>	0,003	0,280	0,598	0,644
Fe	k	447	58764	31029	96466
	a	-0,941	-0,147	-1,271	-1,068
	R <sup>2</sup>	0,340	0,024	0,729	0,753

пентландит  $(Fe, Ni)_9S_8$ , халькопирит  $CuFeS_2$ , кобальтин  $(Co, Ni)AsS$ , никелин  $NiAs$ , галенит  $PbS$ , сфалерит  $ZnS$ , хромит  $FeCr_2O_4$ , минералами платиновой группы (арсениды, теллуриды, селениды) и другими [Gregurek et al., 1999]. Поэтому в выбросах комбината, помимо соединений S, Ni и Cu, присутствуют и сопутствующие им ТМ (Co, Zn, Pb, As, Cr, Cd, Hg), Fe, Se, Te, а также петрогенные щелочные и щелочноземельные металлы и другие элементы в составе производственной пыли комбината.

Большая часть ТМ, входящих в состав выбросов и стоков промышленных предприятий, связывается и закрепляется в почве и ДО. Предыдущими исследованиями [Даувальтер, 1997, 1999, 2012; Current..., 2008; Кашулин и др., 2009; Rognerud et al., 2013; Даувальтер и др., 2015] было установлено, что атмосферные выбросы комбината «Печенганикель» и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников являются главными

источниками повышенных концентраций Ni, Cu, Co, Cd, Zn, As и Hg в почве, воде и поверхностных слоях ДО озер Печенгского района и приграничных районов Норвегии и Финляндии.

Поверхностные слои ДО водоемов отражают аккумулярующий эффект аэротехногенной нагрузки металлов на водосборы, которые зачастую могут не регистрироваться гидрохимическими методами [Даувальтер, Кашулин, 2014; Слуковский и др., 2017]. Выбросы в атмосферу плавильных цехов комбината «Печенганикель» являются главным источником повышенных концентраций Ni и Cu в воде, поверхностных слоях ДО и почвы на расстоянии до 30–40 км (рис. 2, 3). Наибольшие концентрации Ni и Cu, превышающие фоновые значения в 10–25 раз, отмечены в озерах и почвах на расстоянии до 10 км от комбината. Значительное уменьшение концентраций до 3–7 фоновых значений наблюдается на расстоянии до 20–30 км от источника загрязнения. Высокие величины



Продолжение табл.

Table (continued)

Химический элемент Chemical element	Параметр Parameter	Вода Water	ДО Sediments	Подстилка Litter	Органогенный слой Organic layer
Mn	k	18,1	1212	1807	1243
	a	-0,525	0,150	-0,479	-0,478
	R <sup>2</sup>	0,124	0,003	0,274	0,310
Al	k	55,5	20581	914	9555
	a	-0,400	-0,089	-0,250	-0,489
	R <sup>2</sup>	0,116	0,013	0,207	0,478
Na	k	3,42	628	66	527
	a	-0,124	-0,222	0,076	-0,393
	R <sup>2</sup>	0,069	0,146	0,096	0,531
K	k	0,633	1646	916	576
	a	-0,229	-0,039	-0,057	0,091
	R <sup>2</sup>	0,154	0,003	0,032	0,063
Ca	k	20,5	6684	14698	7897
	a	-0,710	-0,105	-0,352	-0,285
	R <sup>2</sup>	0,464	0,137	0,421	0,437
Mg	k	3,66	15760	4486	10512
	a	-0,482	-0,425	-0,547	-0,720
	R <sup>2</sup>	0,318	0,221	0,492	0,665
P	k	-	326	1344	1343
	a	-	0,339	-0,236	-0,148
	R <sup>2</sup>	-	0,171	0,272	0,367
pH	k	7,28	-	4,90	5,12
	a	-0,025	-	-0,056	-0,075
	R <sup>2</sup>	0,286	-	0,419	0,490

Примечание. k – коэффициент, a – показатель степени, R<sup>2</sup> – величина достоверности аппроксимации; значения R<sup>2</sup> достоверны для воды и ДО озер при R<sup>2</sup> > 0,24 (p < 0,001, выборка n = 43), для подстилки и органогенного слоя почвы – при R<sup>2</sup> > 0,43 (p < 0,001, выборка n = 22).

Note. k – coefficient, a – exponent, R<sup>2</sup> – value of approximation reliability; the values of R<sup>2</sup> are reliable for water and sediments of lakes at R<sup>2</sup> > 0,24 (p < 0,001, sample n = 43), for litter and organogenic soil layer at R<sup>2</sup> > 0,43 (p < 0,001, sample n = 22).

достоверности аппроксимации содержания Ni и Cu в воде, ДО, подстилке и органогенном слое почвы от расстояния от комбината говорят о едином главном источнике поступления этих ТМ в окружающую среду (табл.)

Подобная картина распределения концентраций Ni и Cu в воде и поверхностных слоях ДО озер отмечена вокруг крупнейших в мире медно-никелевых комбинатов – Норильского в Сибири и Садбери в Канаде. Концентрации Ni и Cu в поверхностных ДО озер вокруг Норильского комбината находятся в диапазоне от 37 до 2142 и от 63 до 5400 мкг/г соответственно [Blais et al., 1998], наибольшее содержание отмечено на расстоянии до 20 км от комбината. Такая же картина наблюдается и вокруг Садбери, где влияние выбросов медно-никелевого комбината на концентрации Ni и Cu в поверхностных ДО озер ограничивается 30–40 км [Semkin, Kramer, 1976; Palmer et al., 1989], в то время как импактная зона вокруг Норильского комбината

распространяется до 60 км [Blais et al., 1998]. Пространственное распределение Ni и Cu имеет северо-восточный – юго-западный эллиптический характер с центром в Садбери [Semkin, Kramer, 1976]. Аналогичный тренд для Ni и Cu отмечен вокруг комбината «Печенганикель» для атмосферных осадков и в гидрохимии озер, включая pH воды [Reimann et al., 1999]. Следовательно, распределение Ni и Cu в поверхностных ДО озер Мурманской области, вокруг Норильска и Садбери совпадает, так же как и распределение этих химических элементов в атмосферных осадках [Крючков, Макарова, 1989] и воде озер [Базова, 2017].

В распределении Co, Zn, Cd, Cr, As и Hg вокруг комбината «Печенганикель» наблюдается аналогичная закономерность (рис. 2 и 3). Наиболее интенсивно загрязняется зона до 10 км. Здесь отмечено превышение концентраций металлов над фоновыми значениями от 2 до 20 раз. По мере удаления от комбината

на 20–30 км наблюдается уменьшение концентраций металлов до 2–3 фоновых значений. В почвенных слоях (подстилке и органогенном слое) вышеперечисленные металлы закрепляются гораздо лучше, о чем говорят большие величины достоверности аппроксимации содержания вышеперечисленных ТМ от расстояния от комбината, чем в воде и ДО (табл.).

В распределении Pb по результатам исследований 2010–2014 гг. впервые отмечена тенденция увеличения содержания в поверхностных слоях ДО на расстоянии до 20 км от комбината (рис. 3). Это свидетельствует, что комбинат «Печенганикель» также является источником загрязнения Pb, т. е. картина распределения Pb стала подобной для всех приоритетных загрязняющих ТМ. Ранее [Даувальтер, 1997, 1999; Dauvalter, Rognerud, 2001] в региональном распределении Pb была отмечена отличная от всех ТМ картина – увеличение концентраций с востока на запад. Наибольшие значения концентраций Pb были зафиксированы на норвежской территории, где средние концентрации равны 40 мкг/г, что составляет около 10 фоновых значений. В промышленном районе было зафиксировано уменьшение концентраций (средние концентрации 28 мкг/г). В прошлом столетии поступление Pb в окружающую среду связывали в основном с автомобильными выхлопами и сжиганием угля на энергетических установках. Запрещение использования этилированного бензина и переход на экологически более чистые виды топлива по сравнению с углем в последние десятилетия привели к уменьшению поступления свинца с выхлопными газами и выбросами теплоэнергетических предприятий. Поэтому комбинат в последние годы все отчетливее становится точечным источником выбросов Pb, что проявляется в довольно высоком значении величины достоверности аппроксимации содержания Pb в почвенной подстилке от расстояния от комбината (табл.).

В состав производственной пыли комбината входят также соединения Fe, т. к. многие рудообразующие минералы (например, пентландит  $(Fe, Ni)_9S_8$ , халькопирит  $CuFeS_2$ ) содержат Fe, а также Mn, как сопутствующий металл, о чем говорят высокие величины достоверности аппроксимации содержания Fe (и меньшие значения для Mn) в подстилке и органогенном слое почвы от расстояния от комбината. В ДО озер достоверных зависимостей содержания Fe и Mn от расстояния от комбината не отмечается, т. к. содержание этих металлов зависит от физико-химических условий (в первую очередь от окислительно-восстановительной

обстановки и кислотно-щелочной реакции среды) в воде и ДО. При дефиците кислорода (т. е. в восстановительной среде) и влиянии выпадения сильных кислот (т. е. в кислотной обстановке) происходит восстановление Fe и Mn до степени окисления +2, при которой резко увеличивается их растворимость и уменьшается осаждение этих металлов в ДО [Даувальтер, Ильяшук, 2007; Демина и др., 2017].

В целом по результатам исследований 2010–2014 гг. отмечено увеличение концентраций практически всех загрязняющих ТМ в поверхностных слоях ДО озер приграничного района по сравнению с исследованиями 2002–2004 и 1989–1993 гг. (рис. 3).

Атмосферные выпадения аэрозолей являются главной причиной загрязнения, в том числе и ТМ, наземных и водных экосистем, поверхностных и подземных вод. В фоновых территориях, где в балансе атмосферных выпадений значительная роль принадлежит растворимым формам металлов, с поверхностным стоком выносятся до 5 % поступлений свинца и около 30 % поступлений цинка и кадмия [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Елпатьевский, 1993]. В условиях техногенного загрязнения, когда существенно увеличивается роль твердофазных выпадений, поверхностный вынос сокращается до 1–3 % поступлений Pb и до 10 % Zn и Cu [Елпатьевский, 1993]. Остальная часть металлов накапливается в почве. Миграция металлов по почвенному профилю происходит со скоростью 0,1–0,4 см/год и характеризуется быстрым падением концентраций с увеличением глубины [Елпатьевский, 1993; Cernic et al., 1994]. Возможности самоочищения почв от антропогенных накоплений металлов признаются весьма ограниченными [Fridland et al., 1992; Miller, Fridland, 1994; De Vries, Banker, 1996]. Согласно вышеуказанным исследованиям, совокупный вынос металлов (поверхностный сток, почвенные растворы, биологические процессы и др.) при условии прекращения новых поступлений из антропогенных источников обеспечит в зоне умеренного климата самоочищение загрязненных почв от Pb за период от 150–200 до 400–500 лет, от Zn, Cd – за 100–200 лет [Яхнин и др., 1997]. Таким образом, период естественного самоочищения почв и наземных экосистем от загрязняющих металлов можно оценить величиной порядка  $n \times 10^2$  лет (т. е. сотни лет).

В состав пыли, выбрасываемой в атмосферу металлургическим производством, входит большое количество главных породообразующих макроэлементов, то есть влияние выбросов комбината проявилось не только в повышении концентраций ТМ в водных и наземных



экосистемах вблизи комбината, но и в увеличении в них содержания Al, щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Sr) металлов (рис. 2; табл.). Это повлекло эффект подщелачивания почвы и воды водоемов, а также повышенные значения pH воды озер [Гашкина, Моисеенко, 2016; Базова, 2017] и водных вытяжек подстилки и органического слоя почвы [Евдокимова и др., 2011, 2014] на расстоянии до 20–30 км от комбината (рис. 1; табл.). Отмечено, что в почвенных слоях (подстилке и органогенном слое) щелочноземельные металлы (Ca и Mg) закрепляются гораздо лучше, чем в ДО озер, о чем говорят высокие величины достоверности аппроксимации содержания металлов от расстояния до комбината (табл.). Довольно высокие значения достоверности аппроксимации содержания этих металлов отмечены и в воде озер. Щелочные металлы обладают большей подвижностью и способностью к выщелачиванию и растворению по сравнению с щелочноземельными металлами, поэтому для щелочных металлов (Na и K) высоких значений зависимости их содержания от расстояния до комбината не отмечается, за исключением Na в органогенном слое почвы (табл.). Подобная картина распределения зафиксирована также для Al – достоверные зависимости от расстояния до комбината отмечаются в почвенных слоях (подстилке и органогенном слое). Вероятно, это связано с плохой выщелачиваемостью и растворимостью соединений Al и его довольно прочной закрепленностью в почвенных слоях.

Для всех исследуемых ТМ (Ni, Cu, Co, Cd, Zn, As, Cr, Fe, Mn), а также для Al, щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg) металлов отмечена закономерность увеличения содержания элементов в звеньях водных и наземных экосистем по направлению: вода – подстилка – органический слой почвы – донные отложения (рис. 2). Это связано с тем, что ДО водоемов являются конечным звеном миграции химических элементов и депонирующей средой многих загрязняющих веществ. В то же время ДО сами могут являться источником поступления загрязняющих веществ в организмы гидробионтов, а также в водную толщу при изменении в ней физико-химических условий (например, pH, Eh, содержания растворенных газов (кислорода, углекислого газа), бактериальной активности) [Даувальтер, 2012].

## Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что выбросы в атмосферу

плавильных цехов комбината «Печенганикель» являются главным источником повышенных концентраций ТМ (Ni, Cu, Zn, Co, Pb, Cd, As, Hg, Cr) в верхних горизонтах почвы, поверхностных водах и ДО водоемов на расстоянии до 30–40 км. В этой зоне отмечено также увеличение содержания щелочных и щелочноземельных металлов, что проявилось в эффекте подщелачивания и росте значений pH воды озер и водных вытяжек подстилки и органического слоя почвы. Для всех исследуемых ТМ (Ni, Cu, Co, Cd, Zn, As, Cr, Fe, Mn), а также для Al, щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg) металлов отмечена закономерность увеличения содержания элементов в звеньях водных и наземных экосистем по направлению: вода – подстилка – органический слой почвы – донные отложения. По результатам исследований 2000-х годов отмечено увеличение концентраций практически всех загрязняющих металлов в водных экосистемах приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией по сравнению с исследованиями 1990-х годов, что говорит об усилении антропогенной нагрузки в этом регионе. За почти 80-летний период деятельности горно-металлургического комплекса в звеньях окружающей среды (главным образом в наземных экосистемах – в почвах и растениях, а также в ДО водоемов) накопилось огромное количество ТМ, которое после отмирания растений и разложения органических остатков со склоновым стоком, почвенными и подземными водами в виде органических и неорганических соединений постепенно поступает в водотоки и водоемы. С учетом огромного количества накопленных ТМ в наземных экосистемах и многолетнего периода их самоочищения интенсивное поступление ТМ в водоемы будет продолжаться еще не один десяток лет, даже если горно-металлургический комбинат резко снизит или вообще прекратит их выбросы в окружающую среду.

## Литература

Базова М. М. Особенности формирования элементного состава вод Кольского Севера в условиях функционирования горнорудных производств // Геохимия. 2017. № 1. С. 92–106. doi: 10.7868/S0016752517010022

Гашкина Н. А., Моисеенко Т. И. Пространственно-временные закономерности изменения химического состава вод озер под влиянием выбросов медно-никелевых производств: прогноз закисления // Геохимия. 2016. № 12. С. 1122–1137. doi: 10.7868/S0016752516120037

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

Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 1999. 52 с.

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

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

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Поток тяжелых металлов (Ni и Cu) на водосборе субарктического озера // Сибирский экологический журнал. 2014. № 4. С. 503–514.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Демина Л. Л., Будько Д. Ф., Алексеева Т. Н., Новигатский А. Н., Филиппов А. С., Коченкова А. И. Особенности распределения микроэлементов в процессах раннего диагенеза донных осадков Белого моря // Геохимия. 2017. № 1. С. 107–112. doi: 10.7868/S0016752517010058

Евдокимова Г. А., Калабин Г. В., Мозгова Н. П. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия воздушных выбросов комбината Североникель // Почвоведение. 2011. № 2. С. 261–268.

Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовоздушных выбросов комбината Печенганикель // Почвоведение. 2014. № 5. С. 625–631. doi: 10.7868/S0032180X14050049

Елпатьевский П. В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных системах. М.: Наука, 1993. 253 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б. Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. В 2 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с. Ч. 2. 262 с.

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

Слуковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды КарНЦ РАН. № 10. 2017. С. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Яхнин Э. Я., Томилина О. В., Деларов Д. А. Атмосферные выпадения тяжелых металлов и их влияние на экологическое состояние почв // Экологическая химия. 1997. Т. 6, № 4. С. 253–259.

Blais J. M., Duff K. E., Laing T. E., Smol J. P. Regional contamination in lakes from the Noril'sk region

in Siberia, Russia // Water, Air, Soil Pollut. 1998. Vol. 95. P. 1–16. doi: 10.1023/A:100505932

Cernic M., Federer P., Borcovec M., Sticher H. Modelling of heavy metal transport in a contaminated soil // J. Environ. Qual. 1994. Vol. 23. P. 1239–1248.

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. Derome J., Myking T., Aarestad P. A. 2008. No. 85. 98 p.

Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, no. 1. P. 9–18. doi: 10.1016/S0045-6535(00)00094-1

De Vries W., Banker D. J. Manual for calculating critical load of heavy metals for soils and surface water // Report of DLO Winland Staring Centre, Wageningen (The Netherlands), 1996. No. 114. 133 p.

Fridland A. J., Craig B. M., Miller E. K., Herrick G. T., Siccama T. G., Johnson A. N. Decreasing lead levels in the forest floor of the northeastern USA // AMBIO. 1992. Vol. 21. P. 400–430.

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. doi: 10.1007/BF01161578

Intercomparison 1630: pH, Conductivity, Alkalinity, NO<sub>3</sub>-N, Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. ICP Waters report 129/2016. Oslo: Norwegian Institute for Water Research, Report No. 7081, 2016. 72 p.

Miller E. K., Fridland A. J. Lead migration in forest soil. Response to changing atmospheric inputs // Environ. Sci. Technol. 1994. Vol. 28. P. 662–672. doi: 10.1021/es00053a020

Palmer G. R., Dixit S. S., Macarthur J. D., Smol J. P. Elemental analysis of lake sediment from Sudbery, Canada, using particle-induced X-ray emission // Sci. Tot. Environ. 1989. Vol. 87/88. P. 141–156.

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. doi: 10.1016/S0883-2927(99)00006-2

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. doi: 10.1007/s13280-013-0384-8

Semkin R. G., Kramer J. R. Sediment geochemistry of Sudbury area lakes // Can. Mineral. 1976. Vol. 14. P. 73–90.

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

Поступила в редакцию 11.12.2017

## References

- Bazova M. M. Osobennosti formirovaniya elementnogo sostava vod Kol'skogo Severa v usloviyakh funktsionirovaniya gornorudnykh proizvodstv [Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 2017. Vol. 55, no. 1. P. 131–143. doi: 10.1134/S0016702917010025
- Dauvalter V. A. Zagryaznenie donnykh otlozhenii vodosbora reki Pasvik tyazhelymi metallami [Pollution of bottom sediments of the Pasvik river basin with heavy metals]. *Geoekologiya* [Geoecology]. 1997. No. 6. P. 43–53.
- Dauvalter V. A. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodnykh ob'ektakh Evropeiskoi Subarktiki (prirodookhrannyye aspekty problemy) [The patterns of sedimentation in water bodies of the European Subarctic (environmental aspects of the problem)]: DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow, 1999. 52 p.
- Dauvalter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of bottom sediments of lakes]. Murmansk: MGTU, 2012. 242 p.
- Dauvalter V. A., Ilyashuk B. P. Usloviya obrazovaniya zhelezo-margantsevykh konkreitsii v donnykh otlozheniyakh ozer v predelakh Baltiiskogo kristallicheskogo shchita [Conditions of formation of ferromanganese nodules in the bottom sediments of lakes in the Baltic Shield]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 615–619. doi: 10.1134/S0016702907060092
- Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Potok tyazhelykh metallov (Ni i Cu) na vodosbore subarkticheskogo ozera [Flow of heavy metals (Ni and Cu) in the catchment area of a Subarctic lake]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems Ecol.]. 2014. Vol. 7, no. 4. P. 375–383. doi: 10.1134/S1995425514040027
- Dauvalter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Tendentsii izmeneniya sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Severa Fennoskandii v poslednie stoletiya [Tendencies in the content change of heavy metals in lake sediments in Northern Fennoscandia over the last centuries]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 9. P. 62–75. doi: 10.17076/lim40
- Demina L. L., Bud'ko D. F., Alekseeva T. N., Novigatskii A. N., Filippov A. S., Kochenkova A. I. Osobennosti raspredeleniya mikroelementov v protsessakh rannego diageni izmeneniya osadkov Belogo morya [Partitioning of trace elements in the process of early diagenesis of bottom sediments in the White Sea]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 2017. Vol. 55, no. 1. P. 144–149. doi: 10.1134/S0016702917010050
- Elpat'evskii P. V. Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistemakh [Geochemistry of migration flows in natural and natural-technogenic systems]. Moscow: Nauka, 1993. 253 p.
- Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Kalabin G. V. Soderzhanie i toksichnost' tyazhelykh metallov v pochvakh zony vozdeistviya gazovozdushnykh vybrosov kombinata Severonikel' [The content and toxicity of heavy metals in the soils affected by aerial emissions from the Severonikel' Enterprise]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science]. 2011. Vol. 44, no. 2. P. 237–244. doi: 10.1134/S1064229311020037
- Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneikova M. V. Soderzhanie i toksichnost' tyazhelykh metallov v pochvakh zony vozdeistviya gazovozdushnykh vybrosov kombinata Pechenganikel' [The content and toxicity of heavy metals in the soils affected by aerial emissions from the Pechenganikel' plant]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science]. 2014. Vol. 47, no. 5. P. 504–510. doi: 10.1134/S1064229314050044
- Gashkina N. A., Moiseenko T. I. Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti izmeneniya khimicheskogo sostava vod ozer pod vliyaniem vybrosov mednonikelevykh proizvodstv: prognoz zakisleniya [Character of spatiotemporal variations in the chemical composition of lake water under the influence of emission from copper – nickel plants: prediction of acidification]. *Geokhimiya* [Geochem. Int.]. 2016. Vol. 54, no. 12. P. 1079–1093. doi: 10.1134/S001670291612003X
- Kabata-Pendias A., Pendias H. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Microelements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989. 439 p.
- Kashulin N. A., Sandimirov S. S., Dauvalter V. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B. Ekologicheskii katalog ozer Murmanskoi oblasti. Severo-zapadnaya chast' Murmanskoi oblasti i prigranichnoi territorii sopredel'nykh stran [Ecological catalog of the lakes of the Murmansk region. The North-Western part of the Murmansk region and the border area of the neighboring countries]. Apatity: KNC RAN, 2009. Part 1. 226 p. Part 2. 262 p.
- Kryuchkov V. V., Makarova T. D. Aerotekhnogennoe vozdeistvie na ekosistemy Kol'skogo Severa [Aerotechnogenic impact on the ecosystems of the Kola North]. Apatity: KNC RAN, 1989. 96 p.
- Slukovskii Z. I., Il'mast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. Geokhimicheskaya spetsifika protsessov sovremennogo osadkonakopleniya v usloviyakh tekhnogeneza (na primere oz. Lamba, Petrozavodsk, Kareliya) [The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small lake Lamba under technogenic impact]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 10. P. 45–63. doi: 10.17076/lim618
- Yakhnin E. Ya., Tomilina O. V., Delarov D. A. Atmosfernyye vypadeniya tyazhelykh metallov i ikh vliyanie na ekologicheskoe sostoyanie pochv [Atmospheric precipitation of heavy metals and their effect on the ecological state of soils]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecol. Chem.]. 1997. Vol. 6, no. 4. P. 253–259.
- Blais J. M., Duff K. E., Laing T. E., Smol J. P. Regional contamination in lakes from the Noril'sk region in Siberia, Russia. *Water, Air, Soil Pollut.* 1998. Vol. 95. P. 1–16. doi: 10.1023/A:100505932
- Cernic M., Federer P., Borcovec M., Sticher H. Modelling of heavy metal transport in a contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 1994. Vol. 23. P. 1239–1248.
- 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*. 2008. No. 85. 98 p.
- Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage. *Chemosphere*. 2001. Vol. 42, no. 1. P. 9–18. doi: 10.1016/S0045-6535(00)00094-1

De Vries W., Banker D. J. Manual for calculating critical load of heavy metals for soils and surface water. *Report of DLO Winland Staring Centre, Wageningen* (The Netherlands), 1996. No. 114. 133 p.

Fridland A. J., Craig B. M., Miller E. K., Her- rick G. T., Siccama T. G., Johnson A. N. Decreasing lead levels in the forest floor of the northeastern USA. *AMBIO*. 1992. Vol. 21. P. 400–430.

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. doi: 10.1007/BF01161578

*Intercomparison 1630*: pH, Conductivity, Alkalinity, NO<sub>3</sub>-N, Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. ICP Waters report 129/2016. Oslo: Norwegian Institute for Water Research, Report No. 7081, 2016. 72 p.

Miller E. K., Fridland A. J. Lead migration in forest soil. Response to changing atmospheric inputs. *Environ. Sci. Technol.* 1994. Vol. 28. P. 662–672. doi: 10.1021/es00053a020

Palmer G. R., Dixit S. S., Macarthur J. D., Smol J. P. Elemental analysis of lake sediment from Sudbery, Canada, using particle-induced X-ray emission. *Sci. Tot. Environ.* 1989. Vol. 87/88. P. 141–156.

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. doi: 10.1016/S0883-2927(99)00006-2

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. doi: 10.1007/s13280-013-0384-8

Semkin R. G., Kramer J. R. Sediment geochemistry of Sudbury area lakes. *Can. Mineral.* 1976. Vol. 14. P. 73–90.

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

Received December 11, 2017

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Даувальтер Владимир Андреевич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем, д. г. н., проф.  
Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»  
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209  
тел.: (81555) 79774  
эл. почта: vladimir@inep.ksc.ru

### Кашулин Николай Александрович

врио директора, д. б. н., проф.  
Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН»  
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209  
тел.: (81555) 79378  
эл. почта: nikolay@inep.ksc.ru

## CONTRIBUTORS:

### Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems (INEP)  
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences  
14 Akademgorodok, 184209 Apatity,  
Murmansk Region, Russia  
tel.: (81555) 79774  
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

### Kashulin, Nikolai

Institute of North Industrial Ecology Problems (INEP)  
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences  
14 Akademgorodok, 184209 Apatity,  
Murmansk Region, Russia  
tel.: (81555) 79378  
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru