

УДК 504.4.054:550.42

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СВИНЦА, СУРЬМЫ И КАДМИЯ В ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА КАРЕЛИИ

З. И. Слуковский^{1,2}, В. А. Даувальтер¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,
ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

Приведены результаты анализа накопления Pb, Sb и Cd в колонках современных отложений малых озер южной части Карелии. В число объектов исследования были включены как водоемы городской среды (Петрозаводск, Медвежьегорск, Суоярви и Сортавала), так и водные объекты, расположенные на условно фоновых территориях юга Карелии. Полевые и лабораторные исследования выполнены по единой методике в соответствии с мировым опытом проведения лимнологических работ. Определение концентраций химических элементов в озерных осадках осуществлялось с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ISP-MS. Вычислены медианные фоновые концентрации Pb, Sb и Cd в донных отложениях озер Карелии доиндустриального периода развития общества, а также установлены уровни накопления этих металлов в осадках тех же водоемов в современное (индустриальное) время. Приведены основные факторы формирования техногенных Pb-Sb-Cd-аномалий в верхних слоях донных осадков и сравнение содержания тяжелых металлов с таковым в отложениях озер других регионов мира. Вычислены уровни загрязнения карельских водоемов этими металлами на основе использования индекса геоаккумуляции I_{geo} для донных отложений озер. Согласно методике последовательной экстракции Тэсье установлены основные формы нахождения Pb, Sb и Cd в поверхностных слоях донных отложений малых озер Карелии и оценена роль органического вещества, составляющего основу самих осадков, в процессе накопления металлов. В связи с тем, что донные отложения озер южной части Карелии являются потенциальными полезными ископаемыми (сапропелями), в статье даны рекомендации о возможностях использования исследованных осадков в различных областях человеческой деятельности.

Ключевые слова: Pb; Sb; Cd; донные отложения; малые озера; антропогенное влияние; формы нахождения загрязнителей; сапропель; Республика Карелия.

Z. I. Slukovskii, V. A. Dauvalter. FEATURES OF Pb, Sb, Cd ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF SMALL LAKES IN THE SOUTH OF THE REPUBLIC OF KARELIA

The paper reports the results of the analysis of Pb, Sb, Cd accumulation in top core sediments from small lakes of southern Republic of Karelia. Both lakes in urban areas (Petrozavodsk, Medvezhyegorsk, Suojarvi, and Sortavala) and lakes in areas regarded as reference for southern Karelia were included in the study. Fieldwork and analytical investigations employed a common methodology in line with globally-accepted limno-

logical practices. The concentrations of chemical elements in the lake sediments were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The median background concentrations of Pb, Sb, Cd in the studied sediments deposited in the pre-industrial period were calculated, and the recent levels of accumulation of these metals in the industrial period were determined for the same lakes. The main factors for the formation of technogenic Pb, Sb, Cd anomalies in the top core sediments are described, and the levels of the heavy metals are compared against those in lake sediments in other parts of the world. The levels of contamination of the Karelian lakes with these metals were calculated based on the geoaccumulation index I_{geo} . The Tessier sequential extraction procedure was employed to detect the main forms of the heavy metals in the top core sediments. Especially, the role of organic matter, which constitutes the bulk of the sediments, in binding the pollutants was assessed. Considering that Karelian lake sediments are potential sources of useful organic raw material, i. e. sapropel, some recommendations are given on the possible applications of these sediments in human activities.

Keywords: Pb; Sb; Cd; sediments; small lakes; human impact; contaminant forms; sapropel; Republic of Karelia.

Введение

Эколого-геохимические исследования являются важным элементом в оценке качества окружающей среды той или иной территории. Кроме возможности выявления природных и антропогенных аномалий химических элементов в различных объектах такие работы позволяют устанавливать и прогнозировать экологические риски для живых организмов, в том числе влияние геохимических полей и аномалий на жизнь и здоровье людей [Саэт и др., 1990; Трофимов, Зиллинг, 2002; Ермаков, 2015]. Обычно в число основных задач эколого-геохимических исследований входит анализ поведения тяжелых металлов (ТМ) – источников их поступления в природу, путей миграции и механизмов закрепления в биотических и абиотических компонентах окружающей среды [Nriagu, Расуна, 1988; Моисеенко и др., 1997]. Главным образом такой интерес к ТМ вызван их реальной или потенциальной опасностью для биоты и человека.

Ключевыми объектами, в которых наиболее активно накапливаются ТМ, выступают почвы, торфяники и донные отложения (ДО) водных объектов [Håkanson, 1984; Моисеенко и др., 2000; Förstner et al., 2004; Водяницкий, 2011; Dauvalter et al., 2011; Страховенко, 2011; Янин, 2011]. В этих коллекторах существует возможность оценки современного состояния окружающей среды и исторической реконструкции природных и техногенных событий прошлого, что не исключает, а скорее подразумевает подключение других методов и подходов анализа выбранных объектов. В данной статье акцент делается на ДО озер, актуальность исследования которых в северных широтах мира велика не только из-за практической значимости из-

учения водных ресурсов в принципе, но и из-за их многочисленности. Например, на территории Карелии насчитывается свыше 60 тысяч озер, большая часть которых относится к категории малых непроточных или слабопроточных водоемов с площадью не более 1 км² [Демидов, Шелехова, 2006; Озера..., 2013].

Таким образом, целью данной работы является оценка уровня аккумуляции и форм нахождения тяжелых металлов (свинца (Pb), сурьмы (Sb) и кадмия (Cd)) в ДО малых озер южной части Карелии, включая озера урбанизированных районов и условно фоновых территорий региона.

Выбор этих трех элементов продиктован следующими соображениями:

- ранее опубликованные исследования авторов и коллег установили, что Pb и Sb являются приоритетными загрязнителями для современных ДО малых озер южной части Карелии, что особенно отчетливо проявляется на урбанизированных территориях [Слуковский и др., 2017; Слуковский, 2018; Medvedev et al., 2019; Slukovskii et al., 2020];
- существует значительный вклад в загрязнение Pb, Cd и Sb различных территорий мира, в том числе северных районов нашей страны, в результате дальнего переноса загрязнителей [Расуна, Расуна, 2001; Krachler et al., 2005; Dauvalter, Kashulin, 2010; Jernström et al., 2010; Vinogradova et al., 2017; Dauvalter, Kashulin, 2018; Виноградова, Котова, 2018; McConnell et al., 2019]. Во многих исследованиях отмечается тесная историческая связь между Pb, Cd и Sb начиная от момента выброса в атмосферу и заканчивая аккумуляцией в депонирующих средах, таких как ДО водных объектов [Kuwaе et al., 2013; Даувальтер и др., 2018];

- свинец, кадмий и сурьма входят в число высокоопасных элементов с точки зрения их влияния на живые организмы и человека [Водяницкий, 2011]. Контроль содержания этих металлов в различных средах, включая воду, – обязательное условие безопасного взаимодействия людей с природными объектами и использования природных ресурсов. Одним из примеров может служить официальный стандарт, где нормируется содержание ТМ, включая Pb и Cd, в ДО, которые могут быть использованными в сельском хозяйстве [ГОСТ Р 54000-2010].

В связи с этими предпосылками исследований, цель которых обозначена выше, предполагается решить следующие задачи:

- оценить уровень природных (фоновых) концентраций Pb, Sb и Cd в ДО малых озер южной части Карелии и провести сравнение с аналогичными данными, полученными для других регионов России и мира;
- проанализировать динамику поведения Pb, Sb и Cd в колонках верхних слоев современных ДО малых озер юга Карелии и выявить техногенное влияние на процесс обогащения этими металлами пресноводных осадков региона;

- провести оценку уровня загрязнения Pb, Sb и Cd выбранных водных объектов на основе имеющихся геохимических данных;
- установить основные формы (фракции) нахождения Pb, Sb и Cd в современных ДО малых озер южной части Карелии и оценить на основе полученных результатов потенциальные экологические риски для водной биоты озер;
- оценить роль органического вещества озер и их ДО в процессе загрязнения озер ТМ, поступающими в водную среду из окружающей среды, в том числе от антропогенных источников.

Материалы и методы

Работы по отбору проб ДО 21 малого озера южной части Карелии (рис. 1) проводились в 2016–2019 гг., как в летний, так и в весенне-зимний период. Семь исследованных озер относятся к категории урбанизированных водоемов, расположенных в черте городов Петрозаводска (озера Ламба и Четырехверстное), Медвежьегорска (озера Плотичье и Китайское), Суоярви (озера Кайпинское и Каймановское) и Сортавалы (оз. Айранне) [Слуковский, 2018]. Остальные озера расположены преимущественно в лесной или болотно-лесной мест-

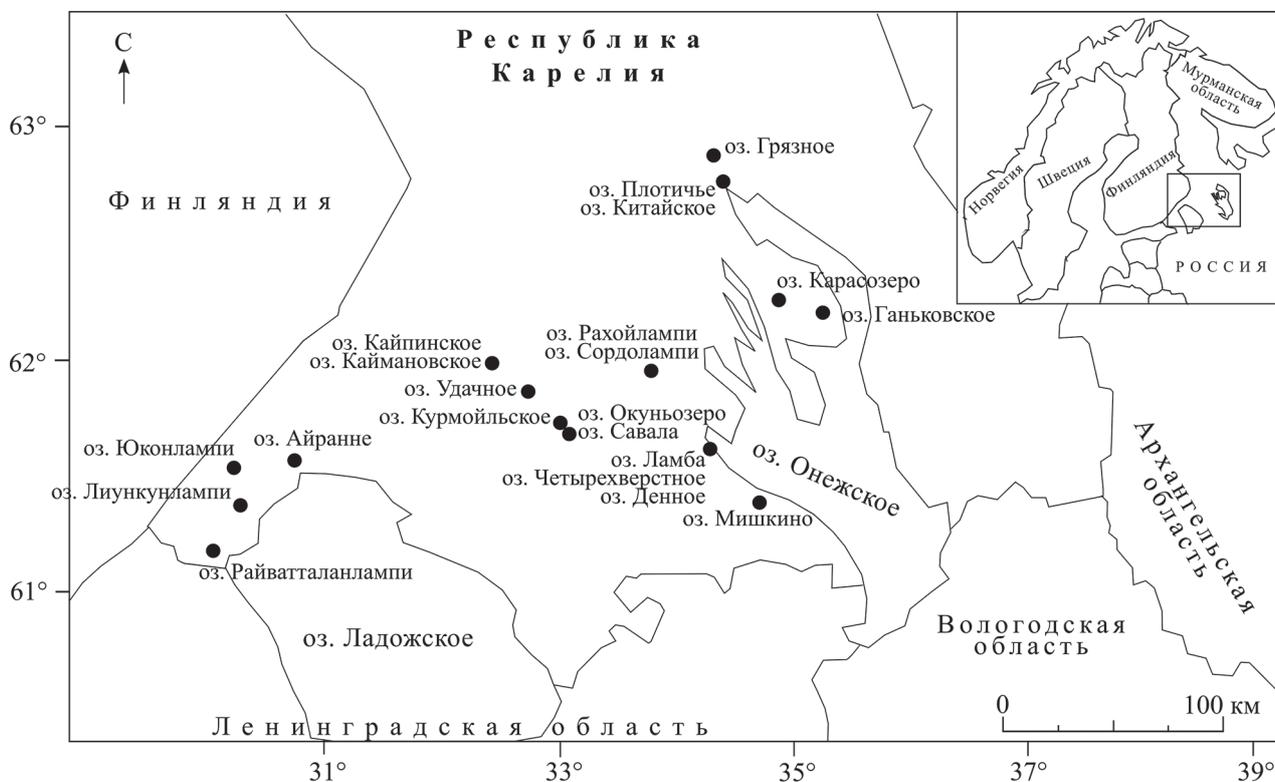


Рис. 1. Район исследований

Fig. 1. Studied area

ности на относительном удалении от крупных населенных пунктов или вблизи небольших сел или деревень, не имеющих крупных предприятий на своей территории.

Пробы ДО отбирали преимущественно пробоотборником Limnos, который позволяет получать стратифицированные колонки осадков мощностью до 60 см и разделять эти колонки на слои. В большинстве случаев полученные таким образом колонки разделяли на слои по 2 см для оценки валовых концентраций ТМ в отложениях и по 5 см для анализа различных форм нахождения металлов. Кроме этого, на озерах Ламба, Четырехверстное, Грязное, Рахойлампи, Сордолампи и Денное было проведено бурение отложений до минерального основания, алеврита или глин, подстилающих осадки. Для этого использован ручной (русский) бур, позволяющий достигать глубины 15 м, включая слой воды. Отложения озер Ганьковское, Карасозеро, Савала, Мишкино и Каймановское отобраны лишь с помощью дночерпателя Экмана – Берджа: изучен нестратифицированный слой до 20 см от поверхности ДО. Всего за четыре года отобрано 284 образца ДО с различных глубин озер. Карта расположения исследованных озер представлена на рис. 1.

Сразу после отбора пробы помещали в пластиковые контейнеры, которые подписывали и укладывали в сумку-холодильник с хладоэлементами, подготовленными к работе заранее. Далее пробы доставляли в лабораторию и помещали в холодильник, в котором они хранились при температуре около 4 °С согласно методическим рекомендациям до просушивания. Просушивание образцов проб ДО перед анализом до воздушно-сухого состояния осуществлялось при комнатной температуре, а до абсолютно сухого состояния – в сушильном шкафу при температуре около 110 °С.

Для оценки валовых концентраций элементов проводили разложение образцов ДО путем кислотного вскрытия с использованием HF, HNO₃ и HCl в открытой системе. Для анализа использовали аналитические навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1 – ГСО 7126–94). Подробно данная методика изложена в ранее опубликованной статье [Слуковский, 2015].

Для определения различных форм нахождения ТМ использовалась методика (схема) последовательного экстрагирования форм элементов в почвах [Tessier et al., 1979], включающая в себя определение: водорастворимых

форм (реагент H₂O); подвижных (обменных) форм (реагент NH₄CH₃COO); форм, связанных с гидроксидами железа и марганца (реагенты 0.04 М NH₂OH*HCl в 25% CH₃COOH); форм, связанных с органическим веществом (реагенты 0.02 М HNO₃ + 30% H₂O₂ и 3.2 М NH₄CH₃COO в 20% HNO₃); кислоторастворимых (остаточных) форм (реагент HNO₃); минеральных (силикатных) форм, получаемых в результате вычета суммы концентраций всех вышеперечисленных форм из валовых концентраций. Полный набор форм нахождения Pb, Cd и Sb был выполнен для озер Ламба, Четырехверстное, Окуньозеро, Рахойлампи, Лиункунлампи и Райватталанлампи, что в целом позволило охватить водоемы западной, восточной и центральной частей юга Карелии, а также озера условно фоновых и урбанизированных территорий (рис. 1).

Содержание Pb, Cd и Sb в пробах ДО определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific). Всего выполнено около 1000 элементоопределений. Анализ имеющихся данных с учетом эталонного образца показал, что измеренные значения концентраций, выраженных в мг/кг, характеризуются значениями относительного стандартного отклонения (RSD) от 6,3 до 16,5 %. Таким образом, уровень относительной погрешности измерений не превысил допустимых значений для всех определенных в данном исследовании химических элементов, включая ТМ [Светов и др., 2015].

Для оценки уровня загрязнения озер выбранными металлами был рассчитан индекс геоаккумуляции ТМ в ДО по следующей формуле [Müller, 1979]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C}{1.5 \times B} \right),$$

где С – валовая концентрация ТМ в исследуемом слое ДО, В – усредненная фоновая концентрация исследуемого элемента для ДО малых озер южной части Карелии.

Для оценки возраста ДО произведено определение содержания гамма-активных радионуклидов в отложениях оз. Юконлампи Лахденпохского района РК (рис. 1), которое выполнялось на кафедре радиохимии Московского государственного университета при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном, относительная эффективность 20 %. Для обработки спектров использовался программный пакет SpectralineGP.

Статистическая обработка выполнена при помощи программы Microsoft Excel 2019. Для

графической иллюстрации результатов использована бесплатная программа векторной графики Inkscape 0.48.4.

Результаты и обсуждение

Все изучаемые отложения представляют собой сапропель – самый распространенный тип озерных отложений в Карелии [Синькевич, Экман, 1995; Демидов, Шелехова, 2006]. Доля органического вещества в таких осадках колеблется от 15 до 90 %, однако в основном исследовались озера с 40–60-процентным содержанием органического вещества, что позволяет относить их к органическому или органо-силикатному типу ДО. Только ДО оз. Ламба, расположенного в черте г. Петрозаводска [Слуковский и др., 2017], относятся к органо-железистому типу ДО, также нередко встречающемуся на территории региона.

Проведенные исследования ДО 21 малого озера Карелии (рис. 1) показали, что Pb, Sb и Cd повсеместно накапливаются в водной среде на территории региона. Фоновый уровень этих металлов был оценен на основе анализа нижних слоев колонок ДО, отобранных пробоотборником Limnos, как это проделывалось в работах по территории Польши, Норвегии, Мурманской области, северной части Карелии и других районов [Håkanson, 1984; Rognerud et al., 2000; Dauvalter et al., 2011; Tylmann et al., 2011; Даувальтер, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2015]. Кроме того, в общий банк данных фоновых концентраций элементов были включены концентрации металлов, определенных в про-

бах ДО, отобранных при помощи русского бура. Возраст таких ДО, образовавшихся в промежутке между временем дегляциации территории современной Карелии и началом индустриализации стран Европы и Северной Америки, исчисляется тысячами лет [Лаврова, 2005; Субетто, 2009]. В итоге усредненное содержание Pb в фоновых слоях ДО малых озер юга Карелии составило 4,6 мг/кг, Sb – 0,17 мг/кг, а Cd – 0,41 мг/кг (табл.). При сравнении со средним составом земной коры ($Pb_{14,8}-Sb_{0,3}-Cd_{0,1}$) можно отметить, что осадки Карелии, образовавшиеся в доиндустриальное время, обеднены Pb и Sb и обогащены Cd [Wedepohl, 1995].

По сравнению с фоновыми слоями ДО малых озер других регионов России и мира фоновое содержание Pb в ДО малых озер Карелии близко к фону этого металла в осадках озер Мурманской области, но значительно меньше среднего фона Pb для севера Карелии, юга Норвегии и Скандинавских стран в целом, северной части Польши и Сибири [Страховенко, 2011; Tylmann et al., 2011; Даувальтер, Кашулин, 2015; Kashulin et al., 2017]. Доиндустриальное содержание Cd в ДО малых озер Карелии выше аналогичных данных для Мурманской области, Норвегии и Сибири [Rognerud et al., 2000; Страховенко, 2011; Dauvalter et al., 2011; Kashulin et al., 2017], близко к фону Cd для ДО польских озер [Tylmann et al., 2011] и озер севера Карелии [Даувальтер, Кашулин, 2015] и ниже, чем содержание этого металла в отложениях малых озер Скандинавских стран в целом [Håkanson, 1984]. К сожалению, оценка фона по Sb прово-

Среднее фоновое содержание Cd, Sb и Pb (в мг/кг) в ДО озер юга Карелии, Сибири и севера Европы (по литературным данным)

Average background content of Cd, Sb and Pb in lake sediments of the south of Karelia, Siberia and the north of Europe (literature review)

Регион исследования Studied area	Ссылки на литературу References	Cd	Sb	Pb
Республика Карелия (юг) Republic of Karelia (south)	Авторские данные Authors' data	0,41	0,17	4,6
Мурманская область Murmansk Region	Dauvalter et al., 2011; Даувальтер, 2012; Kashulin et al., 2017; Даувальтер и др., 2018 Dauvalter et al., 2011, 2018; Dauvalter, 2012; Kashulin et al., 2017	0,24	0,06	4,4
Скандинавские страны (в целом) Scandinavian countries (on the whole)	Håkanson, 1984	0,58	-	34,9
Сибирь Siberia	Страховенко, 2011 Strakhovenko, 2011	0,14	0,60	20,0
Польша (север) Poland (north)	Tylmann et al., 2011	0,40	-	18,7
Норвегия (юг) Norway (south)	Rognerud, Fjeld, 1993; Rognerud et al., 2000	0,26	-	24,5

дидась лишь для ДО малых озер Сибири: полученные значения намного выше новых данных по Карелии [Страховенко, 2011].

Кроме того, установлено, что среднее фоновое содержание Pb в ДО малых озер юга Карелии немного выше доиндустриального уровня этого металла в осадках Онежского озера (около 2 мг/кг) [Белкина и др., 2016], хотя в отдельных случаях эти цифры совпадают. Содержание исследованных ТМ в фоновых слоях ДО малых озер в целом выше в водоемах, относящихся к водосбору Ладожского озера. И в этом случае, и в случае сравнения фоновых концентраций ТМ в ДО озер Карелии и других регионов разница в концентрациях связана с типом отложений или с наличием специфических рудопроявлений изучаемых металлов в том или ином районе. Известно, что с увеличением доли терригенной фракции и одновременным уменьшением доли органического вещества в ДО озер возрастают концентрации многих химических элементов, например Pb и отчасти Sb [Страховенко, 2011]. Это во многом объясняет разницу в фоновых концентрациях этого металла в ДО озер Карелии, которые значительно обогащены органическим веществом, и озер более южных регионов, где велика доля кремния, алюминия и кальция в образовании озерных отложений.

Кадмий, напротив, согласно исследованиям ДО Сибири [Страховенко, 2011], лучше концентрируется в органических отложениях озер, поэтому его содержание в ДО озер Карелии доиндустриального периода выше или на одном уровне по сравнению с осадками других регионов (табл.). Более высокое фоновое содержание Cd в ДО озер юга и севера Карелии по сравнению с соседними Мурманской областью и Скандинавскими странами можно объяснить соответствующим содержанием этого металла (3 мг/кг) в коренных образованиях района исследования [Томилина и др., 2004]. Кроме того, известно, что среднее содержание Cd в верхнем почвенном горизонте района средней тайги Карелии равно 0,37 мг/кг, района северной тайги – 0,41 мг/кг, а в речных ДО самого юга Карелии, где Фенноскандинавский щит сменяется Русской платформой, содержание Cd составляет 0,39 мг/кг, и это вполне сопоставимо с данными, полученными по указанному металлу в ДО малых озер Карелии. Более того, в геохимическом атласе «Почвы Карелии» [Федорец и др., 2008] среднее содержание Cd в горизонте O составляет 0,5 мг/кг, а в горизонте E – 1,03 мг/кг.

Анализ накопления Pb, Sb и Cd в верхних слоях ДО малых озер юга Карелии выявил от-

четливое увеличение концентраций этих металлов по сравнению с нижними (доиндустриальными) слоями, содержание элементов в которых принято за природный уровень. На рис. 2–4 представлена наиболее типичная динамика поведения Pb, Sb и Cd в колонках осадков десяти из всех исследованных озер. Наибольшее накопление Pb отмечается в ДО городских озер Ламба (Петрозаводск, до 140 мг/кг) и Плотичье (Медвежьегорск, до 155 мг/кг), а также озер Лиункунламп (до 86 мг/кг) и Юконламп (до 92 мг/кг) (рис. 2). Причем в ДО оз. Ламба максимальное накопление Pb приходится не на верхние 10–20 см, а на глубину от 20 до 30 см. Кроме того, высокий уровень накопления этого металла по отношению к фону отмечается в оз. Четырехверстном, расположенном на окраине г. Петрозаводска, и оз. Денном, расположенном в 3 км от города. То есть отмечается значительное влияние самого крупного города Карелии на загрязнение Pb озер внутри и вблизи него. Медианное содержание Pb в верхних слоях ДО всех озер составляет 32,7 мг/кг, только городских озер – 41,8 мг/кг, только озер условно фоновых районов юга Карелии – 31,2 мг/кг.

Наибольшее накопление Sb снова отмечается в ДО городских озер: до 4,48 мг/кг в оз. Плотичьем, до 3,90 мг/кг в оз. Ламба и до 2,92 мг/кг в оз. Четырехверстном (рис. 3). Кроме них большой уровень накопления этого металла отмечен в осадках оз. Удачного (до 2,17 мг/кг), расположенного в отдалении от урбанизированных территорий. Несмотря на этот факт, в целом Sb накапливается более интенсивно в ДО озер в городской среде: медиана для озер урбанизированных территорий составляет около 0,95 мг/кг против 0,68 мг/кг – значения, рассчитанного для всех исследованных озер юга Карелии, и 0,69 мг/кг – значения, рассчитанного только для озер условно фоновых территорий. Так же как и в случае с Pb в ДО оз. Ламба (Петрозаводск), Sb имеет пики концентраций не в самых верхних слоях, а ниже по исследованной колонке – на глубине 18–28 см. В целом этот ТМ ведет себя схоже с поведением Pb во всех водоемах, что отражается на тесной корреляции металлов: $r = 0,84$ (при $p < 0,01$).

Третий из исследованных металлов, Cd, имеет наибольшее накопление в ДО озер Юконламп (до 2,69 мг/кг), Лиункунламп (до 2,05 мг/кг) и Райватталанламп (до 1,98 мг/кг), оз. Плотичьем, расположенном в г. Медвежьегорске (до 2,03 мг/кг) и оз. Удачном (до 1,72 мг/кг) (рис. 4). Согласно расчету медианных значений концентраций этого ТМ в верх-

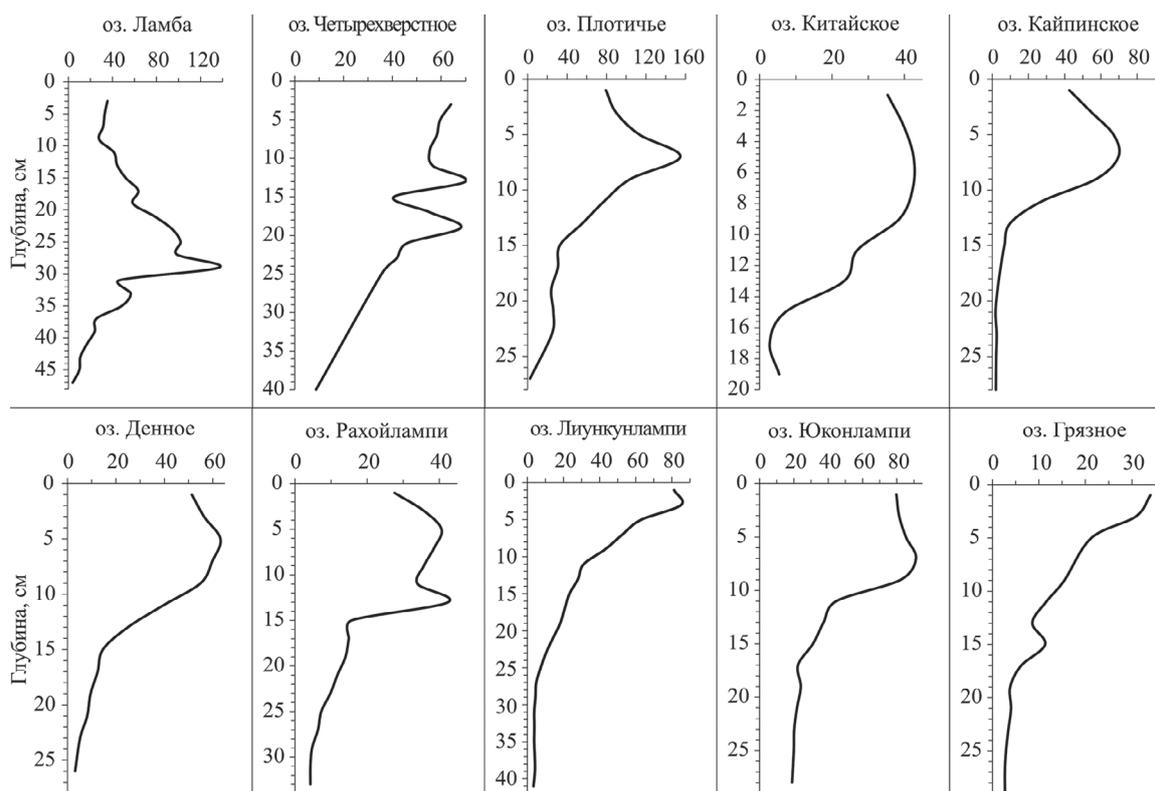


Рис. 2. Вертикальное распределение Pb (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 2. Vertical distribution of Pb (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

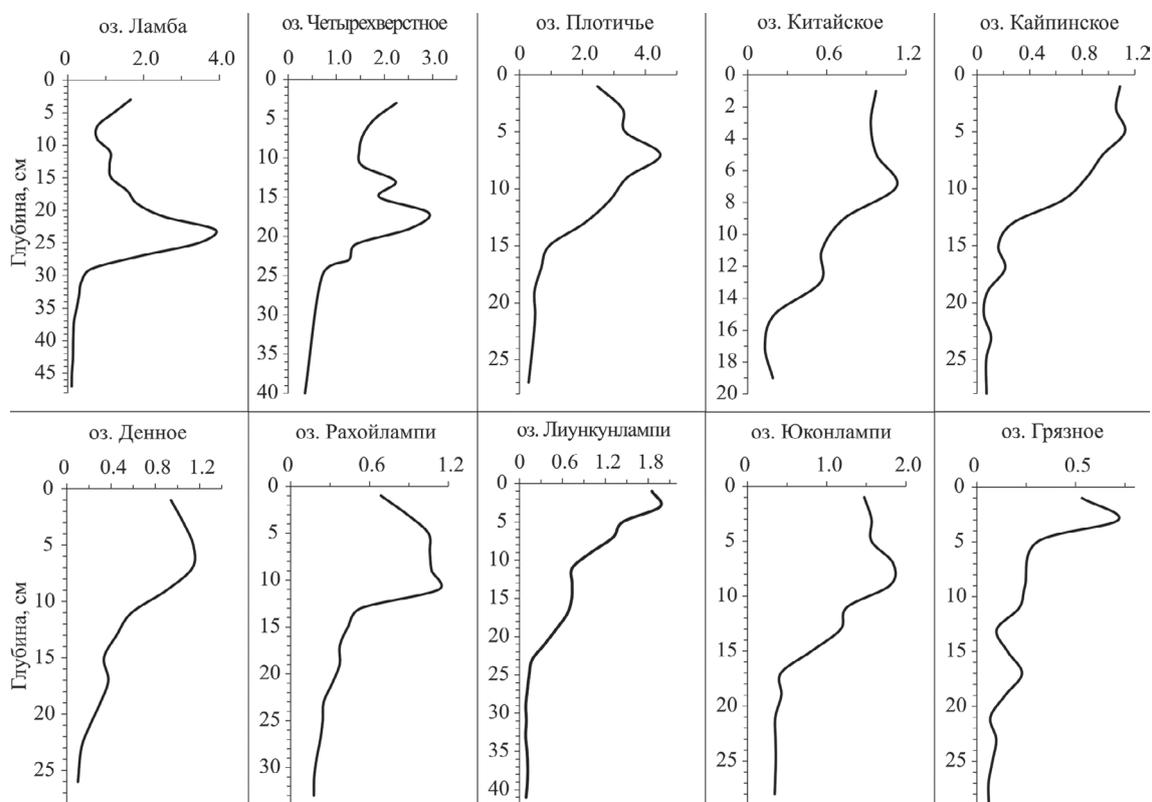


Рис. 3. Вертикальное распределение Sb (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 3. Vertical distribution of Sb (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

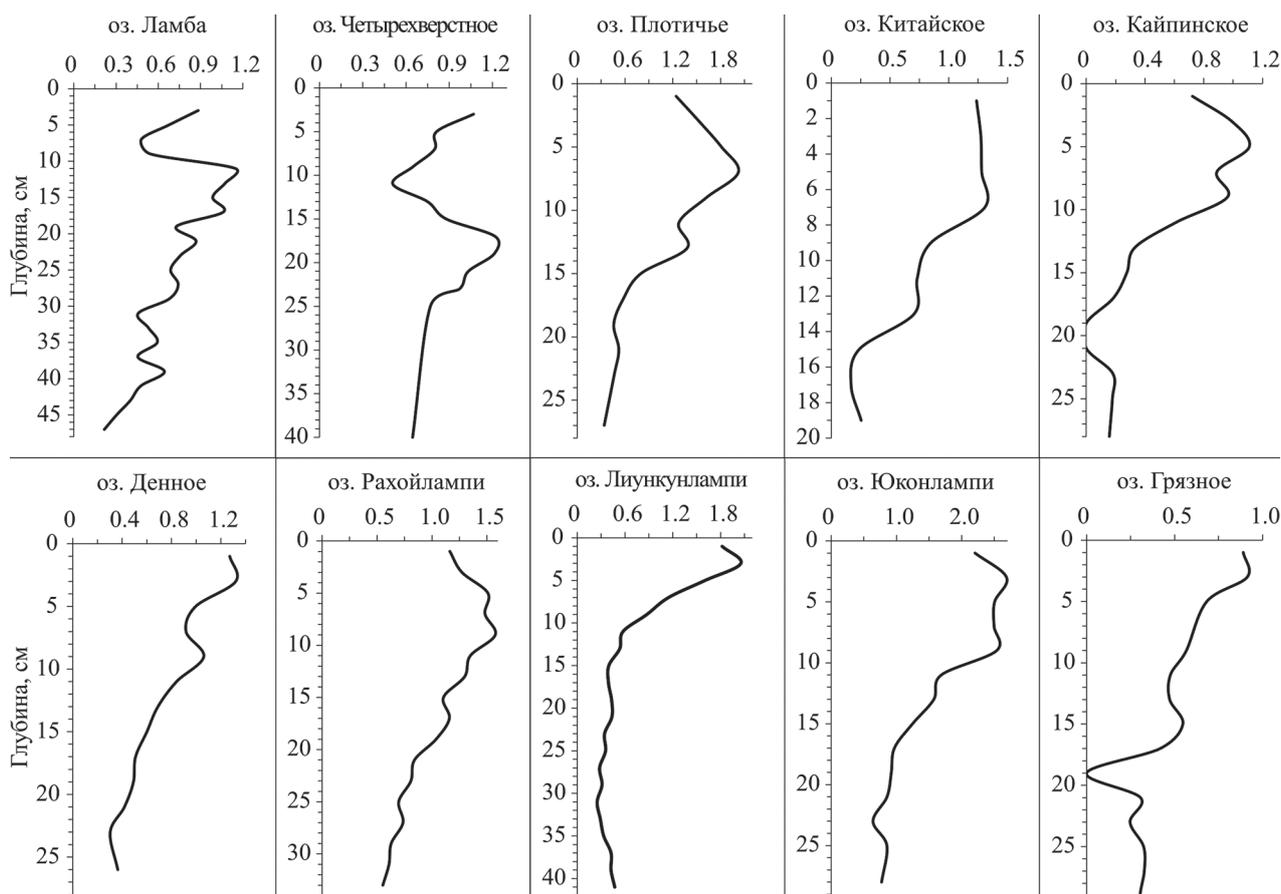


Рис. 4. Вертикальное распределение Cd (мг/кг) в колонках современных ДО некоторых малых озер юга Карелии

Fig. 4. Vertical distribution of Cd (mg/kg) in the cores of sediments of some small lakes in the south of Karelia

них слоях ДО озер только урбанизированных территорий (0,82 мг/кг) и только озер условно фоновых районов (1,08 мг/кг), очевидно, что Cd более интенсивно накапливается в отдаленных от городов Карелии районах. При этом медианное содержание Cd в верхних слоях отложений для всех изученных водоемов (0,84 мг/кг) близко к цифре, полученной только для урбанизированных территорий. Кадмий тесно коррелирует с Sb ($r = 0,55$ при $p < 0,01$) и Pb ($r = 0,61$ при $p < 0,01$), однако эти коэффициенты корреляции несколько ниже уровня корреляции в паре Pb-Sb, что можно объяснить фактором городской среды при формировании геохимических ассоциаций в современных ДО малых озер Карелии. Ранее отмечалось, что для водоемов городов Карелии более типичные загрязнители – Pb и Sb [Слуковский, 2018].

Возраст исследованных современных отложений малых озер юга Карелии был оценен по нескольким параметрам. Во-первых, оценка абсолютного возраста ДО оз. Юконлампи (юго-запад региона) по изотопам Pb-210 и Cs-137 с параллельным определением концентраций

Tm показала, что рост концентраций Pb, Cd и Sb в отложениях водоема датируется началом XX века (рис. 5). При этом наиболее заметное увеличение элементов отмечается в послевоенное время. Средняя скорость седиментации в оцененный период в оз. Юконлампи, согласно данным датирования, получается 1,25 мм/год. Аналогичные скорости седиментации отмечаются в южных районах Финляндии, Швеции и Норвегии, а также в Мурманской области [Håkanson, 1984; Verta et al., 1998; Rognerud et al., 2000; Даувальтер, 2012; Даувальтер и др., 2015]. Во-вторых, принимая во внимание, что процесс накопления металлов в разных озерах юга Карелии, как показано на графиках рис. 2, 3 и 4, происходил по единой модели, допустимо предполагать, что слои ДО, наиболее обогащенные Pb, Cd и Sb, также имеют возраст 100–120 лет. В-третьих, ранее проводимые детальные исследования ДО оз. Ламба, расположенного вблизи Петрозаводской ТЭЦ, работающей на мазуте, выявили геохимический маркер для оценки возраста ДО [Слуковский и др., 2017; Слуковский, 2018]. Этим марке-

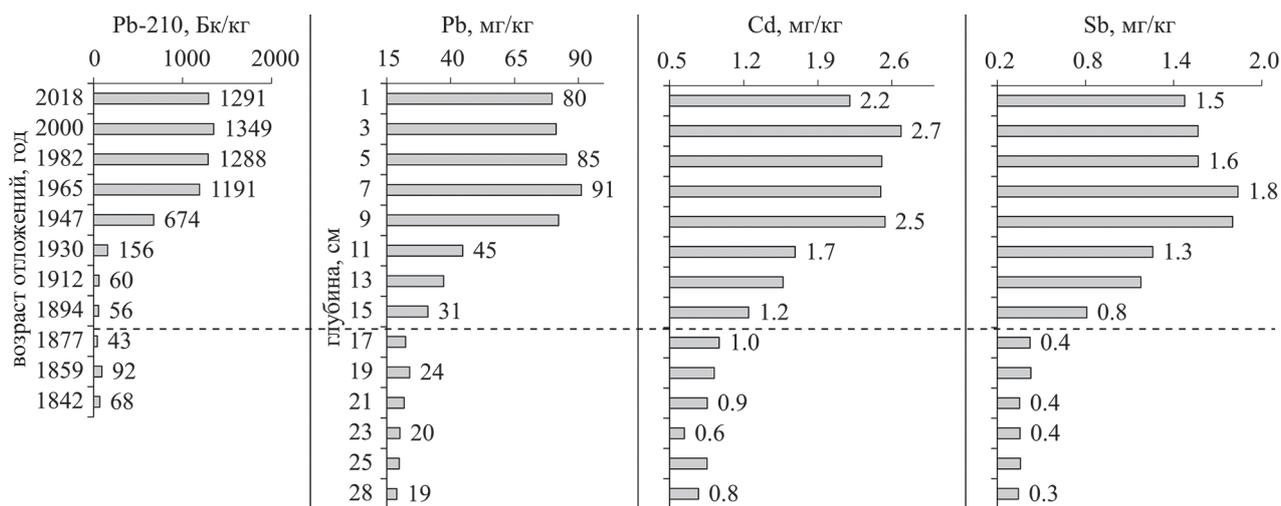


Рис. 5. Вертикальное распределение изотопа Pb-210, Pb, Sb и Cd в ДО оз. Юконлампи

Fig. 5. Vertical distribution of isotope of Pb-210, Pb, Sb and Cd in the sediments of Lake Ukonlampi

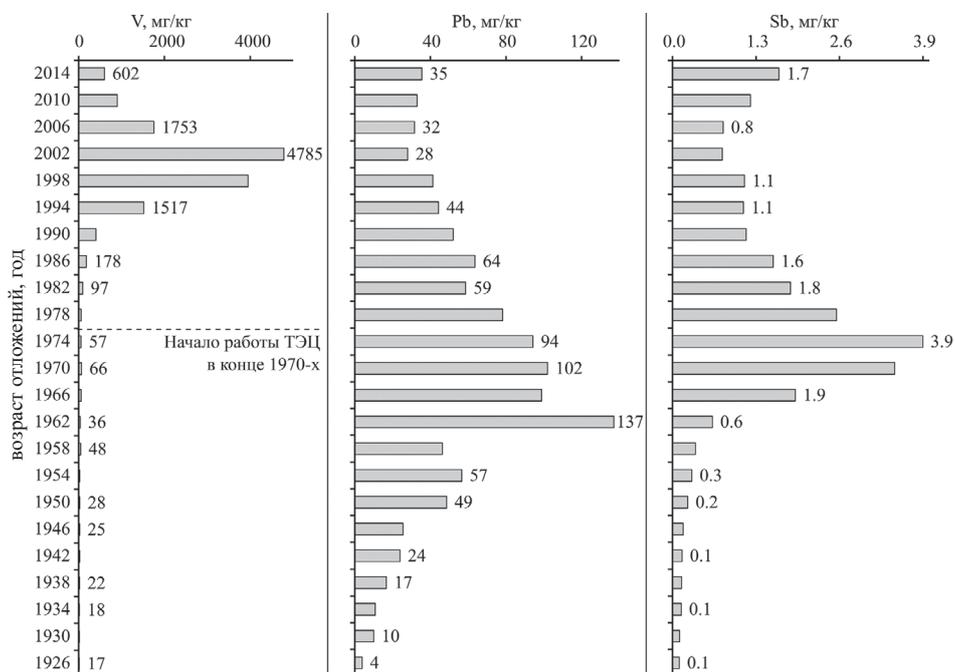


Рис. 6. Вертикальное распределение V, Pb и Sb в ДО оз. Ламба (Петрозаводск)

Fig. 6. Vertical distribution of V, Pb and Sb in the sediments of Lake Lamba (Petrozavodsk)

ром служит ванадий (V) в самых верхних слоях ДО озера, так как этот ТМ является типичной примесью мазута. Рост и снижение концентраций V в слоях от 22 до 0 см маркировали начало работы ТЭЦ в конце 1970-х годов и переход предприятия на природный газ в начале 2000-х (рис. 6). Исходя из этой оценки возраста, «пики» Pb и Sb в ДО оз. Ламба соответствуют середине XX века, а возраст всей колонки изученных озерных осадков составляет около 95 лет при средней скорости седиментации около 3,8 мм/год. Однако данная цифра – это скорее исключение, чем правило, и в среднем

по анализу всех изученных колонок ДО озер юга Карелии можно говорить о скорости седиментации, близкой к 1,25 мм.

Показанные закономерности накопления Pb, Cd и Sb в верхних слоях ДО исследованных озер юга Карелии – типичное поведение загрязнителей окружающей среды севера России и мира. При этом наиболее часто в научной литературе встречается анализ поведения лишь Pb и Cd. Показанные закономерности накопления Pb и Cd находят отражение в исследованиях озерных отложений на территории Мурманской и Архангельской областей, Финляндии, Нор-

вегии, Швеции, Швейцарии, Латвии, Польши, США, Китая, Японии и других стран и регионов [Keinonen, 1992; Rognerud, Fjeld, 1993; Birch et al., 1996; Моисеенко и др., 1997; Verta et al., 1998; Virkutyte et al., 2008; Dauvalter, Kashulin, 2010; Jernström et al., 2010; Даувальтер, 2012; Stankevica et al., 2012; Escobar et al., 2013; Liu et al., 2013; Kuwae et al., 2013; Масленникова и др., 2014; Стародымова и др., 2016; Hosono et al., 2016]. В большинстве случаев «пики» Pb и Cd приходятся не на самые верхние слои отложений, а на слои от 5 до 20 см, датированные временем с середины до конца XX века.

Основным поставщиком изученных металлов в водные объекты служит воздушный перенос, как от местных источников загрязнения, так и от источников загрязнения, расположенных на значительных расстояниях от изучаемых озер [Bartnicki, 1994; Vinogradova et al., 2017; Виноградова, Котова, 2018]. Иногда эти расстояния могут исчисляться сотнями и первыми тысячами километров. Как отмечается в многочисленных работах по изучению поведения ТМ в окружающей среде, в начале эры индустриального развития общества главными источниками Pb, Cd, Sb и некоторых других элементов служили выбросы от сжигания ископаемого угля [Расуна, Расуна, 2001; Krachler et al., 2005; McConnell, Edwards, 2008; McConnell et al., 2019]. Причем тренды поведения этих элементов совпадают начиная с конца XIX века до настоящего времени. Кроме этого, металлы поступали и поступают в атмосферу в результате деятельности предприятий по добыче и переработке руд металлов и сжигания бытовых отходов [Cooke, Abbott, 2008; Kuwae et al., 2013]. Специфическим источником поступления Pb в окружающую среду городов и прилегающих к ним территорий по всему миру стали с 1930-х по начало 2000-х годов выбросы автомобильного транспорта, так как соединение тетраэтилсвинец $Pb(CH_3CH_2)_4$ в этот период использовалось в качестве антидетонирующей присадки в бензин [Thomas, 1995; Komárek et al., 2008]. Частично к маркерам влияния автотранспорта можно отнести и Cd, который входит в состав шин и тормозных колодок, хорошо изнашиваемых в процессе эксплуатации машин. Также Pb и Cd широко применяются в производстве аккумуляторов, которые используются в работе различных транспортных средств, включая городской транспорт. Во всех работах, проводимых в Европе или Северной Америке на основе изучения ледяных или торфяных кернов и колонок ДО, отмечается рост концентраций Pb, Cd и Sb до конца XX столетия и затем снижение концентраций ТМ, вызванное

снижением уровня производственных мощностей предприятий, экологизации производств вследствие введения в западных странах строгих норм для атмосферных выбросов и переноса индустриальных комплексов в страны Юго-Восточной Азии, где, напротив, отмечается рост концентраций металлов в воздухе и различных депонирующих средах в конце XX – начале XXI веков [Liu et al., 2013; Kuwae et al., 2013; Hosono et al., 2016].

Таким образом, все описанные процессы поступления ТМ, включая Pb, Cd и Sb, происходили как раз во время формирования исследованных в данной работе современных озерных ДО Карелии, что и нашло отражение в их геохимической специфике. Можно уверенно констатировать, что ДО индустриального периода малых озер юга республики в среднем значительно обогащены Pb, Cd и Sb (медиана для всех озер соответственно 32,7; 0,84 и 0,68 мг/кг) по сравнению с кларком для верхней части земной коры ($Pb_{14,8}-Sb_{0,3}-Cd_{0,1}$). Безусловно, в крупнейших городах и более индустриально развитых регионах страны и мира и соседних с ними районах современные озерные отложения в значительно большей степени обогащаются изученными металлами. Так, в крупных горнопромышленных районах Перу (Южная Америка) из-за разработок руд, содержащих Pb, Sb, Cd и другие элементы, осадки пресноводных озер, расположенных вблизи предприятий, обогащены Pb до 2500 мг/кг, Cd – до 30 мг/кг и Sb – до 15 мг/кг [Cooke, Abbott, 2008]. В другом крупном индустриально развитом районе, вблизи Карабашского медеплавильного завода (г. Карабаш, Челябинская область), отмечаются экстремальные содержания Pb в верхних слоях ДО до 2000 мг/кг, что в 200 раз выше фоновых для региона. Содержание другого металла, Cd, в этих же отложениях в 220 раз превышает содержание этого элемента в осадках доиндустриального времени [Удачин и др., 2009].

В более близком к Карелии индустриально развитом регионе – Мурманской области крайне высокие значения по Cd можно отметить в ДО оз. Нюдъявр (до 19 мг/кг), принимающего стоки и атмосферные выбросы медно-никелевого комбината вблизи г. Мончегорска [Даувальтер, Кашулин, 2011; Слуковский, Даувальтер, 2019]. Максимальные концентрации Pb (до 130 мг/кг) в осадках этого озера в целом близки к тем значениям, которые получены для городских озер Карелии [Слуковский, 2018]. Описанные примеры экстремально высоких концентраций Pb, Cd и Sb в осадках озер, расположенных вблизи действующих производств,

хорошо иллюстрируют мощность заводских выбросов, с которыми также напрямую связан эффект дальнего переноса поллютантов. Только на отдалении в десятки и сотни километров от выбросов концентрации ТМ в ДО, естественно, становятся значительно ниже. На большей части территории Южной Карелии мы как раз наблюдаем отголоски выбросов различных производственных комплексов соседних регионов в виде аномалий Pb, Cd и Sb в ДО озер, описанных выше. Согласно анализу современного атмосферного переноса ТМ на территорию Карелии, в основном окружающая среда региона испытывает влияние предприятий Мурманской и Ленинградской областей, г. Санкт-Петербурга и ряда стран северо-востока Европы [Виноградова, Иванова, 2013]. Однако в южной части Норвегии, расположенной на одной широте с южной частью Карелии, в самых верхних слоях ДО (0–1 см) содержание Pb в среднем в 3 раза выше, чем в аналогичных слоях ДО российского региона [Rognerud et al., 2000], что можно объяснить большей близостью к Норвегии действующих и недействующих предприятий на территории Западной Европы, нежели к Карелии. С другой стороны, аналогичные сравнения по Cd приводят к обратному результату – его содержание в 2 раза выше в современных ДО Карелии. Во многом это объясняется большим содержанием этого металла в доиндустриальных слоях ДО малых озер юга Карелии по сравнению с соседним регионом.

Согласно расчету индекса геоаккумуляции по каждому металлу, в каждом из исследованных озер Карелии (брались усредненные значения по слоям ДО от 0 до 20 см, а для оз. Ламба дополнительно от 20 до 40 см) высоким уровнем загрязнения Pb характеризуются озера Плотичье ($I_{\text{geo}} = 3,51$), Ламба ($I_{\text{geo}} = 3,27$), Юконлампи ($I_{\text{geo}} = 3,12$) и Четырехверстное ($I_{\text{geo}} = 3,08$), то есть в основном водоемы городов республики. Как отмечалось ранее, на экосистему оз. Юконлампи, расположенного среди лесного массива, также влияет городская среда, только в результате дальнего переноса загрязнителей со стороны г. Санкт-Петербурга [Slukovskii et al., 2020]. Умеренный или высокий уровень загрязнения Pb (I_{geo} от 2 до 3) испытывают озера Денное, Окуньозеро, Удачное, Райватталанлампи, Лиункунлампи, Айранне, Кайпинское, Каймановское, Китайское, Карасозеро, Ганьковское и Рахойлампи. Учитывая тесную корреляцию между Pb и Sb в ДО малых озер Карелии, отмеченную ранее, несложно понять, что примерно те же закономерности по уровню загрязнения установлены и для сурь-

мы. Наиболее высокий уровень загрязнения Sb ($I_{\text{geo}} = 3,43$) установлен для оз. Плотичьего (г. Медвежьегорск). Уровень чуть ниже (I_{geo} от 2 до 3) – для следующих озер: Четырехверстное, Каймановское, Удачное, Юконлампи и Ламба. В остальных случаях выявлены уровни загрязнения от умеренного и ниже. Что касается третьего исследованного металла, Cd, ни в одном водоеме не установлено загрязнение по I_{geo} выше умеренного уровня. Наибольшие величины I_{geo} (от 1 до 2) отмечены лишь в озерах Юконлампи, Райватталанлампи, Удачное, Плотичье, Рахойлампи и Ганьковское. Как можно заметить, в основном это водоемы условно фоновых территорий Южной Карелии. В остальных озерах, включая водоемы урбанизированных территорий, величины I_{geo} ниже 1.

Данные оценки уровня загрязнения озер по I_{geo} созвучны с оценкой пригодности изученных ДО (сапропелей) водоемов юга Карелии в качестве удобрения для нужд сельского хозяйства. Согласно [ГОСТ Р 54000-2010], содержание Pb не должно превышать 50 мг/кг сухого веса для сапропелей 1-го класса пригодности. В этом отношении превышения выявлены лишь для самых загрязненных водоемов – городских малых озер Ламба, Четырехверстное, Плотичье, Денное и Кайпинское, а также озер Лахденпохского района Юконлампи и Лиункунлампи, ближе всех расположенных к источникам дальнего переноса ТМ со стороны стран Западной Европы (рис. 1). Однако и в этом случае угрозу представляют лишь самые верхние слои осадков – до 40 см максимум. Учитывая, что при поиске и освоении сапропелевых месторождений выбор делается в пользу озер с мощностью ДО от 2 метров и выше, самые верхние слои, составляющие первые проценты от всей мощности отложений, можно удалить или не затрагивать при добыче полезного ископаемого. Следует добавить, что по Cd превышений установленной в ГОСТе нормы для сапропелевых отложений, составляющей 3 мг/кг для 1-го класса пригодности, не выявлено ни в одном из изученных малых озер южной части Карелии. При этом в случае оценки пригодности какого-либо из этих водоемов для добычи сапропеля нужно проводить оценку содержания в ДО и других ТМ, а также других (биологических и химических) компонентов озерных отложений.

Принимая во внимание, что наибольшая ценность в таких сапропелевых отложениях принадлежит органическому веществу, с точки зрения экологии важно было провести оценку связи Pb, Cd и Sb именно с этим компонентом ДО, а также выявить уровень подвижности

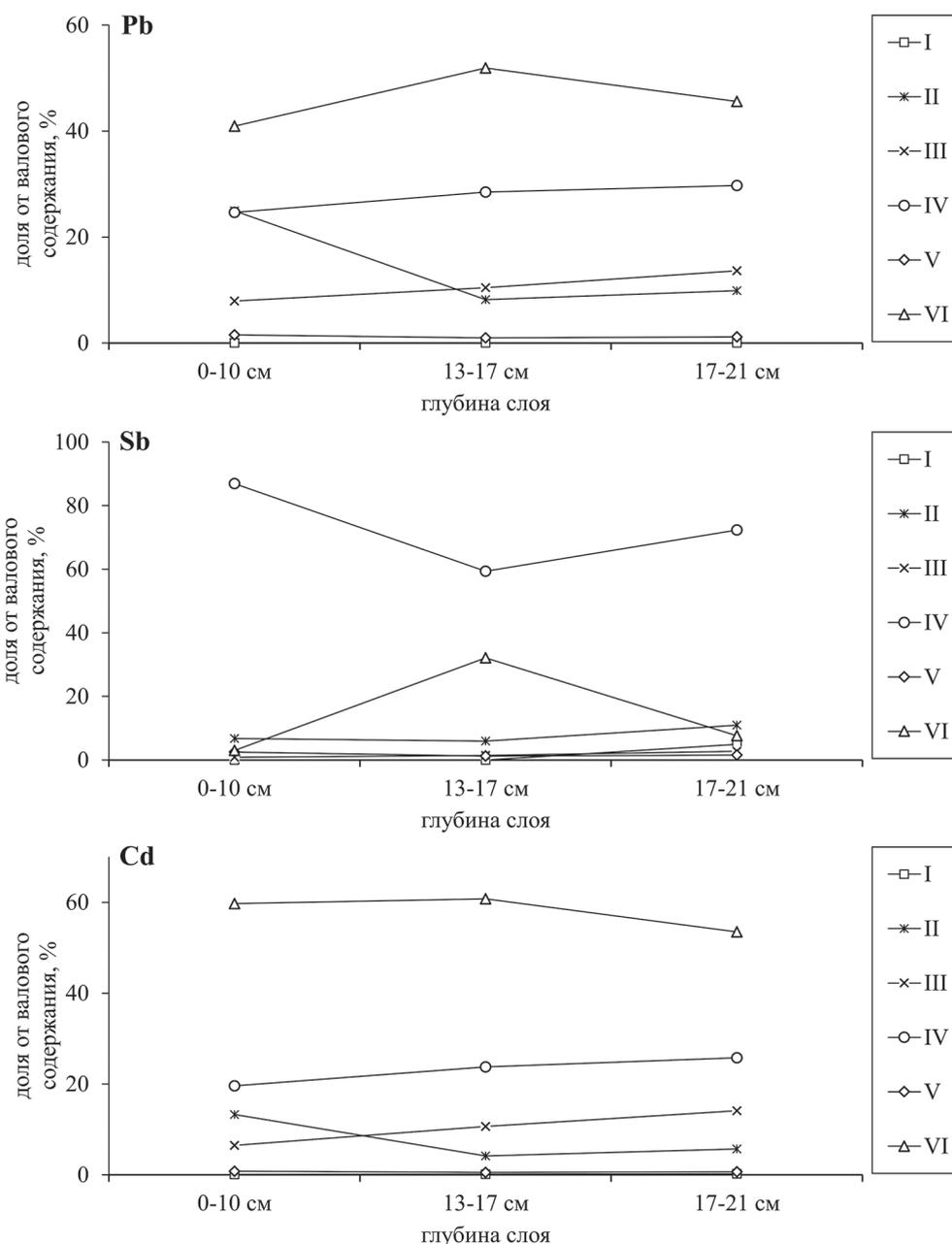


Рис. 7. Распределение форм нахождения Pb, Sb и Cd в ДО оз. Окуньозеро:

I – водорастворимые формы, II – обменные катионы (подвижные формы), III – формы, связанные с гидроокислами Fe и Mn, IV – формы, связанные с органическим веществом, V – кислото-растворимые (остаточные) формы, VI – минеральные формы

Fig. 7. Distribution of Pb, Sb and Cd forms in the sediments of Lake Okunozero:

I – water-soluble fractions, II – available (mobile) fractions, III – fractions bound to Fe and Mn hydroxides, IV – fractions bound to organic matter, V – acid-soluble (residual) fractions, VI – mineral (silicate) phase

указанных ТМ. Так, было установлено, что преимущественно металлы связаны с минеральными фазами ДО и с органическим веществом и в меньшей степени – с соединениями Fe. Например, в озере Окуньозеро Pb более тяготеет к минеральной фазе (41–52 % от валового содержания). В меньшей степени этот металл

связан с органическим веществом ДО водоема (25–30 %). Примерно так же ведет себя и Cd в ДО оз. Окуньозеро (рис. 7). Отмечается рост подвижных форм Pb и Cd в слое отложений 0–10 см, что может представлять потенциальную опасность для водной биоты. С другой стороны, установлена слабая подвижность Sb

в этих же ДО оз. Окуньозеро, однако в отличие от Pb и Cd сурьма преимущественно накапливается в органической составляющей отложений (59–87 % от валового содержания металла). Это необходимо учитывать при возможной добыче сапропеля этого озера, принимая во внимание также тот факт, что в ГОСТе не нормируется содержание Sb.

В остальных озерах, где была изучена принадлежность ТМ к той или иной форме нахождения, также отмечается значительная связь Pb, Cd и Sb с минеральной и органической фазой ДО. В отдельных случаях установлена более или менее значительная роль соединений Fe при аккумуляции в ДО озер Pb (Четырехверстное, Лиункунлампи, Райватталанлампи), Cd (Ламба, Четырехверстное, Лиункунлампи, Райватталанлампи) и Sb (только оз. Райватталанлампи). Однако в среднем роль соединений Fe невелика, что выражается в 5–12 % от валового содержания того или иного металла. Почти во всех озерах выявлены подвижные формы Cd (9–35 % от валового содержания) в самых верхних слоях ДО. Наибольшая подвижность этого металла отмечена в городских озерах Ламба и Четырехверстное и озерах Лиункунлампи и Райватталанлампи. В последних двух водоемах отмечена также роль подвижных форм Pb (25–50 % от валового содержания) в формировании геохимической специфики ДО. О степени экологических последствий такого поведения ТМ для изученных водоемов можно будет судить в дальнейших эколого-геохимических исследованиях малых озер Карелии и всего Северо-Запада России.

С учетом полученных результатов по формам нахождения ТМ, где стоит отметить большое значение органического вещества при сорбции Pb, Cd и Sb и подвижных форм металлов (в первую очередь Cd), необходимо более серьезно оценивать экологическую роль изученных металлов, принимая во внимание, что именно органическая и подвижная формы в большей степени отвечают за миграцию загрязнителей из среды ДО в живые организмы, для которых осадки озер являются местом обитания и питания [López et al., 2010; Moiseenko, 2015]. В дальнейшем живые организмы, в частности рыбы, могут стать объектами питания людей, особенно когда речь идет о городских малых озерах, активно используемых летом и зимой местным населением в рекреационных целях [Vierikko, Yli-Pelkonen, 2019]. Современные темпы развития городских территорий, в том числе в северных регионах, создают необходимые предпосылки для разработки самых серьезных мер по улучшению качества го-

родской среды и современного прогрессивного менеджмента для поддержания достигнутых результатов на высоком уровне в настоящем и будущем.

Заключение

В результате проведенных исследований толщи современных ДО малых озер юга Карелии установлено среднее фоновое содержание высокотоксичных халькофильных элементов Pb, Cd и Sb, равное 4,6; 0,41 и 0,17 мг/кг соответственно. По сравнению с кларками земной коры фоновые (доиндустриальные) слои озерных осадков Карелии обеднены Pb и Sb и обогащены Cd. Сопоставление установленных величин фонового содержания Pb, Cd и Sb в ДО малых озер юга Карелии и других районов севера Европы и Сибири выявило схожесть либо расхождение, отражающие природные особенности накопления озерных донных отложений. В верхних слоях ДО озер различных районов Карелии отмечается отчетливое увеличение концентраций Pb, Cd и Sb (до 140; 2,7 и 4,5 мг/кг соответственно) по сравнению с нижними фоновыми слоями. Наибольшее накопление этих элементов обычно происходит не в поверхностном слое ДО, а на глубинах приблизительно от 5 до 30 см, что по времени осадконакопления совпадает с максимальным уровнем выбросов загрязняющих веществ в Карелии и Европе в целом с середины до конца XX века. Уменьшение концентраций Pb, Sb и Cd в поверхностных слоях ДО озер юга Карелии вызвано снижением уровня производственных мощностей предприятий после распада СССР, запретом производства этилированного бензина, введением в западных странах строгих норм для атмосферных выбросов и перенесением промышленного производства с высоким уровнем выбросов загрязняющих веществ в страны Юго-Восточной Азии. Установлено значительное обогащение Pb, Cd и Sb (от 2 до 8 раз) ДО индустриального периода малых озер юга республики (медиана для всех озер соответственно 32,7; 0,84 и 0,68 мг/кг) по сравнению с фоновыми значениями и кларком земной коры. Высоким и умеренным уровнем загрязнения Pb, Sb и Cd согласно расчету индекса геоаккумуляции характеризуются в основном водоемы городов Карелии. Анализ форм нахождения исследуемых элементов в ДО озер Карелии выявил, что они преимущественно связаны с минеральными фазами и органическим веществом. В меньшей степени Pb, Sb и Cd в ДО находятся в формах, связанных с гидроксидами Fe и Mn, и обменных формах, что может

представлять потенциальную опасность для гидробионтов при изменении физико-химических условий (например, pH, Eh, минерализации) в водной толще и ДО озер. Вследствие большого содержания органического вещества и значительной мощности ДО озер южной части Карелии являются потенциальными полезными ископаемыми (сапропелями) и могут быть использованы в качестве удобрения для нужд сельского хозяйства. Высокие и умеренные уровни загрязнения ДО выявлены главным образом в городских водоемах, поэтому сапропели озер, удаленных от промышленных и городских центров на несколько десятков километров, могут рекомендоваться для сельскохозяйственного использования. Можно также рекомендовать использование сапропелей озер, находящихся вблизи промышленных и городских центров, но с условием удаления верхних (до 40 см) слоев, содержащих в себе повышенные концентрации загрязняющих элементов.

Авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам А. С. Медведеву, Е. В. Сыроежко, Д. Г. Новицкому и М. А. Медведеву за помощь в отборе проб ДО озер, а также О. П. Корытной, А. С. Парамонову, С. В. Бурдюху, М. В. Эховой и В. Л. Утициной за качественное проведение аналитических исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00897), а также в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Литература

- Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3(83). С. 135–139.
- Виноградова А. А., Котова Е. И. Вклады источников Европы в загрязнение свинцом и кадмием северных районов Европейской России // Живые и биокосные системы [Электронный ресурс]. 2018. № 23. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-23/article-2> (дата обращения: 03.12.2019).
- Виноградова А. А., Иванова Ю. А. Загрязнение воздушной среды в центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 5. С. 98–108.
- Водяницкий Ю. Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюлл. Почв. ин-та. 2011. № 68. С. 56–82.
- ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия».
- Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах севера европейской части России. Мурманск: МГТУ, 2015. 136 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Эколого-экономическая оценка необходимости извлечения донных отложений оз. Нюдъявр Мончегорского района Мурманской области // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 884–891.
- 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
- Даувальтер В. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Удачин В. Н., Филиппова К. А., Борисов А. П. Реконструкция загрязнения территории полуострова Рыбачий Мурманской области тяжелыми металлами // Труды ФНС. 2018. № 15. С. 441–444. doi: 10.31241/FNS.2018.15.112
- Демидов И. Н., Шелехова Т. С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.
- Лаврова Н. Б. Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2005. № 8. С. 143–148.
- Масленникова А. В., Удачин В. Н., Дерягин В. В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 136 с.
- Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П., Каган Л. Я., Ильяшук Е. А. Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки // ДАН. 2000. № 1. С. 115–118.
- Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Родюшкин И. В. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 127 с.
- Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова и В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасов А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Светов С. А., Степанова А. В., Чаженина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный геохимический (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140
- Синькевич Е. И., Экман И. М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

Слуковский З. И. Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия) // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23, № 4. С. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Слуковский З. И. Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды (Республика Карелия) // Водное хозяйство России. 2018. № 6. С. 70–82.

Слуковский З. И., Даувальтер В. А. Морфология и состав техногенных частиц донных отложений оз. Нюдъявр, Мурманская область // Записки РМО. 2019. № 3. С. 102–117. doi: 10.30695/zrmo/2019.1483.102–117

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. 2017. № 10. С. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Стародымова Д. П., Шевченко В. П., Кокрятская Н. М., Алиев Р. А., Бычков А. Ю., Забелина С. А., Чулаков А. В. Геохимия донных осадков малого озера (водосбор Онежского озера, Архангельская область) // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 172–177.

Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2011. 24 с.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

Томилина О. В., Паламчук С. Ф., Яхнин Э. Я., Егоров А. И. Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35,36. Т. 2: Отчет о научно-исследовательской работе. СПб., 2004. 146 с.

Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002. 415 с.

Удачин В. Н., Дерягин В. В., Китагава Р., Аминов П. Г. Изотопная геохимия донных отложений озер Южного Урала для оценки масштабов горно-промышленного техногенеза // Вестник ТГУ. 2009. № 3. С. 144–149.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.

Янин Е. П. Формы нахождения кадмия в техногенных илах реки Пахры и оценка его миграционных способностей. География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 42–46.

Bartnicki J. An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results // Water Air Soil Pollut. 1994. Vol. 75(3-4). P. 227–263. doi: 10.1007/BF00482939

Birch L., Hanselmann K. W., Bachofen R. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments: Historical records of anthropogenic emissions in a meromictic al-

pine lake // Water Res. 1996. Vol. 30, iss. 3. P. 679–687. doi: 10.1016/0043–1354(95) 00231–6

Cooke C. A., Abbott M. B. A paleolimnological perspective on industrial-era metal pollution in the central Andes, Peru // Sci. Total Environ. 2008. Vol. 393. P. 262–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.034

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of the Arctic freshwater system based on concentrations of heavy metals in the bottom sediments // Geochem. Int. 2018. Vol. 56, no. 8. P. 842–856. doi: 10.1134/S0016702918080037

Dauvalter V., Kashulin N. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in Lake Umbozero, Murmansk Province // Water Res. 2010. No. 37. P. 497–512.

Dauvalter V., Kashulin V., 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 A Tox Hazar. 2011. Vol. 46. P. 1020–1033.

Ermakov V. V. Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons // Geochem. Int. 2015. Vol. 53, no. 3. P. 195–212. doi: 10.1134/S0016702915030064

Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA // J. Paleolimnol. 2013. Vol. 49(2). P. 237–252.

Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area // J. Soils Sediments. 2004. Vol. 4(4). P. 247–260.

Håkanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects // Water Resour. Res. 1984. Vol. 20(1). P. 41–46.

Hosono T., Alvarez K., Kuwae M. Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources // Sci. Total Environ. 2016. Vol. 559. P. 24–37.

Jernström J., Lehto J., Dauvalter V. A., Hatakka A., Leskinen A., Paatero J. Heavy metals in bottom sediments of Lake Umbozero in Murmansk Region, Russia // Environ. Monit. Assess. 2010. Vol. 161, no. 1–4. P. 93–105.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia // J. Environ. Sci. Health A. 2017. Vol. 52, no. 9. P. 921–929.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // Sci. Total Environ. 1992. Vol. 113(3). P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrástný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review // Environ. Int. 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j.envint.2007.10.005

Krachler M., Zheng J., Koerner R., Zdanowicz C., Fisher D., Shotyk W. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada // J. Environ. Monitor. 2005. Vol. 7(12). P. 1169–1176. doi: 10.1039/b509373b

Kuwae M., Tsugeki N. K., Agusa T., Toyoda K., Tani Y., Ueda S., Tanabe S., Urabe J. Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia // *Sci. Total Environ.* 2013. Vol. 442. P. 189–197. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.037

Liu E., Zhang E., Li K., Nath B., Li Y., Shen J. Historical reconstruction of atmospheric lead pollution in central Yunnan province, southwest China: an analysis based on lacustrine sedimentary records // *ESPR.* 2013. Vol. 20. P. 8739–8750. doi: 10.1007/s11356-013-1861-0

López D. L., Gierlowski-Kordesch E., Hollenkamp C. Geochemical Mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio // *Water Air Soil Pollut.* 2010. Vol. 213. P. 27–45.

McConnell J. R., Chellman N. J., Wilson A. I., Stohl A., Arienzo M. M., Eckhardt S., Steffensen J. P. Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict // *PNAS.* 2019. Vol. 116(30). P. 14910–14915. doi: 10.1073/pnas.1904515116

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // *PNAS.* 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Medvedev A., Slukovskii Z., Novitckiy D. Heavy metals pollution of small urban lakes sediments within the Onego Lake catchment area // *Polish J. Nat. Sci.* 2019. Vol. 34(2). P. 245–256.

Moiseenko T. I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish // *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53. P. 213–223.

Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. – Veränderungen seit 1971 // *Umschau in Wissenschaft und Technik.* 1979. N. 79. S. 778–783.

Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals // *Nature.* 1988. Vol. 333. P. 134–139.

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // *Environ. Rev.* 2001. Vol. 9. P. 269–298.

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R. T. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway // *Environ. Geol.* 2000. Vol. 39(7). P. 723–732.

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

Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E. Long-range transport of heavy metals as a factor of the formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia // *J. Elementol.* 2020. Vol. 25(1). P. 125–137. doi: 10.5601/jelem.2019.24.1.1816

Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // *Material Science and Applied Chemistry.* 2012. Vol. 26. P. 99–105.

Tessier A., Campbell P. G., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. No. 51(7). P. 844–851.

Thomas V. The elimination of lead in gasoline // *Annu. Rev. Energ. Environ.* 1995. Vol. 20. P. 301–324. doi: 10.1146/annurev.eg.20.110195.001505

Tylmann W., Łysek K., Kinder M., Pempkowiak J. Regional pattern of heavy metal content in lake sediments in northeastern Poland // *Water Air Soil Pollut.* 2011. Vol. 216(1–4). P. 217–228. doi: 10.1007/s11270-010-0529-3

Verta M., Tolonen K., Simola H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments // *Sci. Total Environ.* 1998. Vol. 87/88. P. 1–18.

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia // *Geography and Nat. Resources.* 2017. Vol. 38(1). P. 78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

Vierikko K., Yli-Pelkonen V. Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland // *Urban Ecosystems.* 2019. Vol. 22. P. 769–783. doi: 10.1007/s11252-019-00849-7

Virkutyte J., Vadakojyte S., Sinkevičius S., Sillanpää M. Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi* // *J. Chem. Ecol.* 2008. Vol. 24(2). P. 119–132. doi: 10.1080/02757540801920105

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59, no. 7. P. 1217–1232. doi: 10.1016/0016-7037(95)00038-2

Поступила в редакцию 13.02.2020

References

Belkina N. A., Subetto D. A., Efremenko N. A., Kullik N. V. Osobennosti raspredeleniya mikroelementov v poverkhnostnom sloe donnykh otlozhenii Onezhskogo ozera [Features of the distribution of trace elements in the surface layer of bottom sediments of Lake Onega]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2016. No. 3(83). P. 135–139.

Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of lakes bottom sediments]. Murmansk: MGTU, 2012. 242 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Biogeokhicheskie osobennosti raspredeleniya khal'kofil'nykh elementov (Hg, Cd, Pb, As) v vodoemakh severa evropeiskoi chasti Rossii [Biogeochemical features of the distribution

of chalcophilic elements (Hg, Cd, Pb, As) in water bodies in the north of the European part of Russia]. Murmansk: MGTU, 2015. 136 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka neobkhodimosti izvlecheniya donnykh otlozhenii oz. Nyud'yavr Monchegorskogo raiona Murmanskoi oblasti [Ecological and economic assessment of the need to extract bottom sediments of Lake Nyudyavr, Monchegorsk District of the Murmansk Region]. *Vestnik MGTU* [Bull. MSTU]. 2011. Vol. 14, no. 4. P. 884–891.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Tendentsii izmeneniya soderzhaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Severa Fennoskandii v po-

slednie stoletiya [Trends in heavy metal content in bottom sediments of lakes in the North of Fennoscandia in recent centuries]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 9. P. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Dauval'ter V. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B., Udachin V. N., Filippova K. A., Borisov A. P. Rekonstruktsiya zagryazneniya territorii poluoostrova Rybachii Murmanskoi oblasti tyazhelymi metallami [Reconstruction of pollution of the territory of the Rybachy Peninsula of the Murmansk Region with heavy metals]. *Trudy FNS* [Proceed. Fersman Sci. Session]. 2018. No. 15. P. 441–444. doi: 10.31241/FNS.2018.15.112

Demidov I. N., Shelekhova T. S. Diatomity Karelii (osobennosti formirovaniya, rasprostraneniya, perspektivy ispol'zovaniya) [Diatomites of Karelia (features of formation, distribution, prospects of use)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. 89 p.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Solodovnikov A. N., Morozov A. K. Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas [Soils of Karelia: A geochemical atlas]. Moscow: Nauka, 2008. 47 p.

GOST R 54000-2010 «Udobreniya organicheskie. Sapropeli. Obshchie tekhnicheskie usloviya» [GOST R 54000-2010 Organic fertilizers. Sapropels. General specifications].

Lavrova N. B. Razvitie rastitel'nosti basseina Onezhskogo ozera v khode degradatsii poslednego oledeniya [Development of vegetation of the Lake Onega basin during the degradation of the last glaciation]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. 2005. No. 8. P. 143–148.

Maslennikova A. V., Udachin V. N., Deryagin V. V. Paleoeкологиya i geokhimiya ozernoi sedimentatsii golotsena Urala [Paleoecology and geochemistry of lake sedimentation of the Holocene of the Urals]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2014. 136 p.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Il'yashuk B. P., Kagan L. Ya., Il'yashuk E. A. Paleoeologicheskaya rekonstruktsiya antropogennoi nagruzki [Paleoecological reconstruction of anthropogenic load]. *DAN* [Proceed. RAS]. 2000. No. 1. P. 115–118.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Rodyushkin I. V. Geokhimicheskaya migratsiya elementov v subarkticheskom vodoeme (na primere ozera Imandra) [Geochemical migration of elements in a subarctic pond (on the example of Lake Imandra)]. Apatity: KNTs RAN, 1997. 127 p.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. A reference book]. Eds N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P., Smirnova R. S., Basharkovich I. L., Onishchenko T. L., Pavlova L. N., Trefilova N. Ya., Achkasov A. I., Sarkisyan S. Sh. Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

Sin'kevich E. I., Ekman I. M. Donnye otlozheniya ozer Vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo kristallicheskogo shchita [Bottom sediments of lakes in the eastern part of the Fennoscandian crystalline shield]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1995. 177 p.

Slukovskii Z. I. Normirovanie po litiyu kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Ladozhskoe i Chetyrekhverstnoe (Respublika Kare-

liya) [Normalization of lithium concentrations of heavy metals in the bottom sediments of Lakes Ladoga and Chetyrekhverstnoe (Republic of Karelia)]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Slukovskii Z. I. Mikroelementnyi sostav donnykh otlozhenii malykh ozer kak indikator vznikhoveniya ekologicheskikh riskov v usloviyakh urbanizirovannoi sredy (Respublika Kareliya) [Microelement composition of bottom sediments of small lakes as an indicator of environmental risks in the urban environment of the Republic of Karelia]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water Economy of Russia]. 2018. No. 6. P. 70–82.

Slukovskii Z. I., Dauval'ter V. A. Morfologiya i sostav tekhnogennykh chastits donnykh otlozhenii oz. Nyud'yavr, Murmanskaya oblast' [Morphology and composition of technogenic particles in bottom sediments of the Lake Nudyavr, Murmansk Region]. *Zapiski RMO* [Proceed. RMS]. 2019. No. 3. P. 102–117. doi: 10.30695/zrmo/2019.1483.102-117

Slukovskii Z. I., Il'mast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. Geokhimicheskaya spetsifika protsessa 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

Starodymova D. P., Shevchenko V. P., Kokryatskaya N. M., Aliev R. A., Bychkov A. Yu., Zabelina S. A., Chupakov A. V. Geokhimiya donnykh osadkov malogo ozera (vododbor Onezhskogo ozera, Arkhangel'skaya oblast') [Geochemistry of bottom sediments of a small lake (catchment of Lake Onega, Arkhangel'sk region)]. *Uspekhi sovr. estestvoznaniya* [Advances in Current Nat. Sci.]. 2016. No. 9. P. 172–177.

Strakhovenko V. D. Geokhimiya donnykh otlozhenii malykh kontinental'nykh ozer Sibiri [Geochemistry of bottom sediments of the small continental lakes of Siberia]: DSc (Dr. of Geol. and Miner.) thesis. Novosibirsk, 2011. 24 p.

Subetto D. A. Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstruction]. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 343 p.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhoval M. V., Kolodei V. S. Pretsizionnyi geokhimicheskii (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of the composition of rocks and minerals: methodology and evaluation of the accuracy of the results by the example of early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Tomilina O. V., Palamchuk S. F., Yakhnin E. Ya., Egorov A. I. Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i pro-

vedenie operezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeolokarty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35,36 [Geochemical mapping of the north of the European territory of Russia within the framework of the international program *Ecogeochemistry of the Barents Region* and the leading stage of compiling the geochemical foundations of the third generation State Geological Map-1000 on sheets P-35.36]. Vol. 2: A research report. St. Petersburg, 2004. 146 p.

Trofimov V. T., Ziling D. G. *Ekologicheskaya geologiya* [Environmental geology]. Moscow: Geoinformark, 2002. 415 p.

Udachin V. N., Deryagin V. V., Kitagava R., Aminov P. G. Izotopnaya geokhimiya donnykh otlozhenii ozer Yuzhnogo Urala dlya otsenki masshtabov gornopromyshlennogo tekhnogeneza [Isotopic geochemistry of bottom sediments in lakes of the Southern Urals for assessing the extent of mining technogenesis]. *Vestnik TGU* [Tomsk St. Univ. Bull.]. 2009. No. 3. P. 144–149.

Vinogradova A. A., Kotova E. I. Vklady istochnikov Evropy v zagryaznenie svintsom i kadmiem severnykh raionov Evropeiskoi Rossii [Contributions of European sources to lead and cadmium pollution in the northern regions of European Russia]. *Zhivye i biokosnye sistemy* [Living and Biocos Systems]. 2018. No. 23. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-23/article-2> (accessed: 03.12.2019).

Vinogradova A. A., Ivanova Yu. A. Zagryaznenie vozduшной sredy v tsentral'noi Karelii pri dal'nem perenose antropogennykh primesei v atmosfere [Air pollution in central Karelia during long-range transport of anthropogenic impurities in the atmosphere]. *Izvestiya RAN. Ser. geogr.* [Bull. RAS. Geographical ser.]. 2013. No. 5. P. 98–108.

Vodyanitskii Yu. N. Ob opasnykh tyazhelykh metal-lakh/metalloidakh v pochvakh [On hazardous heavy metals/metalloids in soils]. *Byull. Pochv. in-ta* [Bull. Dokuchaev Soil Inst.]. 2011. No. 68. P. 56–82.

Yanin E. P. Formy nakhozhdeniya kadmiya v tekhnogennykh ilakh reki Pakhry i otsenka ego migratsionnykh sposobnostei [Forms of the presence of cadmium in technogenic silts of the Pakhra River and assessment of its migration abilities]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2011. No. 1. P. 42–46.

Barnicki J. An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results. *Water Air Soil Pollut.* 1994. Vol. 75(3-4). P. 227–263. doi: 10.1007/BF00482939

Birch L., Hanselmann K. W., Bachofen R. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments: Historical records of anthropogenic emissions in a meromictic alpine lake. *Water Res.* 1996. Vol. 30, iss. 3. P. 679–687. doi: 10.1016/0043-1354(95)00231-6

Cooke C. A., Abbott M. B. A paleolimnological perspective on industrial-era metal pollution in the central Andes, Peru. *Sci. Total Environ.* 2008. Vol. 393. P. 262–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.034

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of the Arctic freshwater system based on concentrations of heavy metals in the bottom sediments. *Geochem. Int.* 2018. Vol. 56, no. 8. P. 842–856. doi: 10.1134/S0016702918080037

Dauvalter V., Kashulin N. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in lake Umbozero, Murmansk Province. *Water Res.* 2010. No. 37. P. 497–512.

Dauvalter V., Kashulin V., 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 A Tox Hazar.* 2011. Vol. 46. P. 1020–1033.

Ermakov V. V. Geochemical ecology and biogeochemical criteria for estimating the ecologic state of biospheric taxons. *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53, no. 3. P. 195–212. doi: 10.1134/S0016702915030064

Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *J. Paleolimnol.* 2013. Vol. 49(2). P. 237–252.

Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *J. Soils Sediments.* 2004. Vol. 4(4). P. 247–260.

Håkanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects. *Water Resour. Res.* 1984. Vol. 20(1). P. 41–46.

Hosono T., Alvarez K., Kuwae M. Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources. *Sci. Total Environ.* 2016. Vol. 559. P. 24–37.

Jernström J., Lehto J., Dauvalter V. A., Hatakka A., Leskinen A., Paatero J. Heavy metals in bottom sediments of Lake Umbozero in Murmansk Region, Russia. *Environ. Monit. Assess.* 2010. Vol. 161, no. 1–4. P. 93–105.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia. *J. Environ. Sci. Health A.* 2017. Vol. 52, no. 9. P. 921–929.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *Sci. Total Environ.* 1992. Vol. 113(3). P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrastný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environ. Int.* 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j.envint.2007.10.005

Krachler M., Zheng J., Koerner R., Zdanowicz C., Fisher D., Shotyck W. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada. *J. Environ. Monitor.* 2005. Vol. 7(12). P. 1169–1176. doi: 10.1039/b509373b

Kuwae M., Tsugeki N. K., Agusa T., Toyoda K., Tani Y., Ueda S., Tanabe S., Urabe J. Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia. *Sci. Total Environ.* 2013. Vol. 442. P. 189–197. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.037

Liu E., Zhang E., Li K., Nath B., Li Y., Shen J. Historical reconstruction of atmospheric lead pollution in central Yunnan province, southwest China: an analysis based on lacustrine sedimentary records. *ESPR.* 2013. Vol. 20. P. 8739–8750. doi: 10.1007/s11356-013-1861-0

López D. L., Gierlowski-Kordesch E., Hollenkamp C. Geochemical mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio. *Water Air Soil Pollut.* 2010. Vol. 213. P. 27–45.

McConnell J. R., Chellman N. J., Wilson A. I., Stohl A., Arienzo M. M., Eckhardt S., Steffensen J. P. Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict. *PNAS.* 2019. Vol. 116(30). P. 14910–14915. doi: 10.1073/pnas.1904515116

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *PNAS.* 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Medvedev A., Slukovskii Z., Novitsky D. Heavy metals pollution of small urban lakes sediments within the Onego Lake catchment area. *Polish J. Nat. Sci.* 2019. Vol. 34(2). P. 245–256.

Moiseenko T. I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochem. Int.* 2015. Vol. 53. P. 213–223.

Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. – Veränderungen seit 1971. *Umschau in Wissenschaft und Technik.* 1979. No. 79. P. 778–783.

Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals. *Nature.* 1988. Vol. 333. P. 134–139.

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environ. Rev.* 2001. Vol. 9. P. 269–298.

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R. T. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway. *Environ. Geol.* 2000. Vol. 39(7). P. 723–732.

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

Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E. Long-range transport of heavy metals as a factor of the

formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia. *J. Elementol.* 2020. Vol. 25(1). P. 125–137. doi: 10.5601/jelem.2019.24.1.1816

Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel. *Material Science and Applied Chemistry.* 2012. Vol. 26. P. 99–105.

Tessier A., Campbell P. G., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 1979. No. 51(7). P. 844–851.

Thomas V. The elimination of lead in gasoline. *Annu. Rev. Energ. Environ.* 1995. Vol. 20. P. 301–324. doi: 10.1146/annurev.eg.20.110195.001505

Tylmann W., Łysek K., Kinder M., Pempkowiak J. Regional pattern of heavy metal content in lake sediments in northeastern Poland. *Water Air Soil Pollut.* 2011. Vol. 216(1–4). P. 217–228. doi: 10.1007/s11270-010-0529-3

Verta M., Tolonen K., Simola H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments. *Sci. Total Environ.* 1998. Vol. 87/88. P. 1–18.

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. *Geography and Nat. Resources.* 2017. Vol. 38(1). P. 78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

Vierikko K., Yli-Pelkonen V. Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland. *Urban Ecosystems.* 2019. Vol. 22. P. 769–783. doi: 10.1007/s11252-019-00849-7

Virkutyte J., Vadakojyte S., Sinkevičius S., Sillanpää M. Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi.* *J. Chem. Ecol.* 2008. Vol. 24(2). P. 119–132. doi: 10.1080/02757540801920105

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59, no. 7. P. 1217–1232. doi: 10.1016/0016-7037(95)00038-2

Received February 13, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слуковский Захар Иванович

старший научный сотрудник лаб. водных экосистем, к. б. н. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН» мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209

старший научный сотрудник лаб. геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии Институт геологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр» РАН ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: slukovsky87@gmail.com
тел.: 89602140712

CONTRIBUTORS:

Slukovskii, Zakhar

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences 14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: slukovsky87@gmail.com
tel.: +79602140712

Даувальтер Владимир Андреевич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем, д. г. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: vladimir@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79774

Dauvalter, Vladimir

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