

УДК 550.4 (471.21)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ  
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ БАСЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ**

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

**Аннотация**

Проведены исследования содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) в донных отложениях озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря. Среди исследованных тяжелых металлов наибольшее загрязнение отмечено для Pb: высокие значения коэффициента загрязнения имеет половина исследованных озер. Другие изученные халькофильные элементы (Cd, Hg, As), как и приоритетные для центральных промышленных районов Мурманской обл. загрязняющие тяжелые металлы (Ni, Cu, Zn и Co), оказывают не очень существенное влияние: коэффициенты загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона.

**Ключевые слова:**

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

**REGULARITIES OF HEAVY METALS DISTRIBUTION IN SEDIMENTS OF LAKES OF EASTERN PART  
OF THE MURMANSK REGION OF THE WHITE SEA BASIN**

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

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

**Abstract**

Researches of the content of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) in sediments of lakes in the eastern part of the Murmansk region of the White Sea basin have been conducted. Among the studied heavy metals, the highest contamination have been noted for Pb, namely a half of the studied lakes has high values of contamination factor. Other studied chalcophile elements (Cd, Hg, As) have no real impact on pollution as well as heavy metals being typical pollutants for central industrial areas of the Murmansk region (Ni, Cu, Zn and Co). Values of contamination factor for these elements in the majority of the studied lakes belong to moderate contamination factors according to the classification of L. Håkanson.

**Keywords:**

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



**Введение**

Ряд прямых и косвенных факторов, среди которых доминирующими являются климатические, геологические и ландшафтные особенности территорий водосборов, близость Белого моря, обусловили разнообразные и специфичные условия формирования качества озерных вод юго-востока Мурманской обл. В целом, это ультрапресные и олиготрофные водоемы с небольшой прозрачностью вод. Большое влияние на качество вод оказывают залесенность (в среднем 35.8 %) и заболоченность (в среднем 28.7 %) водосборных бассейнов.

Два типа водных систем характерны для юго-восточной части Мурманской обл.: крупные озерно-речные системы основных рек и многочисленные малые озера и реки. По происхождению

озера делятся на две основные группы: ледниковые и тектонические. Большинство озер относится к ледниковым, которые имеют округлую или овальную форму и небольшую глубину. Иногда встречаются запрудные озера в составе рек, которые образовались в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер имеют удлиненную форму и большую глубину. Озера тектонического происхождения расположены в глубоких котловинах, образованных тектоническими разломами, имеют вытянутую форму, сложную конфигурацию береговой линии и неровный рельеф дна.

Поток поверхностных вод с водосборной площади, осадки в виде дождя и снега, поверхностный сток, испарение – основные составные части водного баланса озер. Для водоемов юго-восточной части Мурманской обл. характерно преобладание поверхностного притока и стока в водном балансе, осадки близки к потерям на испарение и могут составлять 2–16 % уравнивающего баланса [1].

Для восточной части Мурманской обл. все большую актуальность приобретает проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных в фоновых районах. Территория восточной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов, кроме нескольких водоемов на водосборе оз. Умбозеро. Эти озера расположены в районе деятельности комбинатов «Ловозерский ГОК» (р. Сура) и «Апатит» (рудник «Восточный», р. Вуоннемйок). В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии в приполярные области переносится большая часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями из более южных индустриально развитых регионов. Эти вещества переносятся воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

Загрязнение водоемов сопровождается процессом закисления, которое определяется количеством кислотных осадков, выпадающих на территорию водосбора, продолжительностью их воздействия; геохимическими особенностями региона, гидрохимией и морфологией водоемов и др. Озера восточной части Мурманской обл., расположенные ближе к горлу Белого моря, наиболее чувствительны к закислению вследствие бедного ионного состава и низкой буферной емкости, т. е. обладают небольшим запасом соединений, способных нейтрализовать поступление кислотных соединений.

### **Особенности формирования химического состава донных отложений озер юго-востока Кольского полуострова**

Юго-восточная часть Мурманской обл. в районе морского побережья сложена микроклиновыми гранитами. Коренные кристаллические породы скрыты под тонкой подушкой тундрового почвенно-растительного покрова и часто выходят на поверхность, обнажая кислые гранитогнейсовые породы, что обуславливает низкую кислотонейтрализующую способность коренных пород и щелочность поверхностных вод. Ближе к центральным районам коренные породы покрыты четвертичными отложениями (морена и песчаные флювиогляциальные отложения) и продуктами болотных образований. Обнажения коренных пород встречаются реже, что создает иные условия формирования качества вод. В восточной части Кольского п-ова на палеозойских осадочных породах образованы, как правило, структурные плато с эрозионными формами рельефа. Горные массивы приурочены к относительно молодым интрузиям (Ловозерские и Хибинские тундры). В среднем течении р. Стрельна и в верхнем и нижнем течении р. Варзуга отмечены мощные покровы ленточных глин и горизонтально-слоистых песков. Образования слоистых глин встречаются по среднему течению р. Умба. В верховьях рек Поной, Стрельна и Варзуга расположены громадные болотные массивы.

Тектоника юго-восточной части полуострова проявилась, как и на всем Кольском п-ове, в виде различных по глубине и длине линейных разломов и сбросовых впадин, которые имеют

меридиональное и широтное направление. Разломы в настоящее время заняты реками, впадины – озерами. Нередко впадины приобретают лопастную форму.

В центре Мурманской обл. расположены крупные возвышенности – Хибинские и Ловозерские тундры. Высота отдельных гор достигает 1000–1200 м над ур. м. Горные массивы имеют платообразный характер вершин и крутые вогнутые склоны (50–60°). Продолжением горного массива является район возвышенностей Панские тундры в бассейне р. Пана с высотами до 500–600 м. Еще дальше на восток начинается широкое плато высотой 300–350 м (возвышенность Кейвы), разделенное глубокими ущельями-долинами. К югу и востоку от гряды Кейв местность имеет волнисто-грядовой рельеф с высотами 120–150 м. Местность здесь круто обрывается к горлу Белого моря и более полого спускается к югу, переходя в заболоченную низменность с отдельно выступающими грядами. Абсолютные отметки местности снижаются до 150–50 м. Вдоль побережья Белого моря тянется цепь гряд высотой до 250–280 м. Западнее ее, от оз. Колвицкое, местность имеет сильно расчлененный горный рельеф (Лувеньгские и Колвицкие тундры, Елки-Тундры). Севернее находится Южно-Кольская депрессия (100–120 м), которая простирается на восток до оз. Вялозеро. В ее пределах расположены большие болотные массивы и многочисленные мелкие и крупные озера, вытянутые в юго-восточном направлении.

Климат восточной части Кольского п-ова находится под смягчающим влиянием Баренцева и Белого морей, но Белое море зимой покрывается льдом. При удалении вглубь полуострова влияние морей довольно быстро исчезает, термический режим становится несколько суровее и продолжительнее на 1 месяц [1]. В восточной части полуострова вследствие более сглаженных форм рельефа климат отличается меньшей территориальной изменчивостью. Осадки довольно значительны (в среднем около 700 мм в год), распределяются по площади сравнительно равномерно, но в горах быстро возрастают с высотой.

Для восточной части Кольского п-ова наиболее характерны подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности, которые развиваются на любых породах в зоне тайги, в местах развития лесотундровых ассоциаций, часто встречаются в тундровой зоне. На самом берегу Белого моря (Стрельна, Тетрино) встречаются суглинистые подзолы. В условиях значительного увлажнения бедные растворимыми веществами подзолистые почвы минерализованы незначительно. Также распространены торфяно-болотные почвы, среди которых встречаются примитивные тундровые почвы, приуроченные к возвышенным и более расчлененным местам. Тундровые почвы свойственны зоне тундр, а также горным вершинам и склонам над границей лесной растительности. Для восточной прибрежной части характерны примитивные тундровые почвы.

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

На гидрохимические параметры поверхностных вод юго-восточной части Мурманской обл. основное влияние оказывают подстилающие породы на территории водосборов, а также ветры, которые приносят воздушные массы, насыщенные морскими аэрозолями Баренцева и Белого морей. Расположение озер в заболоченной тундре и близость к побережью приводит к изменению общей минерализации и природного соотношения основных ионов в поверхностных водах. В озерах, расположенных в непосредственной близости от Белого моря (от побережья до 17 км вглубь полуострова), наблюдается более высокое содержание хлоридов.

Так как Белое море зимой замерзает, содержание хлоридов в озерах намного меньше, чем у побережья Баренцева моря. Выпадение серы оказывает незначительное воздействие на данный район. Концентрации сульфатов выше только в озерах вблизи побережья Белого моря и расположенных недалеко от центрального промышленного района верховьях водосбора р. Умба. По мере удаления от побережья Белого моря происходит повышение минерализации вод за счет увеличения заболоченных площадей. В большинстве озер отмечается природная минерализация вод, характерная для водоемов Кольского п-ова. В основном минерализация вод изменяется в диапазоне от 1.7 до 111.0 мг/л (в среднем 22.4 мг/л). Исключение составляют несколько озер, расположенных в районе деятельности рудника «Восточный» АО «Апатит», общая минерализация в которых в зависимости от сезона изменяется в пределах 36.6–185.4 мг/л (в среднем 99.4 мг/л).

Результирующим показателем ионного равновесия вод считается рН. Территориальное распределение данного параметра довольно равномерно и не зависит от удаления от побережья. Наибольшее количество минимальных значений наблюдается в центральных заболоченных областях Кольского п-ова и в прибрежной тундровой зоне. В этих районах находятся озера с рН воды около 5 ед. Низкие значения рН определяются содержанием гумусовых кислот. Эти озера, в отличие от техногенно закисленных, действительно отличаются более высоким содержанием органического вещества и цветностью вод. Среди обследованных водоемов на юго-востоке Кольского п-ова озера с рН менее 6 составили 30 %. Озера с низкими значениями рН, как правило, невелики по размерам: их площадь составляет в среднем менее 0.3 км<sup>2</sup>.

В настоящее время в большинстве озер юго-восточной части Мурманской обл. сохраняется относительная природная стабильность гидрохимического состава вод и их сезонная цикличность за счет динамического равновесия природных процессов и отсутствия серьезного антропогенного воздействия. Химический состав вод малых озер исследованной территории отражает зональную и региональную специфику условий его формирования.

### Материалы и методы

При написании этой статьи использовались результаты научно-исследовательских работ Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая инженерно-экологические изыскания, например, по месторождению Федоровы тундры [2], а также монографии [3]. Статья является продолжением предыдущих, касающихся оценки экологического состояния озер Мурманской обл. по результатам исследования химического состава донных отложений (ДО) [4–8]. Исследуемые озера водосбора Белого моря, в которых были отобраны образцы ДО, делятся на три группы: 1 – озера водосбора р. Умба, 2 – озера водосбора р. Варзуга и 3 – озера водосбора р. Поной. Химический состав ДО исследовался в 15 озерах бассейна Белого моря, из них 8 озер принадлежит к первой группе, 4 – ко второй, 2 – к третьей, а оз. Летнегорское относится к водосбору руч. Жемчужный (табл. 1, рис. 1). Большинство озер, за исключением некоторых из водосбора р. Умба, располагаются на довольно значительном расстоянии от главных источников загрязнения Мурманской обл., поэтому в основном подвержены влиянию воздушного переноса загрязняющих веществ.

В основном исследовались малые озера с площадью от 0.2 до 4 км<sup>2</sup> с малыми глубинами (за исключением озер Хибинского массива) и только одно озеро средних размеров – Песочное (табл. 1). Все озера располагаются на возвышенных участках на высоте от 150 до 250 м над ур. м., а одно озеро, Академическое, высокогорное, находится в Хибинских горах на высоте 760 м над ур. м. Площади водосбора озер также меняются в широких пределах – от 0.5 до 140 км<sup>2</sup>. Географические условия расположения исследуемых озер разнообразны. Территории водосборной площади озер по типу ландшафта относятся к таежной, лесотундровой и горно-тундровой зонам (табл. 1).

Для оценки экологического состояния озер произведены отбор колонок ДО и определение содержания элементов, в том числе тяжелых металлов (ТМ), в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [8, 9].

Таблица 1

Перечень исследуемых озер восточной части Мурманской обл. (Белое море), в которых отобраны колонки ДО. Указаны номер водосбора (рис. 1), название озера, водосбор реки, высота над уровнем моря, площади озера и водосбора, максимальная глубина и расстояние до моря

Номер водосбора и озера	Название озера	Водосбор реки	Высота над ур. м., м	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Максимальная глубина, м	Тип ландшафта
21-9	Инчъявр	Умба	211.0	3.1	18.7	1.5	Лесотундра
21-11	Академическое	Умба	759.4	0.31	2.04	18.5	Горная тундра
21-12	Комариное	Умба	174.0	0.66	4.26	15.0	Лесотундра
21-17	Китчаявр	Умба	154.2	3.51	116.1	–	То же
21-21	Китчепажк	Умба	157.8	0.81	95.1	–	«
21-45	Светлое	Умба	120.1	0.31	2.23	2.2	Тайга
21-52	Аркашкино	Умба	109.7	0.76	3.31	–	То же
21-56	Глубокое	Умба	132.6	1.66	13.4	15.0	«
24-1	Летнегорское	Жемчужный	105.4	0.61	4.86	4.5	«
37-1	Голубое	Варзуга	185.0	0.2	0.54	9.0	Лесотундра
37-2	Треугольное	Варзуга	175.9	0.18	76.6	6.0	То же
37-3	Подкаменник	Варзуга	187.1	0.87	3.04	3.5	«
37-5	Верхнее Элнйок	Варзуга	248.2	0.2	12.5	0.9	«
85-22	Песочное	Поной	149.9	26.35	137.4	2.5	«
85-27	Макаровское	Поной	149.9	4.39	143.7	2.0	«

### Результаты и их обсуждение

Для оценки аккумуляции и распределения химических элементов в ДО озер водосбора Белого моря, как и в предыдущих статьях [4, 5], рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации элементов; 2) их вертикальное распределение в толще ДО; 3) концентрации элементов в поверхностных ДО; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, которое создается ТМ, накопленными в ДО.

#### Фоновые концентрации тяжелых металлов

Значения фоновых концентраций элементов для последующего установления интенсивности загрязнения, как и в предыдущих статьях [4, 5], определялись в образцах, отобранных из самых глубоких слоев колонок ДО (около 20 см) и отложившихся около 200 лет назад, которые характеризуют период до интенсивного освоения Мурманской обл. и прилегающих территорий [9].

Существуют значительные вариации в концентрациях ТМ в фоновых слоях ДО исследуемых озер (табл. 2). Средние фоновые концентрации некоторых ТМ в ДО озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря в среднем выше, чем в целом в озерах Мурманской обл.: Cd – более чем в 2 раза, Pb – в 1.2, As – в 1.1, а других металлов меньше – Co и Ni – в 2 раза, Cu и Zn – в 1.1 раза [9, 10]. Но в целом можно сказать, что средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря подобны средним фоновым концентрациям в малых озерах Мурманской обл.

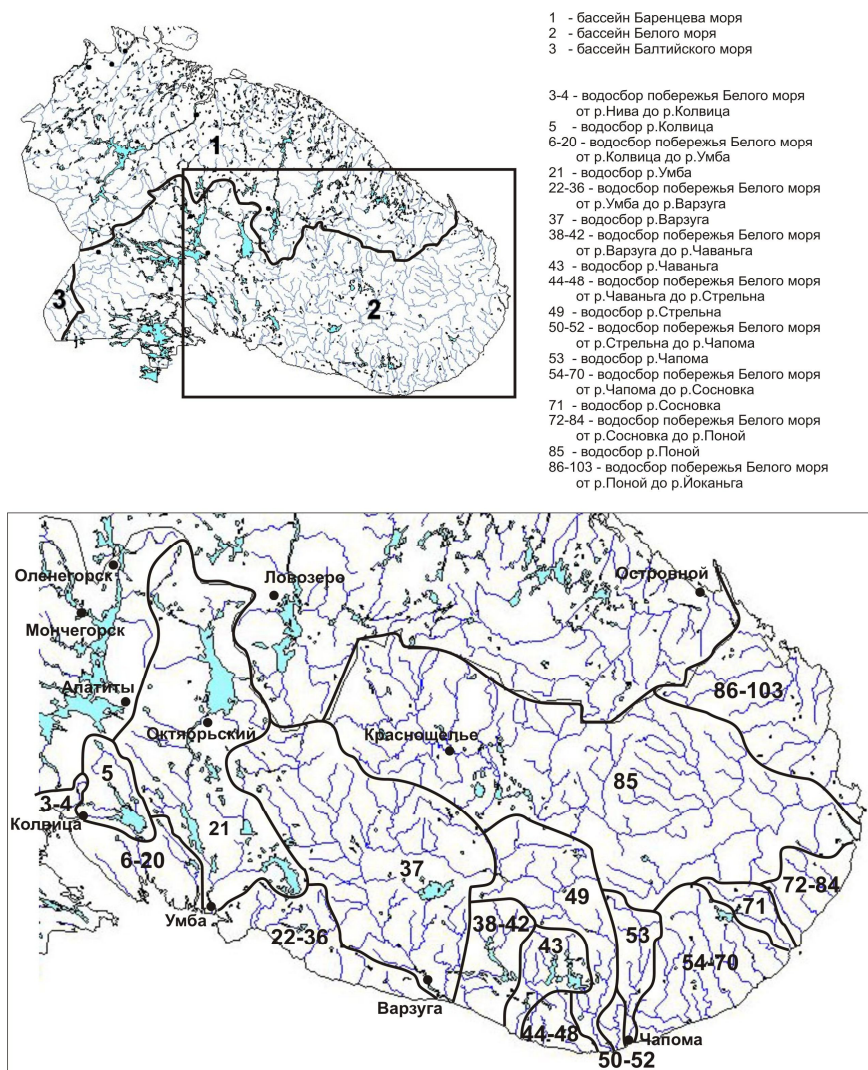


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер восточной части Мурманской обл. (Белое море)

Интенсивность осадконакопления и содержания элементов в ДО могут зависеть от морфометрических характеристик озер [11] и от ряда геологических, геохимических, физических, химических и биологических процессов, происходящих как на территории водосбора озера, так и в самом озере [9, 12]. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава фоновых ДО исследуемых озер, проведен факторный анализ (табл. 3), который четко выявил первый фактор, имеющий наибольший вес (28 %) и объединяющий в первую очередь морфометрические параметры (площадь озера и водосбора), а также большинство исследуемых ТМ (Ni, Zn, Co, Pb, As, Hg). Первый фактор подтверждается высокими достоверными значениями коэффициентов корреляции морфометрических параметров озер с содержаниями металлов в фоновых слоях ДО на примере Zn (рис. 2). Физико-химические условия осадкообразования (рН воды озера) и процессы, происходящие в самом озере (потери веса при прокаливании ДО, как косвенный показатель содержания органического вещества), входят во второй фактор, что подтверждается высокой корреляционной связью этих показателей (рис. 3). Таким образом, установлено, что морфометрия озер и их водосборов и физико-химические условия процессов осадконакопления являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых ДО исследуемых озер.

Таблица 2

Фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря, мкг/г сухого веса

Озеро	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Инчъявр	8	7	98	4.3	0.14	0.8	1.7	0.014
Академическое	15	18	80	5.2	0.63	10.9	2.4	0.010
Комариное	7	10	39	5.0	0.24	17.0	н.о.*	н.о.*
Китчявр	94	10	54	4.6	0.80	4.2	н.о.*	н.о.*
Светлое	17	11	16	3.6	1.00	3.9	н.о.*	н.о.*
Аркашкино	3	4	32	3	0.19	3.4	н.о.*	н.о.*
Глубокое	60	22	50	7.7	1.81	4.6	н.о.*	н.о.*
Летнегорское	12	8	29	2.9	0.13	0.8	н.о.*	0.023
Голубое	12	16	125	11.6	0.14	3.6	4.2	0.051
Треугольное	9	6	58	6.7	0.12	1.9	4.8	0.058
Подкаменник	48	28	108	9.7	0.26	1.0	1.7	0.054
Верхнее Элнйок	22	18	84	9.1	0.45	0.6	н.о.*	н.о.*
Песочное	12	26	181	10.3	0.74	12.4	6.1	0.049
Макаровское	12	18	213	3.4	0.54	11.6	4.7	0.041
Среднее значение	<b>23.7</b>	<b>14.2</b>	<b>83.3</b>	<b>6.2</b>	<b>0.51</b>	<b>5.5</b>	<b>3.6</b>	<b>0.037</b>
Минимальное значение	<b>3.3</b>	<b>3.7</b>	<b>15.9</b>	<b>2.9</b>	<b>0.12</b>	<b>0.6</b>	<b>1.7</b>	<b>0.010</b>
Максимальное значение	<b>94.0</b>	<b>27.5</b>	<b>212.8</b>	<b>11.6</b>	<b>1.81</b>	<b>17.0</b>	<b>6.1</b>	<b>0.058</b>
Стандартное отклонение	<b>25.9</b>	<b>7.5</b>	<b>57.9</b>	<b>2.9</b>	<b>0.47</b>	<b>5.3</b>	<b>1.7</b>	<b>0.019</b>
Среднее по Мурманской обл.**	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>96</b>	<b>13</b>	<b>0.23</b>	<b>4.4</b>	<b>3.2</b>	<b>0.035</b>

\* Концентрации не определялись.

\*\* По [9, 10].

Таблица 3

Факторная модель концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора Белого моря

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина озера, м	0.251	0.323	-0.833
ППП	0.039	-0.766	0.378
Площадь озера	-0.768	-0.205	0.117
Площадь водосбора	-0.814	-0.065	0.324
Высота над уровнем моря	-0.048	0.452	-0.581
pH воды озера	-0.302	0.854	-0.050
Cu	0.193	-0.710	-0.552
Ni	-0.549	-0.569	-0.487
Zn	-0.911	-0.071	0.123
Co	-0.372	-0.292	-0.286
Cd	-0.010	-0.579	-0.553
Pb	-0.533	0.337	-0.320
As	-0.716	-0.272	-0.435
Hg	-0.474	0.613	-0.306
Вес фактора, %	28	24	18

Определение содержания элементов в фоновых слоях ДО озер необходимо для установления интенсивности изменений в аккумуляции металлов на территории водосбора

и их последующей седиментации на дно водоема, поэтому выявленные в данной работе величины фоновых концентраций металлов в ДО имеют очень большую экологическую и геохимическую ценность. Исследуя вертикальное распределение металлов в толще ДО, можно восстановить историю событий, происходивших на территории водосбора конкретного озера.

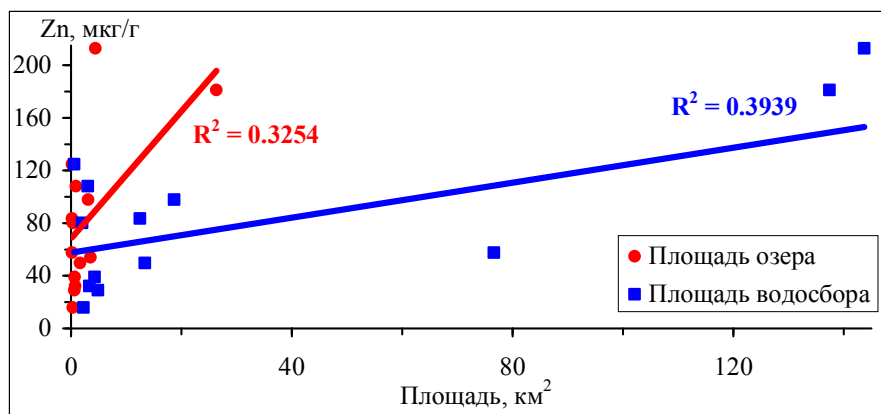


Рис. 2. Зависимости концентраций Zn (мкг/г) в фоновых слоях ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от площади озер и их водосборов

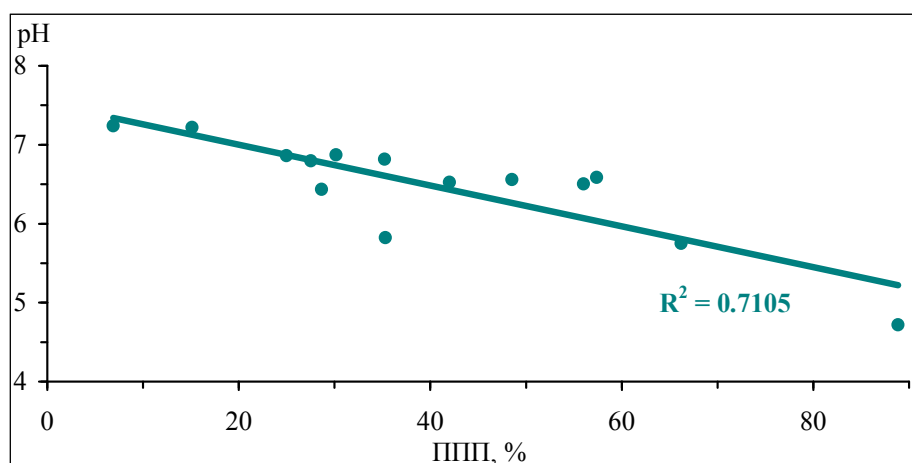


Рис. 3. Зависимость содержания органического вещества в фоновых слоях ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от величины pH воды

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

Водосборы исследуемых водоемов в основном не испытывают серьезного антропогенного влияния, озера не получают прямые сбросы загрязняющих веществ, за исключением озер Хибинского горного массива, принимающих стоки Восточного рудника АО «Апатит» (Китчевур и Китчапахк). Поступление взвешенных и растворимых веществ в водоемы в основном происходит за счет выветривания подстилающих горных пород и атмосферного осаждения веществ и элементов, переносимых иногда на сотни и тысячи километров от источников поступления в атмосферу.

Несмотря на довольно значительную удаленность исследуемых озер от основных источников загрязнения Мурманской обл., в ДО водоемов выявлено увеличение содержания всех ТМ по направлению к поверхности ДО (рис. 4). Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–3 см ДО, хотя в некоторых озерах загрязнение прослеживается до глубины 7–9 см, например для Pb и Cd



в оз. Аркашкино. Поверхностные слои ДО всех исследуемых озер загрязнены халькофильными элементами – Pb, Cd, Hg и As. Таким образом, подтвердился результат исследований химического состава ДО озер водосбора Баренцева и Белого морей в пределах Мурманской обл., когда было установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) во всех исследуемых водных объектах вне зависимости от того, испытывают ли они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [5, 13–16].

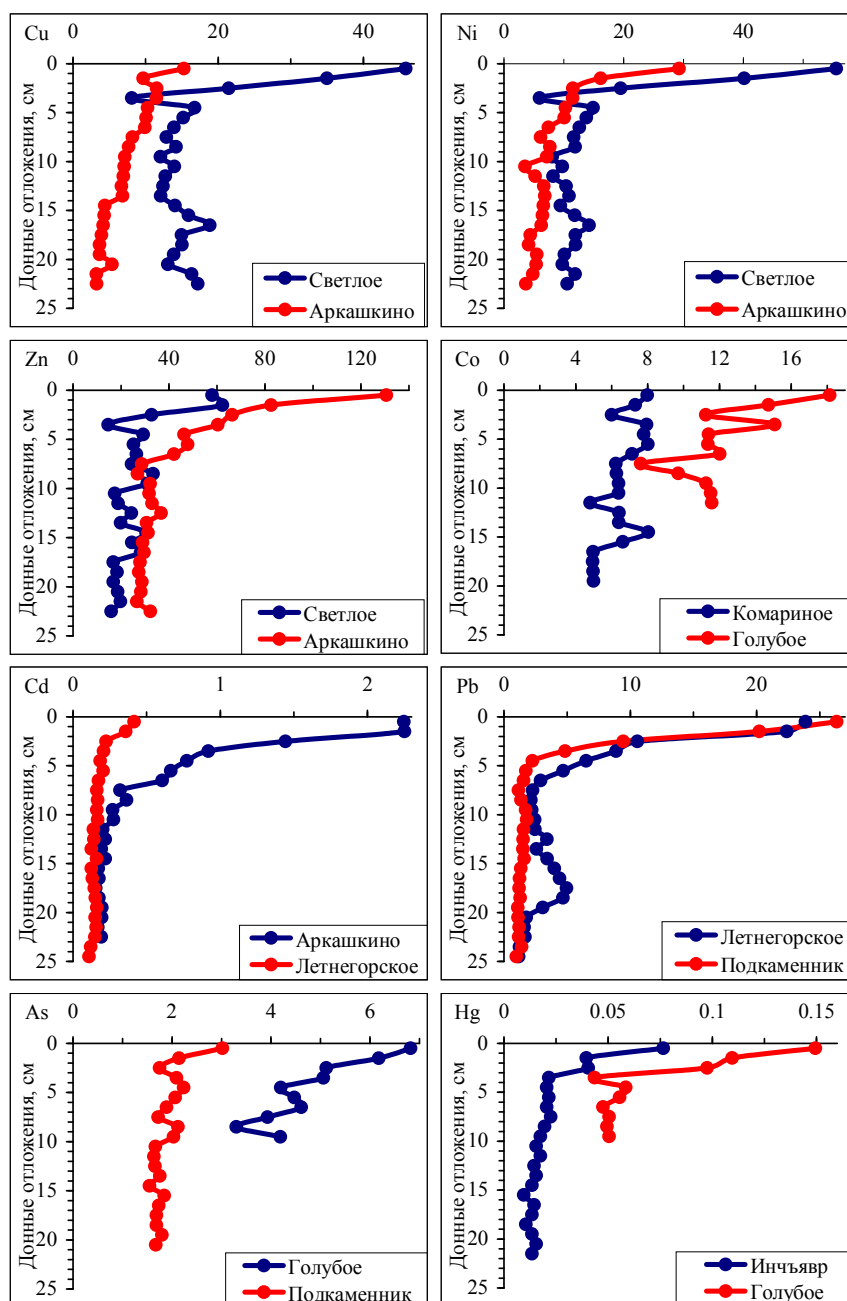


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г сухого веса) в ДО исследуемых озер восточного района Мурманской обл. бассейна Белого моря

Эти элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов. В поверхностных слоях ДО некоторых озер установлено также увеличение концентраций (по сравнению с фоновыми содержаниями) приоритетных для Мурманской обл.

загрязняющих ТМ, главными источниками поступления которых являются горно-металлургические комбинаты «Североникель» и «Печенганикель» – Ni, Cu, Co, Zn (в 14, 8, 8 и 12 озерах соответственно), но это увеличение не достигает масштабов загрязнения, зафиксированного в Печенгском районе [4, 7, 17–20]. Можно предположить, что при благоприятных погодных условиях воздушные выбросы горно-металлургических комбинатов могут достигать высоких слоев тропосферы, мигрировать на значительные расстояния (до 100 км) и достигать территории водосборов исследуемых озер.

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

Концентрации ТМ в поверхностных слоях ДО исследуемых озер в целом подобны содержаниям, отмеченным в озерах северо-западной части Мурманской обл., удаленных на расстояние около 100 км от горно-металлургических комбинатов [5, 17]. Среднее содержание большинства ТМ в поверхностном слое ДО исследуемых озер (табл. 4) выше в 1.5–3 раза, чем в озерах центральной части Кольского п-ова водосбора Баренцева моря [5, 13]. Исключение составляет Zn, средние концентрации которого в исследуемых озерах меньше, чем в озерах центральной части Кольского п-ова.

Таблица 4

Концентрации ТМ в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер водосбора Белого моря, мкг/г

Озеро	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Инчъявр	10	16	119	4.5	0.41	8.1	2.01	0.077
Академическое	24	32	103	5.4	0.94	35.1	3.32	0.020
Комариное	12	19	71	8.0	0.62	79.1	н.о.	н.о.
Китчяевр	34	22	75	8.0	1.80	18.0	н.о.	н.о.
Китчепахк	70	13	135	5.4	1.6	11.7	н.о.	н.о.
Светлое	46	56	58	4.5	1.37	77.9	н.о.	н.о.
Аркашкино	15	29	131	3.0	2.25	75.2	н.о.	н.о.
Глубокое	26	24	76	6.9	1.16	36.7	н.о.	н.о.
Летнегорское	9	8	47	2.2	0.42	23.9	н.о.	0.066
Голубое	16	21	141	18.1	0.31	15.3	6.82	0.150
Треугольное	14	16	115	9.3	0.36	12.6	5.73	0.119
Подкаменник	32	43	78	7.9	0.44	26.3	3.02	0.078
Верхнее Элнйок	11	22	272	9.9	0.60	7.7	н.о.	н.о.
Песочное	15	33	174	5.5	0.94	19.1	6.30	0.057
Макаровское	12	24	152	2.0	0.66	12.4	6.14	0.108
Среднее значение	<b>23.1</b>	<b>25.1</b>	<b>116.4</b>	<b>6.7</b>	<b>0.93</b>	<b>30.6</b>	<b>4.76</b>	<b>0.084</b>
Минимальное значение	<b>9.4</b>	<b>7.6</b>	<b>47.2</b>	<b>2.0</b>	<b>0.31</b>	<b>7.7</b>	<b>2.01</b>	<b>0.020</b>
Максимальное значение	<b>70.0</b>	<b>55.5</b>	<b>272.5</b>	<b>18.1</b>	<b>2.25</b>	<b>79.1</b>	<b>6.82</b>	<b>0.150</b>
Стандартное отклонение	<b>16.8</b>	<b>12.2</b>	<b>56.9</b>	<b>4.0</b>	<b>0.59</b>	<b>25.7</b>	<b>1.92</b>	<b>0.040</b>
Озера Кольского полуострова*	<b>15.7</b>	<b>20.4</b>	<b>151</b>	<b>5.7</b>	<b>0.32</b>	<b>15.2</b>	<b>1.64</b>	<b>0.056</b>

\* Центральной части полуострова [5].

Так как исследованные озера удалены от основных источников загрязнения и крупных населенных пунктов, а также от побережья Белого моря, территориальной закономерности в распределении ТМ в поверхностном слое ДО озер не отмечается. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава поверхностного слоя ДО исследуемых озер, проведен факторный анализ (табл. 5), который четко выявил первый фактор, имеющий больший вес (25.5 %) и объединяющий физико-химические условия седиментации

(величину рН воды озер), процессы, происходящие в самом озере (потери веса при прокаливании ДО как косвенный показатель содержания органического вещества), и половину исследуемых ТМ (Ni, Pb, As, Hg). Первый фактор подтверждается высокими достоверными значениями коэффициентов корреляции рН воды озер с содержаниями ППП и металлов в поверхностном слое ДО на примере Ni (рис. 5). Снижение концентраций органического материала в поверхностных ДО озер с низкими величинами рН воды происходит вследствие подавления биологической активности в озерах [21] и увеличения потока минеральных частиц с территории водосбора в результате закисления почв.

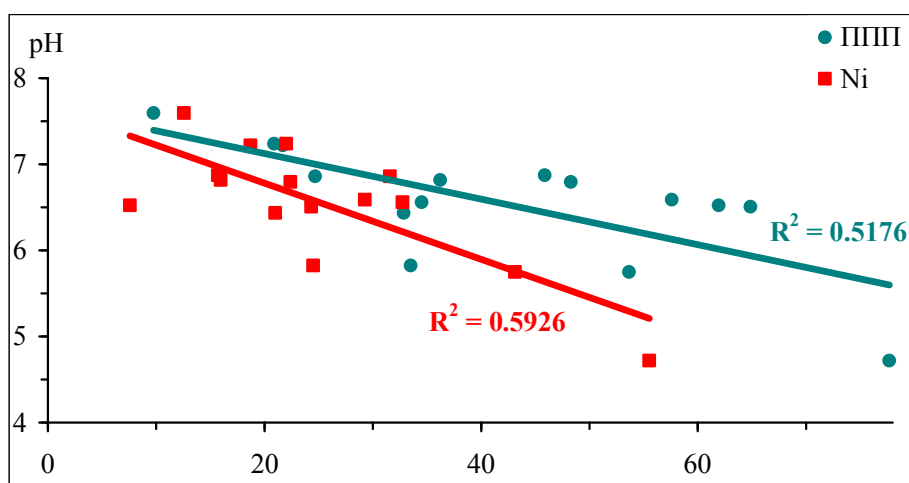


Рис. 5. Зависимость содержания органического вещества (ППП, %) и Ni (мкг/г) в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от величины рН воды

Органический материал как один из коллекторов ТМ в ДО, вследствие большой удельной площади поверхности [9, 12], влияет на содержание ТМ в ДО, что и сказалось в однонаправленности содержания органического материала и Ni в поверхностном слое ДО в зависимости от рН воды. Морфометрические характеристики озер (глубина, площадь озера и водосбора, высота над уровнем моря) входят во второй фактор, имеющий значительный вес (20 %), причем площади озера и водосбора влияют положительно, а глубина и высота уровня воды в озере – отрицательно (табл. 5). Таким образом, установлено, что морфометрия озер и их водосборов и физико-химические условия процессов осадконакопления являются определяющими факторами формирования химического состава поверхностного слоя ДО исследуемых озер, так же как и фоновых слоев ДО.

#### **Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер**

Для оценки геоэкологического состояния поверхностных вод определялись величины коэффициента и степени загрязнения [22], как это было сделано в предыдущих статьях [4, 5]. Коэффициент загрязнения ( $C_f^j$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) вычислялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих ТМ.

При оценке состояния придерживались следующей классификации  $C_f^j$ :  $C_f^j < 1$  – низкий;  $1 \leq C_f^j < 3$  – умеренный;  $3 \leq C_f^j < 6$  – значительный;  $C_f^j \geq 6$  – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg):  $C_d < 8$  – низкая;  $8 \leq C_d < 16$  – умеренная;  $16 \leq C_d < 32$  – значительная;  $C_d \geq 32$  – высокая степень загрязнения, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Таблица 5

Факторная модель концентраций ТМ в поверхностном слое (0–1 см)  
ДО озер водосбора Белого моря

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина озера, м	-0.170	-0.827	0.165
ППП	-0.621	0.428	-0.560
Площадь озера	0.290	0.552	-0.022
Площадь водосбора	0.551	0.627	0.262
Высота над уровнем моря	0.079	-0.596	0.114
pH воды озера	0.821	-0.201	0.340
Cu	-0.153	0.160	0.723
Ni	-0.728	0.248	-0.006
Zn	0.537	0.239	-0.319
Co	0.277	-0.420	-0.264
Cd	-0.245	0.322	0.767
Pb	-0.773	-0.134	0.268
As	-0.582	0.176	-0.084
Hg	-0.706	-0.613	-0.058
Вес фактора, %	25.5	20.0	15.8

Таблица 6

Значения коэффициента ( $C_f^i$ ) и степени загрязнения ( $C_d$ ) ДО озер  
Мурманской обл/ водосбора Белого моря

Озеро	$C_f^i$								$C_d$
	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	
Инчъявр	1.2	2.2	1.2	1.0	3.0	10.2	1.2	5.7	25.8
Академическое	1.6	1.8	1.3	1.1	1.5	3.2	1.4	2.0	13.9
Комариное	1.8	1.9	1.8	1.6	2.6	4.7	н.о.	н.о.	14.4
Китчявр	0.4	2.2	1.4	1.7	2.3	4.3	н.о.	н.о.	12.3
Китчепакх	0.7	1.3	2.5	1.2	2.0	2.8	н.о.	н.о.	10.5
Светлое	2.7	5.3	3.6	1.3	1.4	19.8	н.о.	н.о.	33.9
Аркашкино	4.7	8.0	4.1	1.0	11.7	22.3	н.о.	н.о.	51.7
Глубокое	0.4	1.1	1.5	0.9	0.6	7.9	н.о.	н.о.	12.6
Летнегорское	0.8	1.0	1.6	0.8	3.3	29.4	н.о.	2.9	39.7
Голубое	1.3	1.3	1.1	1.6	2.3	4.2	1.6	3.0	16.5
Треугольное	1.6	2.8	2.0	1.4	3.0	6.5	1.2	2.0	20.6
Подкаменник	0.7	1.6	0.7	0.8	1.7	26.7	1.8	1.4	35.4
Верхнее Элнйок	0.5	1.2	3.3	1.1	1.3	12.3	н.о.	н.о.	19.7
Песочное	1.2	1.3	1.0	0.5	1.3	1.5	1.0	1.2	9.0
Макаровское	1.0	1.4	0.7	0.6	1.2	1.1	1.3	2.6	9.9
Среднее значение	<b>1.4</b>	<b>2.4</b>	<b>1.9</b>	<b>1.1</b>	<b>2.7</b>	<b>11.1</b>	<b>1.4</b>	<b>2.6</b>	<b>22.6</b>
Минимальное значение	<b>0.4</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>	<b>1.2</b>	<b>9.0</b>
Максимальное значение	<b>4.7</b>	<b>8.0</b>	<b>4.1</b>	<b>1.7</b>	<b>11.7</b>	<b>29.4</b>	<b>1.8</b>	<b>5.7</b>	<b>51.7</b>
Стандартное отклонение	<b>1.1</b>	<b>1.9</b>	<b>1.0</b>	<b>0.3</b>	<b>2.7</b>	<b>9.5</b>	<b>0.3</b>	<b>1.5</b>	<b>12.9</b>

Среди исследованных озер наибольшие величины коэффициента загрязнения отмечены для Pb – высокие значения  $C_f^{Pb}$  имеет половина из исследуемых озер (табл. 6). Другие исследуемые халькофильные элементы (Cd, Hg, As) вызывают не очень существенное

загрязнение (за исключением озер Аркашкино и Инчъявр, где  $C_f^{Cd} = 11.7$  и  $C_f^{Hg} = 5.7$  соответственно) – величины коэффициентов загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона [22], так же как и для загрязняющих ТМ, приоритетных в Мурманской обл.: Ni, Cu, Zn и Co. Исключение составляет оз. Аркашкино, где величины коэффициента загрязнения Ni, Cu и Zn равны 8.0, 4.7 и 4.1 соответственно.

Наибольшую величину степени загрязнения ( $C_d = 52$ ) среди исследуемых озер имеет оз. Аркашкино (табл. 6), благодаря наибольшим значениям коэффициента загрязнения практически по всем ТМ (за исключением Co). В озерах Летнегорское, Подкаменник и Светлое зафиксированы высокие по классификации Л. Хокансона [22] величины  $C_d$  – 40, 35 и 34 соответственно. Значительные величины  $C_d$  имеют еще четыре озера – Инчъявр, Треугольное, Верхнее, Элнйок Голубое – 26, 21, 20 и 17 соответственно. Хибинские озера, а также озера водосбора р. Поной характеризуются умеренными значениями  $C_d$ .

### Заключение

Территория восточной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов, кроме нескольких водоемов на водосборе оз. Умбозеро. В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии, в приполярные области переносится большая часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями из более южных индустриально развитых регионов. Эти вещества переносятся воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

Выявлено, что средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря в целом подобны средним фоновым концентрациям в малых озерах Мурманской обл.

Установлено, что морфометрия озер (глубина, площадь озера и водосбора, высота над уровнем моря), а также физико-химические условия и процессы осадконакопления, происходящие в самом озере (в первую очередь величина pH воды озер и потери веса при прокаливании ДО как косвенный показатель содержания органического вещества), – определяющие факторы формирования химического состава ДО исследуемых озер.

Среди исследованных ТМ наибольшее загрязнение отмечено для Pb: высокие значения коэффициента загрязнения имеет половина из исследованных озер. Другие изученные халькофильные элементы (Cd, Hg, As), как и приоритетные для центральных промышленных районов Мурманской обл. загрязняющие ТМ (Ni, Cu, Zn и Co), оказывают не очень существенное влияние: величины коэффициентов загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона.

Несмотря на удаленность исследованных озер от основных источников загрязнения и крупных населенных пунктов, четверть озер характеризуется высокими величинами  $C_d$ , еще четверть озер – значительным загрязнением. Хибинские озера, а также озера водосбора р. Поной имеют умеренные значения  $C_d$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсы поверхностных вод СССР / Т. С. Антонова [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Т. 1. 316 с.
2. Инженерно-экологические изыскания территории месторождения «Федорова тундра» (Кольский полуостров) (Обоснование инвестиций) / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2007. 151 с.
3. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Белого моря): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. Ч. 1. 221 с.; Ч. 2. 235 с.
4. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 101–112.
5. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 69–80.
6. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения

содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 62–75. **7. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.** Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 106–121. **8. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С.** Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2012. № 2 (9), вып. 1. С. 54–87. **9. Даувальтер В. А.** Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с. **10.** Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н.А. Кашулин [и др.] // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107. **11.** Образование осадков в современных водоемах / Н. М. Страхов [и др.]. М.: АН СССР, 1954. 792 с. **12. Horowitz A. J.** A primer on trace metal-sediment chemistry. 2nd rew. ed. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1991. 136 p. **13.** Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря). В 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Ч. 1. 249 с.; Ч. 2. 128 с. **14. Даувальтер В. А.** Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова // Геохимия. 2006. № 2. С. 237–240. **15. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.** Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в озере Умбозеро, Мурманская область // Водные ресурсы. Т. 37, № 4. 2010. С. 461–476. **16. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.** Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России: учеб. пособие. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. 136 с. **17.** Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. В 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с.; Ч. 2. 262 с. **18. Dauvalter V.** Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61. **19. Dauvalter V., Rognerud S.** Heavy metals pollution in sediments of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **20. 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. **21. Кузнецов С. И.** Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970. 440 с. **22. Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

#### Сведения об авторах

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

E-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Кашулин Николай Александрович* – доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией водных экосистем, зам. директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: nikolay@inep.ksc.ru

#### Author Affiliation

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

E-mail: vladimir@inep.ksc.ru

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

E-mail: nikolay@inep.ksc.ru

#### Библиографическое описание статьи

*Даувальтер В. А.* Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер восточной части Мурманской области бассейна Белого моря / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 83–96.

#### Reference

*Dauvalter V. A.* Regularities of Heavy Metals Distribution in Sediments of Lakes of Eastern Part of the Murmansk Region of the White Sea Basin / V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 83–96.