

Уровень аккумуляции и формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях малых озер урбанизированной среды (Карелия)*

З. И. Слуковский

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
Российская Федерация, 184209, Апатиты, ул. Академгородок, 13а
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Для цитирования: Слуковский, З. И. (2020). Уровень аккумуляции и формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях малых озер урбанизированной среды (Карелия). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (1), 171–192.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.109>

В статье приводится детальный анализ эколого-геохимических особенностей донных отложений двух малых озер, расположенных в черте г. Петрозаводска (Республика Карелия). Отбор проб озерных осадков был проведен в 2016 и 2018 гг. при помощи торфяного бура для глубоких слоев отложений и пробоотборника Linnpos для современных слоев донных осадков. В лабораторных условиях после просушки и истирания образцы были проанализированы на содержание в донных отложениях главных элементов и тяжелых металлов при помощи рентгенофлуорисцентного спектрометра и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой. Оценка форм нахождения тяжелых металлов в отложениях озер г. Петрозаводска была выполнена методом последовательной экстракции химических элементов. Для экологической интерпретации полученных результатов были рассчитаны суммарный показатель загрязнения и индексы геоаккумуляции для каждого из водоемов. В результате было установлено, что озера имеют разную геохимическую спецификацию и различный уровень загрязнения тяжелыми металлами. Наибольший уровень накопления в донных отложениях по сравнению с фоном отмечен по Pb, Sb, V, Cu, Zn, W и Bi. При этом отложения оз. Четырехверстного характеризуются уровнем загрязнения от низкого до среднего, а осадки оз. Ламба — от низкого до очень сильного. Почти все металлы преимущественно находятся в минеральной форме в донных отложениях, однако значительная часть загрязнителей имеет сродство с обменными катионами (подвижная форма) и органическим веществом озерных осадков, что представляет существенную опасность для миграции загрязнителей по системам «донные отложения — вода» и «донные отложения — биота».

Ключевые слова: тяжелые металлы, донные отложения, формы нахождения загрязнителей, малые озера, урбанизация, Республика Карелия.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00897 «а»).

1. Введение

Северные районы России богаты водными ресурсами, в том числе ресурсами озер, которые исчисляются десятками тысяч вследствие деятельности ледника, сошедшего 10 тыс. лет назад (Филатов и др., 2001). На территории Республики Карелии, например, по примерным подсчетам, расположено около 61 тысячи озер, большинство из которых относятся к категории малых озер с площадью зеркала не более 1 км² (Синькевич и Экман, 1995). Несмотря на относительно низкий уровень антропогенного преобразования окружающей среды на территории Карелии, в центральной и южной частях региона выделяются отдельные районы с повышенной интенсивностью техногенного воздействия на природные объекты, в том числе на поверхностные воды (Shevchenko et al., 2005; Лозовик и Галахина, 2017; Потахин и др., 2018; Слукровский, 2018). В число таких районов входят урбанизированные территории, где отмечается повышенный фон загрязняющих веществ в донных отложениях (ДО) озер по сравнению с природными концентрациями химических элементов (Слукровский, 2018). Самую крупную урбанизированную территорию Карелии образует г. Петрозаводск с населением 270 тыс. человек, развитой инфраструктурой и промышленностью. В районе г. Петрозаводска расположено несколько малых водных объектов, испытывающих значительную антропогенную нагрузку (Водные..., 2013).

Загрязнение водной среды — одна из основных проблем современного общества (Bartnicki, 1994; Violante et al., 2007; Моисеенко и Гашкина, 2010). Тенденции по снижению выбросов промышленных предприятий в отдельных регионах мира приводят к снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха и воды в текущий момент времени, однако накопленный ущерб от антропогенной нагрузки на окружающую среду в течение последних столетий находит отражение в химическом составе такой инертной с точки зрения самоочищения среды как ДО водных объектов (Davydova et al., 1999; Шафигуллина и Удачин, 2009; Stankevica et al., 2012; Даувальтер, 2012; Янин, 2013; Kuwae et al., 2013).

Опасность загрязнения ДО вызвана их тесным контактом с водной средой и вовлечением многих химических элементов, в том числе и тяжелых металлов (ТМ), в биологический круговорот — миграцию загрязнителей по цепям питания живых организмов (Моисеенко и др., 1997). В результате происходит накопление ТМ в телах организмов и деградация тканей вплоть до гибели отдельных особей и даже групп животных или растений (Rainbow et al., 2012; Harguinteguy et al., 2014).

Широко известна роль отдельных металлов (Cu, Zn, Mo) в развитии биоты и в то же время токсичные свойства при воздействии на биоту других элементов (Pb, Cd, Tl), однако в экстремально высоких концентрациях опасность для развития живых организмов представляют все без исключения ТМ, мигрирующие от техногенных источников (Moiseenko, 2015). В этой связи важную роль играет фактор биодоступности загрязнителей или фактор форм (фаз или фракций) ТМ в ДО водных объектов, в том числе озер (López et al., 2010). К основным фазам-носителям ТМ в ДО водных объектов относятся тонкие минеральные частички, органическое вещество, карбонатные минералы и гидроокислы железа и марганца (Förstner et al., 2004; Li et al., 2001; Янин, 2011; Даувальтер, 2012; Опекунов и др., 2012). Определенная доля концентрации того или иного ТМ может входить в кристаллическую

решетку природных минералов (Латушкина и Рассказов, 2013). С другой стороны, многие металлы зачастую частично или реже полностью находятся в подвижной форме, позволяющей им становиться агентами вторичного загрязнения воды ДО (López et al., 2010; Даувальтер, 2012). Именно в этом случае, а также в случае тесной связи ТМ с органическим веществом в озерных осадках загрязнители наиболее опасны для экосистемы и ее обитателей.

Учитывая, что многие водоемы, расположенные в инфраструктурной доступности, служат важными рекреационными объектами в тех или иных регионах мира, то в зоне дискомфорта или даже риска находятся люди, использующие водные ресурсы в своих целях (Vierikko and Yli-Pelkonen, 2019). Очевидно, что наиболее загрязненными и в то же время наиболее опасными для биоты и людей являются водные объекты вблизи промышленных зон и в пределах урбанизированных территорий. Тем более что в городах обычно происходит концентрация сразу множества различных видов антропогенных источников загрязняющих веществ, ключевую роль среди которых играют ТМ и металлоиды, а также химические элементы, сопутствующие поллютантам в процессе их миграции в воде и аккумуляции в среде ДО.

Цель данной работы — провести комплексный анализ эколого-геохимических особенностей ДО двух малых озер — Ламба и Четырехверстного, расположенных в черте г. Петрозаводска (Карелия), с оценкой фоновых и современных содержаний ТМ в различных слоях осадков, выяснением закономерностей формирования геохимических аномалий и установлением основных форм нахождения ТМ в самых верхних слоях ДО.

2. Объекты и методы исследования

Озеро Ламба — это небольшой по площади водоем (0,014 км²), расположенный в северо-западной части г. Петрозаводска в микрорайоне Сулажгора (рис. 1). Берега водоема низкие, заболоченные и лесистые. Из северной части озера Ламба вытекает ручей Студенец, впадающий в реку Томицу. Длина береговой линии составляет 0,58 км (Потахин, 2011). Средняя глубина водоема равна 3,4 м, максимальная — 5,2 м (Водные..., 2013). Озеро расположено в лесной зоне и поэтому активно используется местными жителями в рекреационных целях. В 500 м от озера расположена Петрозаводская теплоэлектростанция, функционирующая с конца 1970-х гг. (Слуковский и др., 2017). ДО озера представлены сапротелевыми илами. Предполагается, что ранее сапротель озера планировали использовать в качестве удобрений для нужд ягодно-плодового питомника, располагавшегося вблизи водного объекта (Слуковский и др., 2017).

Озеро Четырехверстное — это небольшой по площади водоем (0,118 км²), расположенный в южной части г. Петрозаводска в микрорайоне Ключевая (рис. 1). Берега водоема низкие, заболоченные и лесистые. Из озера вытекает ручей Каменный, который соединяет его с Онежским озером. Длина береговой линии составляет 1,5 км (Потахин, 2011). Средняя глубина водоема равна 3,2 м, максимальная — 4,6 м (Водные..., 2013). Озеро расположено вблизи жилой застройки и поэтому активно используется горожанами в рекреационных целях. Рядом с водоемом находится автомобильная мастерская, ранее на ее месте располагалось предприятие

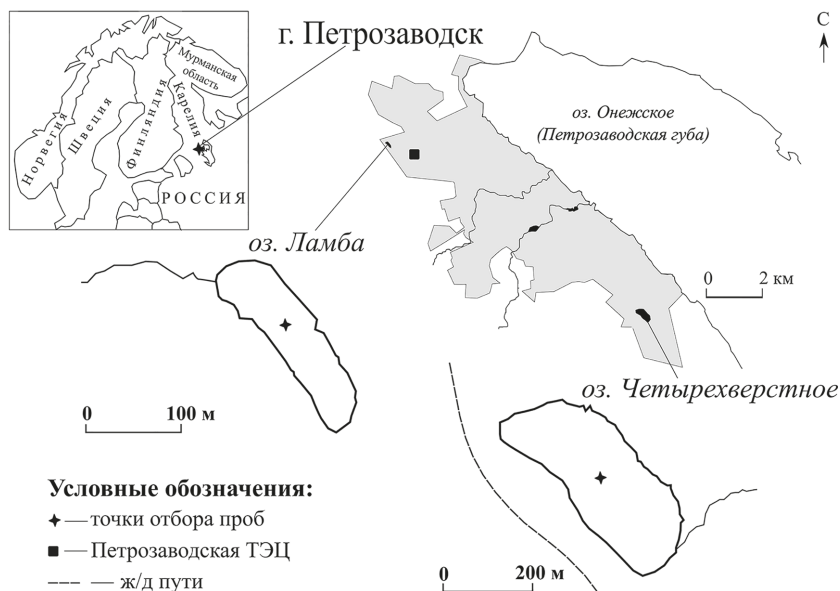


Рис. 1. Карта-схема района исследования

по изготовлению валенок (артель «Пимокатная», отчего среди местных жителей известно второе название озера — Пимокатное, или Пимокатка). Кроме того, вблизи озера расположена площадка южной промышленной зоны г. Петрозаводска. ДО озера представлены сапропелевыми илами (Водные..., 2013).

Отбор проб ДО обоих озер производился в 2016 и 2018 гг. со льда в весенне-зимнее время из центральных частей озер (зон аккумуляции). В 2016 г. были отобраны колонки поверхностных отложений при помощи пробоотборника Limnos. Высота отобранной колонки на оз. Четырехверстном составила 26 см от границы вода — дно, на оз. Ламба — 48 см. Разница в высоте колонок объясняется тем, что отложения оз. Четырехверстного более плотные по сравнению с ДО оз. Ламба. Обе колонки после отбора были разделены на слои по 2 см прямо на льду озер. Кроме того, при помощи ручного торфяного бура были отобраны пробы с более глубоких слоев отложений, сформировавшихся в доиндустриальное время для оценки фоновых концентраций химических элементов. Осадки были пробурены до контакта с глинами, которые были частью дна Онежского приледникового озера (Лаврова, 2005). В ДО оз. Четырехверстного этот контакт был отмечен на глубине 265 см от поверхности вода — дно, в ДО оз. Ламба — на глубине 710 см. Именно слои отложений, отобранные ручным буром до контакта с глиной, приняты в данной работе за фоновые слои с природными концентрациями химических элементов, в том числе ТМ.

В 2018 г. были отобраны колонки поверхностных ДО при помощи пробоотборника Limnos, которые были разделены на слои по 5–8 см для оценки форм нахождения ТМ. Для оценки форм нахождения отбирались только самые верхние слои ДО обоих водоемов: до 15 см для оз. Четырехверстного и до 44 см для оз. Ламба. И в 2016-м, и в 2018-м г. сразу после отбора пробы складировались в пластиковые

контейнеры, которые подписывались и укладывались в сумку-холодильник. Далее пробы доставлялись в лабораторию, где после измерения рН ДО с использованием рН-метра-милливольтметра рН-420 и стеклянного комбинированного электрода ЭСК-10610 пробы помещались в лабораторный холодильник, в котором они хранились до просушивания при температуре около 4 °С согласно методическим рекомендациям (Даувальтер, 2012).

Просушивание образцов проб ДО перед анализом до воздушно-сухого состояния проводилось при комнатной температуре, а до абсолютно сухого — в сушильном шкафу при температуре около 110 °С. Аналитические исследования проводились на базе Аналитического центра Института геологии Карельского научного центра Российской академии наук (г. Петрозаводск, Республика Карелия) и Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН (г. Апатиты, Мурманская область). Содержание микроэлементов в пробах ДО определялось масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific). Содержание главных элементов (оксидов Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) было осуществлено при помощи рентген-флуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X (Thermo Fisher scientific). Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 550 °С. Концентрации микроэлементов представлены в мг/кг (миллиграммы на килограмм) и в вес. % (весовые проценты).

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 H_2O);
- подвижных (обменных) форм (реагент $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$);
- форм, связанных с гидроксидами железа и марганца (реагенты 0,04 М $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в 25 % CH_3COOH);
- форм, связанных с органическим веществом (реагенты 0,02 М HNO_3 + 30 % H_2O_2 и 3,2 М $\text{NH}_4\text{CH}_4\text{COO}$ в 20 % HNO_3);
- кислоторастворимых (остаточных) форм (реагент HNO_3);
- минеральных (силикатных) форм, получаемых в результате вычета суммы концентраций всех вышеперечисленных форм из валовых концентраций.

Разложение образцов отложений для определения валовых концентраций элементов проводилось путем кислотного вскрытия с использованием HF , HNO_3 и HCl в открытой системе.

Статистическая обработка выполнялась при помощи программы Microsoft Excel 2007. Для графической иллюстрации результатов использовались программы EasyCapture 1.2.0, Inkscare 0.48.4. Индекс геоаккумуляции ТМ в ДО рассчитывался по формуле

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{c}{1,5 \times B} \right),$$

где C — концентрация ТМ в исследуемом слое ДО, B — фоновая концентрация исследуемого элемента, определенная в самом нижнем слое колонки ДО (Müller, 1979).

Суммарный показатель загрязнения (СПЗ) ДО был рассчитан по формуле

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где K_c — коэффициент концентрации, рассчитанный как отношение концентрации металла в пробе к фоновому содержанию элемента, n — число металлов, содержания которых превышают фоновые значения (Сае́т и др., 1990).

3. Результаты

Анализ литохимического состава ДО озер Четырехверстного и Ламбы (рис. 2) показал, что отложения обоих городских водоемов относятся к сапропелю — самому распространенному типу поверхностных отложений Республики Карелии. Согласно классификации сапропелевых отложений (Синькевич и Экман, 1995) в ДО оз. Четырехверстного накоплен органико-силикатный осадок, причем с глубиной происходит увеличение количества органического вещества с 40 до 50 % и уменьшение кремнезема с 43 до 38 %. Кроме того, с глубиной происходит уменьшение содержания Fe, Mn, Mg, Na, Al, K, Ti и S и, наоборот, увеличение концентраций P.

Отложения оз. Ламба представлены железистым сапропелем. Причем наиболее вероятно, что основной минеральной фазой Fe в ДО Ламбы является лимонит (Слуковский и др., 2017), хотя в самых верхних слоях зафиксированы включения вивианита, образующегося при восстановлении трехвалентного Fe до двухвалентного. С глубиной в осадках оз. Ламба происходит увеличение содержания Fe с 16 до 26 % и вместе с тем уменьшение доли органического вещества (с 53 до 46 %) и P (с 4,2 до 2,7 %), а также Al и Na. Содержание кремнезема увеличивается незначительно с 20 до 22 %, но в целом стоит отметить значительную разницу по этому показателю между двумя озерами г. Петрозаводска.

По показателю pH отложения обоих городских озер характеризуются реакцией от слабокислой до слабощелочной. Отмечается незначительное увеличение щелочности в самых верхних слоях ДО с 6,92 до 7,38 и с 6,91 до 7,19 в оз. Четырехверстном и оз. Ламба соответственно. Доиндустриальные слои осадков Четырехверстного характеризуются преимущественно слабокислой реакцией, аналогичные слои оз. Ламба характеризуются реакцией близкой к нейтральной (от 6,90 до 7,12).

Характер вертикального распределения валовых концентраций ТМ в колонках современных ДО озер г. Петрозаводска весьма динамичен — почти все металлы значительно возрастают по отношению к рассчитанным для каждого водоема фоновым значениям (см. прил. 2.1 и 2.2¹, а также табл. 1). Учитывая, что ДО обоих озер различаются по литохимическому типу, то геохимический фон микроэлементов у каждого из объектов должен быть свой. Из табл. 1 видно, что в доиндустриальных слоях осадков оз. Четырехверстного несколько выше содержание V, Cr, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Sb, W, Tl, Pb и Bi, с другой стороны, в доиндустриальных слоях ДО оз. Ламба несколько выше концентрации Co и Mo. При этом в самых современных слоях ДО гораздо большим накоплением ТМ характеризуются осадки оз. Ламба, что видно как по медианным концентрациям в колонках ДО, так и по характеру вертикального распределения металлов (прил. 2.2).

¹ Здесь и далее указанные приложения 2.1–2.7 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/5372/5256>. Приложения даны в авторской редакции.

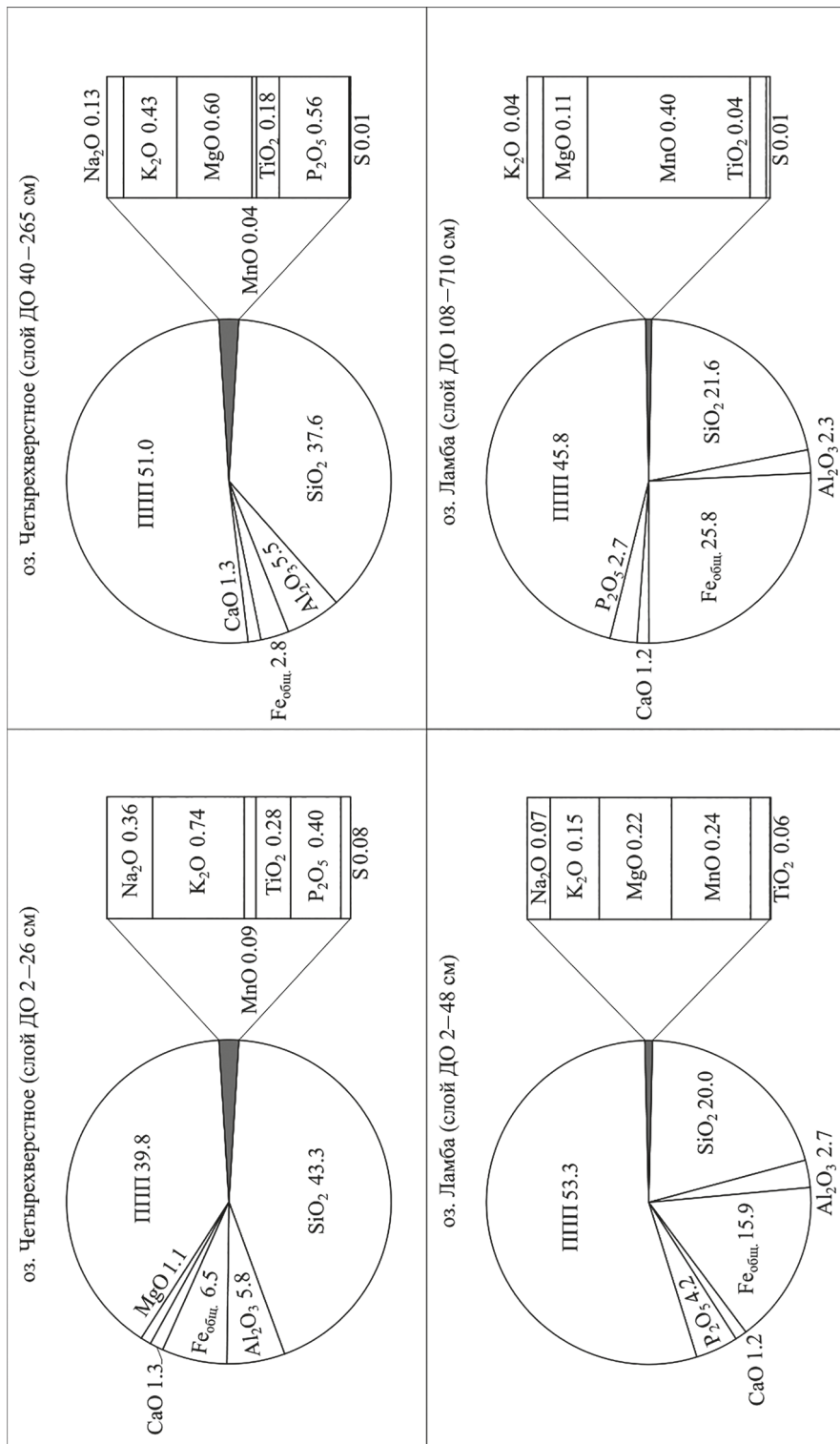


Рис. 2. Содержание главных элементов в оксидной форме в ДО озера г. Петрозаводска (данные представлены в весовых %)

Таблица 1. Медианные (M_e), максимальные (x_{max}) и минимальные (x_{min}) концентрации металлов в верхних слоях ДО озер г. Петрозаводска (0–48 см для оз. Ламба и 0–26 см для оз. Четырехверстного) и медианные концентрации металлов (B) доиндустриальных слоев озерных осадков (данные представлены в мг/кг или мкг/г)

	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Mo	Cd	Sb	W	Tl	Pb	Bi
оз. Четырехверстное (n=21, где 12 — выборка для верхних слоев (2–26 см), а 7 — для фона)														
M_e	81	92	15,1	54	109	286	69	1,78	0,85	1,68	1,37	0,42	56,0	0,29
x_{max}	168	196	26,0	85	246	422	112	2,80	1,22	2,92	1,76	0,80	70,0	0,40
x_{min}	24	26	7,2	30	44	122	41	0,83	0,51	0,71	0,35	0,19	35,6	0,19
B	48	44	7,2	55	80	128	33	1,38	1,08	0,37	0,47	0,27	8,4	0,18
оз. Ламба (n=38, где 23 — выборка для верхних слоев (2–48 см), а 15 — для фона)														
M_e	58	30	17,2	38	164	426	65	3,47	0,68	0,79	0,68	0,22	44,3	0,24
x_{max}	4785	179	25,2	607	1189	963	119	13,32	1,15	3,90	3,70	0,66	137,1	0,99
x_{min}	17	10	9,5	10	40	136	26	2,17	0,22	0,10	0,24	0,09	3,9	0,05
B	32	19	8,5	26	50	95	29	2,04	0,27	0,08	0,42	0,11	2,0	0,04

Анализ валовых концентраций ТМ в современных слоях ДО озер г. Петрозаводска выявил, что по отношению к фоновым значениям в осадках оз. Четырехверстного значительно возрастает содержание таких металлов как V, Cr, Co, Zn, Sb, W, Tl и Pb. Именно с учетом концентраций этих элементов для ДО оз. Четырехверстного был рассчитан суммарный показатель загрязнения, дающий оценку интенсивности поступления поллютантов в окружающую среду по наиболее опасным загрязнителям, которым и являются перечисленные металлы. Для Ni, Cu, Cd, Sr и Bi установлены незначительные превышения над фоном, а в самых нижних слоях изученной колонки современных ДО оз. Четырехверстного таких превышений по этим металлам не установлено вовсе.

В колонке современных ДО оз. Ламба установлены превышения валовых концентраций ТМ по отношению к фону данного водоема по гораздо большему числу элементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Sb, W, Pb, Tl, Bi) по сравнению с оз. Четырехверстным. Особенно экстремальные превышения выявлены по V и Ni в слоях от 6 до 14 см и по Pb и Sb в слоях от 20 до 30 см. С учетом наиболее опасных «пиков» концентраций в колонке для расчета суммарного показателя загрязнения были выбраны такие ТМ как V, Ni, Cu, Zn, Sb, W, Pb и Bi.

Анализ других форм нахождения ТМ в современных слоях ДО озер г. Петрозаводска показал, что в значительной мере все они тяготеют к минеральной (силикатной) фазе. В ДО оз. Четырехверстного наибольшую связь с этой фазой имеют W (до 89%), Tl (до 88%), Sb (до 78%), Sr (до 77%), наименьшую — Zn, Cd и Pb. В ДО оз. Ламба наибольшую связь с минеральной фазой имеет почти этот же набор элементов: W (до 95%), Cu (до 91%), Tl (до 89%), Sr (до 87%) и Sb (до 75%). Меньше всех с этой фазой в ДО оз. Ламба связаны V, Ni, Cd и Bi. Второй по значимости для обоих озер формой нахождения ТМ является органическая фаза, иллюстрирующая

Таблица 2. Доли разных форм нахождения тяжелых металлов в ДО оз. Четырехверстного (в % от валового содержания)

	Li	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Cs	W	Tl	Pb	Bi
I	0,2	0,1	0,1	6,1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	2,9	3,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,7	0,4	0,0	0,1
II	0,3	1,4	0,4	28,3	3,5	2,8	1,2	7,8	0,6	9,1	0,5	11,7	0,1	1,1	0,2	0,0	3,0	6,7	3,6
III	2,4	8,0	10,2	10,7	7,3	4,4	0,4	19,8	0,2	3,1	2,7	17,4	1,1	3,4	0,1	0,0	1,9	14,9	13,8
IV	21,4	15,3	12,7	8,0	20,7	17,5	29,6	15,1	2,2	5,6	27,7	13,2	0,8	12,3	3,4	7,9	4,6	16,5	14,1
V	4,8	2,8	3,9	1,8	5,5	4,9	4,2	2,2	1,3	2,3	3,2	1,6	1,0	5,1	2,1	2,0	1,8	4,0	3,6
VI	71,0	72,4	72,8	45,1	62,6	70,0	64,4	54,9	95,4	77,0	62,9	55,9	96,8	77,9	94,2	89,3	88,3	57,9	64,9

Примечание. Расшифровка форм: I — водорастворимые формы, II — обменные катионы (подвижные формы), III — формы, связанные с гидроокислами Fe и Mn, IV — формы, связанные с органическим веществом, V — кислоторастворимые (остаточные) формы, VI — минеральные формы.

сродство металлов с органическим веществом озерных осадков. В современных ДО оз. Четырехверстного с органическим веществом наиболее тесно связано накопление Cu (до 50 %), Mo (до 36 %) и Co (до 34 %), в современных осадках оз. Ламба — Cu (до 62 %), Mo (до 48 %), Pb (до 52 %), V (до 42 %), Bi (до 39 %), Ni (до 26 %) и Sb (до 26 %). Для обоих озер отмечается тенденция к увеличению доли концентраций металлов, связанных с органическим веществом, при увеличении общего содержания органического вещества в слоях озерных отложений.

Часть металлов в ДО обоих городских озер имеет также тесное сродство с обменными катионами (подвижная форма) и железистой фазой (табл. 2). В осадках оз. Четырехверстного выделяются тесные связи с гидроксидами Fe у Zn (до 28 %), Cd (до 24 %) и Pb (до 20 %), а в ДО оз. Ламба — у Bi (до 48 %), V (до 30 %), Cr (до 30 %) и Zn (до 20 %). К подвижным формам более всего тяготеют Cd (до 17 %), Zn (до 13 %) и Sr (до 12 %) в отложениях оз. Четырехверстного и те же Cd (до 21 %) и Sr (до 14 %), а также Tl (до 20 %), V (до 17 %), Ni (до 15 %), Co (до 16 %), Sb (до 15 %) — в современных ДО оз. Ламба. Причем отмечается, что со снижением pH донных отложений в более кислую сторону происходит серьезное увеличение подвижности таких металлов, как Cu, Pb, Bi и V в озерных осадках городской среды.

4. Обсуждение результатов

Несмотря на довольно близкое расположение двух изученных малых озер относительно друг друга (всего около 11 км), в геохимическом отношении ДО водоемов имеют существенные различия. Причем это связано как с природными, так и антропогенными факторами одновременно.

Основное природное отличие ДО озер Четырехверстного и Ламба друг от друга связано с содержанием главных элементов, то есть с литохимическим составом осадков. В первую очередь, речь идет о содержании в ДО таких наиболее важных с диагностической точки зрения компонентов, как органическое вещество (по ППП), кремнезем (SiO_2), глинозем (Al_2O_3) и Fe. Как уже было показано, имен-

но по этим показателям отложения городских озер г. Петрозаводска наиболее отчетливо различаются. Учитывая, что основной акцент в работе делается на оценку эколого-геохимических особенностей и различий ДО указанных водоемов, то по вопросу различий в литохимическом составе можно заключить лишь, что он зависит от множества факторов, которые тесно переплетены друг с другом.

Среди этих факторов наиболее четко выделяются различия в геохимическом типе почв и четвертичных отложений водосбора и различия в питании озер. Учитывая, что почвенный покров территории г. Петрозаводска имеет достаточно мозаичную структуру (Крутских и Косинова, 2014; Новиков, 2014), то очевидно, что именно это и определило различия в химическом составе ДО озер города. К сожалению, сведений о содержании главных элементов в четвертичных отложениях и почвах водосборов обоих озер не имеется, однако можно отметить, что район оз. Ламба более облесен и заболочен вплоть до отсутствия «классической» литорали, в отличие от района оз. Четырехверстного, где отмечаются песчано-галечные берега с плавным переходом от литорали к зоне аккумуляции. Вероятно, именно это во многом повлияло на большее содержание Si, Al, Ti, Na и K, контролируемых терригенной фракцией, поступающей с водосбора, в осадках оз. Четырехверстного по сравнению с ДО оз. Ламба. Различия в содержании главных элементов сказались и на содержании микроэлементов, в том числе ТМ в фоновых слоях отложений. Отмечается, что в озерных осадках в ряду «органические ДО — органо-минеральные ДО — минеральные ДО» содержание микроэлементов, имеющих природное происхождение, возрастает (Страховенко, 2011).

Наличие значительного содержания Fe в илах оз. Ламба по сравнению с отложениями оз. Четырехверстного может быть тесно связано с естественными выходами подземных источников, содержащими соединения Fe в центральной и северной частях города (Крутских и др., 2016). Таким образом, питание озер железными подземными водами могло сыграть ключевую роль в формировании ДО городского озера, тем более что аналогичные отложения довольно часто встречаются на территории южной части Карелии, учитывая специфику местных подземных вод (Tokarev et al., 2015). При этом отмечается довольно нестабильное поведение концентраций Fe в вертикальном разрезе ДО озер, что также может свидетельствовать о влиянии подземных вод, которые также являются довольно нестабильной по химическому составу материей.

Следует обратить внимание, что содержание Са является стабильно низким показателем для обоих озер, что является следствием незначительного количества Са-содержащих пород на территории Республики Карелии, расположенной на древнем кристаллическом щите. Низкое содержание кальция ранее отмечалось для речных отложений г. Петрозаводска и различных малых озер южной части Карелии (Слуковский, 2014).

В современный (индустриальный) период развития городских озер г. Петрозаводска, который в геохимическом отношении проявляется в увеличении концентраций ТМ в воде и, как следствие, в ДО водоемов также проявился по-разному в каждом отдельном случае. В прил. 2.3 показано, что, согласно расчетам суммарного показателя загрязнения, озера испытывали и испытывают разную интенсивность антропогенного воздействия. Самые нижние слои от 20 до 26 см колонки ДО оз. Четырехверстного характеризуются низким уровнем загрязнения, а вышележа-

щие слои до границы вода-дно — средним уровнем техногенной нагрузки. Главным образом на повышение СПЗ в значительной мере повлияли аномально высокие для ДО оз. Четырехверстного концентрации Pb и Sb, которые активно накапливались во всей современной толще озерных осадков (прил. 2.1).

В изученной колонке современных ДО оз. Ламба низким и средним уровнем загрязнения характеризуются лишь самые нижние слои от 41 до 48 см (прил. 2.3). Вышележащие слои характеризуют среду, в которой они образовывались, как среду с сильным и очень сильным уровнем антропогенного загрязнения. Очень сильный уровень загрязнения ДО оз. Ламба зафиксирован в слоях, где отмечен экстремальный уровень накопления V, Ni, Cu, Pb и Sb (прил. 2.2). Однако остальные металлы, накопленные в верхних слоях ДО оз. Ламба, также создают неблагоприятную экологическую ситуацию в водоеме, что подтверждается расчетом индексов геоаккумуляции I_{geo} по каждому элементу в каждом слое отложений (прил. 2.4). Отмечается, что интенсивность загрязнения осадков оз. Ламбы V, Sb, Pb и Bi варьирует от слабого до очень сильного, интенсивность загрязнения Cr, Ni, Cu, Zn, W — от слабого до сильного, интенсивность загрязнения Cd — от слабого до умеренного. В ДО оз. Четырехверстного выявлено лишь пять элементов, по которым интенсивность загрязнения по I_{geo} является существенной (прил. 2.5). К числу этих элементов относятся Pb (загрязнение от умеренного до сильного уровня), Sb (загрязнение от слабого до сильного уровня), V, Co и W (для всех — загрязнение от слабого до умеренного уровня). Таким образом, следует отметить, что, несмотря на расположение на одной урбанизированной территории изучаемых водоемов, оз. Ламба является более загрязненным металлами водоемом по сравнению с оз. Четырехверстным. При этом загрязнение Pb, Sb, V и в меньшей степени W проявляется согласно эколого-геохимическим исследованиям ДО озер единым образом в обоих водных объектах, однако и в случае этих ТМ отложения оз. Ламба значительно грязнее, чем ДО оз. Четырехверстного и на это есть несколько причин. Разберем их подробнее.

Оба изучаемых водоема расположены на окраинах г. Петрозаводска, однако северная часть города, где находится оз. Ламба, включает в себя северную промышленную зону, где до сих пор работают многие предприятия и заводы. К их числу в первую очередь относится машиностроительный завод «Петрозаводскмаш» (действует с 1960 г.) и Петрозаводская ТЭЦ (действует с 1976 г.). Именно выбросы этих предприятий во многом определяют специфику загрязнения оз. Ламба, особенно это касается самых верхних слоев ДО (Слуковский и др., 2017). Повышенное содержание и пики концентраций Zn, Cu, W и Mo — следствие выбросов машиностроительного завода, «пики» V, Ni преимущественно связаны с деятельностью ТЭЦ, которая работала и работает, используя мазут в качестве топлива. Отмечается, что снижение доли мазута в работе ТЭЦ в 2000-х гг. привело к снижению концентраций ТМ, связанных с выбросами этого предприятия, однако «память» о предшествующих выбросах хранится на дне оз. Ламба до сих пор (Слуковский и др., 2017). По распределению V в ДО оз. Ламба удалось ориентировочно вычислить скорость седиментации в озере в настоящее время, что составило около 5 мм в год (Слуковский и др., 2017). Данная цифра в несколько раз превышает средние показатели для территории Фенноскандии, которые находятся в диапазоне от 0,3 до 1,25 мм в год (Håkanson, 1984; Rognerud et al., 2000; Даувальтер, 2012), однако отмечается (Ива-

нов и др., 2011), что на урбанизированных территориях скорость озерной седиментации может многократно возрастать вследствие влияния техногенных факторов, в частности привнесения органических веществ и терригенного материала в несколько больших количествах по сравнению с условно-чистыми территориями.

Следует отметить, что вертикальное распределение V, Ni и некоторых других металлов, которые накапливаются в ДО оз. Ламба в результате деятельности ТЭЦ в подвижной форме, в органик-форме и форме, связанной с гидроксидами железа, аналогично распределению валовых концентраций этих металлов (прил. 2.6). Наибольшее накопление ТМ в этих формах приходится на слой 5–10 см, где как раз и были зафиксированы экстремально высокие уровни загрязнения от деятельности ТЭЦ относительно валовых концентраций. Видно, что именно органическое вещество в значительной мере контролирует накопление металлов V и Ni, поступающих в озеро в результате техногенного влияния. Кроме того, аномалии валовых концентраций Cu, Zn, Tl, Mo также коррелируются с распределением в колонке ДО оз. Ламба подвижных и органик-форм этих металлов, что может дополнительно свидетельствовать о техногенной природе исследованных аномалий в осадках извученного водоема.

Южная часть г. Петрозаводска, где находится оз. Четырехверстное, имеет гораздо меньшую концентрацию промышленных предприятий по сравнению с севером города, поэтому нагрузка на природные экосистемы здесь существенно ниже. С другой стороны, на водоем постоянно оказывают влияние выбросы автомобильного и железнодорожного транспорта, чьи пути находятся в непосредственной близости от озера. Вероятно, поэтому основным загрязнителем ДО оз. Четырехверстного среди металлов является Pb, который в разных элементах городской среды накапливается вследствие использования тетраэтилсвинца в качестве добавки к бензину с 1930-х до 1990-х гг. по всему миру (Nriagu, 1990; Thomas, 1995). В современных ДО озер вертикальное распределение Pb способно восстановить летопись техногенного влияния на водную среду и на водосборную площадь природного объекта (Keinonen, 1992; Dauvalter, 2006; Escobar et al., 2013; Стародымова и др., 2016; Hosono et al., 2016). При этом выбросы автотранспорта — не единственный источник этого металла в ДО озер, так как Pb поступает в окружающую среду также из-за выбросов промышленных предприятий, и дальность миграции этого поллютанта насчитывает сотни и тысячи километров (Norton et al., 1990; Vinogradova et al., 2017). Так превышения над фоновыми (природными) концентрациями Pb в ДО озер отмечаются в условно-чистых районах Карелии (Слуковский и др., 2016; Slukovskii et al., 2020), Мурманской области (Dauvalter et al., 2011), Архангельской области (Стародымова и др., 2016) и Республики Финляндии (Verta et al., 1998; Virkutyte et al., 2008). Таким образом, дальний перенос Pb мог способствовать накоплению этого металла и в ДО двух малых озер г. Петрозаводска. Основываясь на приведенных работах и распределении Pb в колонке современных ДО оз. Четырехверстного, можно ориентировочно рассчитать среднюю скорость седиментации в водоеме в современный период. Она составляет около 2 мм в год.

Кроме Pb в дальнем переносе активно участвуют Cd, Sb, Tl, Zn, Bi и ряд других металлов, что подтверждено многочисленными работами по всему миру (Stankevica et al., 2012; Kuwae et al., 2013; Масленникова и др., 2014). Схожая динамика накопле-

ния между этими элементами в ДО озер Ламба и Четырехверстного (прил. 2.1 и 2.2) говорит, скорее всего, об их попадании в водоем примерно в одно время, а значит, от единых источников, чему мог способствовать именно дальний перенос загрязнителей. Схожую динамику поведения перечисленных элементов можно наблюдать при анализе эколого-геохимических особенностей ДО различных озер севера России. Согласно датировкам, выполненным по изотопам Pb^{210} и Cs^{137} в пробах ДО озер разных регионов севера Европы, увеличение техногенной нагрузки на водные объекты и, как следствие, аккумуляция ТМ началось приблизительно в середине 19 в. (Keinonen, 1992; Verta et al., 1998; Dauvalter, 2006; Масленникова и др., 2014). Это же подтверждается исследованиями кернов нетающих ледников на примере Гренландии (McConnell and Edwards, 2008). Примечательно, что снижение антропогенной нагрузки из-за остановки производств, переноса промышленных мощностей в другие регионы, их экологизации и других причин приводит к снижению концентраций ТМ в депонирующих средах, в том числе в ДО озер (Thomas, 1995; Escobar et al., 2013; Kuwae et al., 2013). Именно это и можно наблюдать на примере озер г. Петрозаводска — максимальные накопления Pb, Cd, Sb, Tl, Zn и Bi приходятся на более глубокие слои в колонках современных ДО городских водоемов (прил. 2.4 и 2.5).

Для обоих озер г. Петрозаводска характерна корреляция валовых концентраций Pb и других металлов, поступающих в водоемы от автомобильного транспорта и выбросов промышленных предприятий, с концентрациями в подвижных формах и формах, связанных с органическим веществом и гидроксидами железа (прил. 2.7). В колонке ДО оз. Ламба Pb во всех перечисленных формах более всего накоплен в слоях от 18 до 33 см, что аналогично распределению этого металла в общем виде (прил. 2.2). В современных осадках оз. Четырехверстное Pb иная ситуация: подобно распределению валового Pb распределены концентрации этого металла в различных формах нахождения. Максимум аккумуляции приходится на глубину 5–9 см (прил. 2.7, нижний ряд). Аналогичным образом в исследованных колонках ДО городских озер ведут себя и другие металлы — Cd, Sb, Bi, Tl.

В целом анализ форм нахождения ТМ в слоях современных ДО озер г. Петрозаводска продемонстрировал (табл. 2 и 3), что с точки зрения подвижности наиболее опасными для экосистем водоемов являются Zn, Sr, Cd и Pb (оз. Четырехверстное) и Co, Ni, Zn, Sr, Cd и Tl (оз. Ламба). Высокая подвижность Cd в ДО водных объектов, подвергшихся антропогенной нагрузке, известна из многочисленных публикаций (Петрова, 2006; Опекунов и др., 2012; Янин, 2011; 2013), хотя в осадках петрозаводских озер эта форма все-таки не является ведущей ни для одного элемента, в том числе для Cd. Гидрооксиды Fe, которые обычно тесно связывают Pb, Zn и ряд других элементов (Li et al., 2001; Долотов и Гапеева, 2009; Янин, 2013), в разной степени проявляются в ДО озер Четырехверстного и Ламбы. И Pb, и Zn наиболее тесно связаны с железистыми образованиями в отложениях оз. Четырехверстного, несмотря на то что по факту более обогащенными Fe являются ДО оз. Ламба. С другой стороны, в ДО оз. Ламба с гидроокислами Fe большее сродство имеют V, Cr и Ni. В то же время в отложениях обоих озер сродство с образованиями железа имеют Cd и Bi. Причем с ростом содержания Fe в ДО оз. Ламба происходит рост доли Fe-форм этих двух металлов относительно валовых концентраций.

Таблица 3. Доли разных форм нахождения тяжелых металлов в ДО оз. Ламба (в % от валового содержания).

	Li	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Cs	W	Tl	Pb	Bi
I	1,2	0,2	0,1	6,9	3,9	4,0	0,3	3,6	0,8	3,2	0,4	1,7	0,0	0,3	0,2	0,1	0,8	0,0	0,1
II	1,0	5,2	0,5	15,0	10,4	9,6	1,6	11,2	3,0	9,6	1,0	13,8	0,1	2,7	2,5	0,5	10,7	5,3	4,1
III	3,2	17,3	14,8	8,1	10,5	10,4	0,6	15,4	0,8	4,0	2,9	13,8	1,1	2,8	0,9	0,5	5,5	4,4	16,2
IV	21,5	34,2	19,2	11,5	16,5	20,0	29,0	12,9	4,6	14,7	33,2	13,0	2,7	14,0	6,8	9,8	11,8	30,0	23,7
V	4,0	2,2	3,4	1,1	1,7	1,6	1,4	0,8	2,2	2,9	5,0	2,9	16,0	28,6	3,1	9,9	2,2	8,6	7,2
VI	69,0	40,9	62,0	57,4	57,0	54,4	67,2	56,1	88,6	65,6	57,5	54,8	80,0	51,6	86,5	79,2	69,0	51,6	48,7

Примечание. Расшифровку форм см. под табл. 2.

Для обоих водоемов ключевую роль в накоплении ТМ в ДО играет органическое вещество, что свойственно для антропогенной седиментации (Li et al., 2001; López et al., 2010; Опекунов и др., 2012). Наибольшее сродство с органической фазой имеют Cu, Co, Ni, Mo для оз. Четырехверстного и V, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Pb и Bi для оз. Ламба. В ДО оз. Ламба отчетливо прослеживается связь между экстремальным накоплением в отдельных слоях валовых концентраций ТМ и наиболее тесной связью металлов в этих слоях с органическим веществом. Особенно это хорошо видно по концентрациям Pb, Bi, Tl и Sb — агентам дальнего переноса загрязнителей. Такая тесная связь металлов с органическим веществом ДО приводит к миграции поллютантов по пищевой цепи детрит — бентос — рыба и накоплению в органах и тканях гидробионтов озер г. Петрозаводска (Слуковский и др., 2016; Новицкий и др., 2018). В этом отношении два изученных водоема также несколько различаются — степень накопления ТМ в биоте оз. Ламба выше, чем в биоте оз. Четырехверстного. Вероятно, это имеет прямое отношение к литохимической специфике осадков, так как потенциальных сорбентов ТМ (и органического вещества, и Fe) в ДО оз. Ламба больше, чем в ДО оз. Четырехверстного. При этом оба водоема должны быть включены в систему постоянного мониторинга качества поверхностных вод Республики Карелии, учитывая важность городских озер севера России с точки зрения рекреации.

Следует добавить, что приоритетные загрязнители городской среды Петрозаводска, выделенные ранее на основе эколого-геохимических исследований ДО рек Лососинки и Неглинки, протекающих по центру города и почвенного покрова (Slukovskii, 2015), совпадают с теми, что выделяются в данной работе. При этом уровень загрязненности речных отложений выше уровня загрязненности ДО оз. Четырехверстного, и он также находится на одном уровне с загрязненностью отложений оз. Ламба, чему, как отмечалось, способствует близость локальных источников загрязнения к изучаемому водному объекту.

5. Выводы

Донные отложения озер г. Петрозаводска характеризуются повышенным содержанием валовых концентраций ТМ (V, Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Sr, Co, Mo, W, Sb, Bi, Tl) в верхних слоях. Оценен уровень загрязнения озер г. Петрозаводска с использова-

нием суммарного показателя загрязнения и индекса геоаккумуляции. Озеро Ламба испытывает наибольшее загрязнение по V, Ni, Cu, Zn, Sb, W, Pb и Bi. По суммарному показателю загрязнения ДО оз. Ламба характеризуются средним уровнем загрязнения в слоях 36–44 см, сильным и очень сильным — в слоях выше 36 см. Основными загрязнителями оз. Четырехверстного из числа ТМ являются Pb, W, Sb, Co и V. Согласно расчету суммарного показателя загрязнения ДО, озера характеризуются средним уровнем загрязнения в слоях от 0 до 20 см. Таким образом, можно заключить, что оз. Ламба является более загрязненным водным объектом по сравнению с оз. Четырехверстным. Кроме того, уровень загрязнения ДО оз. Ламба близок к уровню загрязнения осадков рек г. Петрозаводска, протекающих по центральной части города и испытывающих в связи с этим наиболее сильную антропогенную нагрузку из всех водных объектов города.

Главный вклад в загрязнение водоемов вносят выбросы промышленных предприятий города (машиностроительное производство, теплоэлектроцентраль, нефтебаза), автомобильный и железнодорожный транспорт, а также дальний перенос загрязнителей из соседних регионов России и мира. Характер поведения в вертикальном разрезе ДО озер г. Петрозаводска Pb и Cd в сравнении с малыми озерами других районов Карелии, Мурманской области, Республики Коми и Финляндии говорит о единой природе поступления этих металлов в экосистемы северо-западной части Евразийского региона. Кроме того, к агентам глобального переноса можно отнести Tl, Sb и Bi, чьи концентрации тесно коррелируют с накоплением в озерных отложениях свинца и кадмия.

Проведена оценка основных форм нахождения ТМ в отложениях озер г. Петрозаводска. Установлено, что теснее всего металлы связаны с минеральной фазой ДО. Однако для Pb, Bi, Mo, Zn, Cu, Co, Ni и V значимой формой нахождения является органическое вещество ДО. Причем с увеличением количества органического вещества в озерных осадках увеличивается доля форм ТМ, связанных с органическим веществом, относительно валовых концентраций этих же металлов. Выявлено, что Cd, Ni, Zn, Tl значительно тяготеют к подвижным формам нахождения, а V, Ni, Zn и Cd — к формам, связанным с гидрооксидами железа. Предполагается, что на повышенный уровень загрязнения оз. Ламба по сравнению с оз. Четырехверстным влияет более высокое содержание органического вещества и соединений железа как основных фаз-носителей ионов ТМ, поступающих извне в водные экосистемы города.

* * *

Автор выражает искреннюю благодарность своим коллегам Е. В. Сыроежко и Д. Г. Новицкому 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. Кроме того, автор крайне признателен рецензентам, замечания и дополнения которых значительно улучшили качество статьи.

Литература

- Водные объекты города Петрозаводска.* (2013). Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН.
- Даувальтер, В. А. (2012). *Геоэкология донных отложений озер.* Мурманск: Изд-во МГТУ.

- Долотов, А. В., Гапеева, М. В. (2009). Оценка загрязнения тяжелыми металлами водоемов питьевого назначения (на примере Уводьского водохранилища). *Экология человека*, 1, 15–19.
- Иванов, Д. В., Зиганшин, И. И., Осмелкин, Е. В. (2011). Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья. *Георесурсы*, 2 (38), 46–48.
- Крутских, Н. В., Косинова И. И. (2014). Методика трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск). *Вестник Воронежского гос. ун-та*, 3, 95–97.
- Крутских, Н. В., Бородулина, Г. С., Казнина, Н. М., Батова, Ю. В., Рязанцев, П. А., Ахметова, Г. В., Новиков, С. Г., Кравченко, И. Ю. (2016). Геоэкологические основы организации мониторинга северных урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска). *Труды Карельского научного центра*, 12, 52–67.
- Лаврова, Н. Б. (2005). Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения. *Геология и полезные ископаемые Карелии*, 8, 143–148.
- Лагушкина, Е. Н., Рассказов, А. А. (2013). Минералогический генезис микроэлементов современных донных осадков рек урбанизированных территорий, испытывающих высокую техногенную нагрузку (на примере Москвы-реки и малых рек Московской области). *Вестник Бурятского гос. ун-та*, 4, 16–24.
- Лозовик, П. А., Галахина, Н. Е. (2017). Изменения химического состава реки Кенти в результате техногенного влияния. *Труды Карельского научного центра РАН*, 3, 21–35.
- Масленникова, А. В., Удачин, В. Н., Дерягин, В. В. (2014). *Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала*. Екатеринбург: Изд-во Уральского отделения РАН Южно-Уральского гос. ун-та.
- Моисеенко, Т. И., Гашкина, Н. А. (2010). *Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды*. Москва: Наука.
- Моисеенко, Т. И., Даувальтер, В. А., Родюшкин, И. В. (1997). *Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра)*. Апатиты: Кольский научный центр РАН.
- Новиков, С. Г. (2014). *Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв урбанизированных территорий по категориям землепользования (на примере г. Петрозаводска)*. Диссертация кандидата биол. наук.
- Новицкий, Д. Г., Ильмаст, Н. В., Слуковский, З. И., Суховская, И. В. (2018). Биогеохимические аспекты загрязнения водоемов урбанизированных территорий в Республике Карелия на примере окуня (*Perca fluviatilis*). *Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та*, 3, 42–51.
- Опекунов, А. Ю., Мануйлов, С. Ф., Шахвердов, В. А., Чураков, А. В., Куринный, Н. А. (2012). Состав и свойства донных отложений р. Мойки и Обводного канала (Санкт-Петербург). *Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 7. Геология. География*, (2), 65–80.
- Петрова, Е. А. (2006). Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в донных осадках Ладожского озера. *Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 7. Геология. География*, 1, 18–29.
- Потахин, М. С. (2011). Морфологические особенности водоемов г. Петрозаводска. В: *Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: материалы IV школы-конф. молодых ученых с междунар. участием (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.)*. Петрозаводск, 180–183.
- Потахин, М. С., Белкина, Н. А., Слуковский, З. И., Новицкий, Д. Г., Морозова, И. В. (2018). Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия. *Общество. Среда. Развитие*, 3(48), 107–117.
- Саэт, Ю. Е., Ревич, Б. А., Янин, Е. П. (1990). *Геохимия окружающей среды*. Москва: Недра.
- Синькевич, Е. И., Экман, И. М. (1995). *Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита*. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН.
- Слуковский, З. И. (2018). Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды (Республика Карелия). *Водное хозяйство России*, 6, 70–82. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-6-6>
- Слуковский, З. И. (2014) *Эколого-геохимический анализ состояния донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере города Петрозаводска)*. Диссертация кандидата биол. наук.
- Слуковский, З. И., Ильмаст, Н. В., Суховская, И. В., Борвинская, Е. В. (2016). Анализ содержания тяжелых металлов в органах рыб озера Ламба (Петрозаводск, Республика Карелия). В:

Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: материалы VI Всероссийской научной конф. с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г. М. Крестя и 110-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тянь-Шанского. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН.

- Слуковский, З. И., Ильмаст, Н. В., Суховская, И. В., Борвинская, Е. В., Гоголев, М. А. (2017). Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия). *Труды Карельского научного центра РАН*, 10, 45–63.
- Стародымова, Д. П., Шевченко, В. П., Кокрятская, Н. М., Алиев, Р. А., Бычков, А. Ю., Забелина, С. А., Чупаков, А. В. (2016). Геохимия донных осадков малого озера (водосбор Онежского озера, Архангельская область). *Успехи современного естествознания*, 9, 172–177.
- Страховенко, В. Д. (2011). *Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири.* Диссертация доктора геол.-минерал. наук.
- Филатов, Н. Н., Литвиненко, А. В., Фрейндлинг, В. А. (2001). *Каталог озер и рек Карелии.* Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра.
- Шафигуллина, Г. Т., Удачин, В. Н. (2009). Содержание тяжелых металлов в донных отложениях Учалинской геотехнической системы. *Разведка и охрана недр*, (1), 60–66.
- Янин, Е. П. (2013). *Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка).* Москва: ВИНТИ.
- Янин, Е. П. (2011). Формы нахождения кадмия в техногенных илах реки Пахры и оценка его миграционных способностей. *География и природные ресурсы*, 1, 42–46.
- Bartnicki, J. (1994). An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results. *Water, Air, & Soil Pollution*, 75 (3–4), 227–263. <https://doi.org/10.1007/BF00482939>
- Dauvalter, V. A. (2006). Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, and As) in bottom sediments of water bodies of the white sea catchment area on the kola peninsula. *Geochemistry International*, 44 (2), 205–208. <https://doi.org/10.1134/S001670290602011X>
- Dauvalter, V., Kashulin, V., Sandimirov, S., Terentjev, P., Denisov, D., Amundsen, P.-A. (2011). Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46, 1020–1033.
- Davydova, N., Subetto, D., Kukkonen, M., Simola, H. (1999). Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages. *Boreal Environment Research*, 4(3), 269–275.
- Escobar, J., Whitmore, T. J., Kamenov, G. D., Riedinger-Whitmore, M. A. (2013). Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *Journal of Paleolimnology*, 49 (2), 237–252.
- Förstner, U., Heise, S., Schwartz, R., Westrich, B., Ahlf, W. (2004). Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *Journal of Soils and Sediments*, 4(4), 247–260.
- Håkanson, L. (1984). Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects. *Water Resources Research*, 20 (1), 41–46.
- Harguinteguy, C. A., Cirelli, A. F., Pignata, M. L. (2014). Heavy metal accumulation in leaves of aquatic plant *Stuckenia filiformis* and its relationship with sediment and water in the Suquía river (Argentina). *Microchemical Journal*, 114, 111–118.
- Hosono, T., Alvarez, K., Kuwae, M. (2016). Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources. *Science of The Total Environment*, 559, 24–37.
- Keinonen, M. (1992). The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *Science of The Total Environment*, 113(3), 251–268. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90004-C](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90004-C)
- Kuwae, M., Tsugeki, N. K., Agusa, T., Toyoda, K., Tani, Y., Ueda, S., Tanabe, S., Urabe, J. (2013) Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia. *Science of the Total Environment*, 442, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.037>
- Li, X., Shen, Z., Wai, O. W. H., Li, Y.-S. (2001). Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 42 (3), 215–223.
- López, D. L., Gierlowski-Kordesch, E., Hollenkamp, C. (2010). Geochemical Mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213, 27–45.

- McConnell, J. R., Edwards, R. (2008). Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings of the national academy of sciences*, 34, 12140–12144.
- Moiseenko, T. I. (2015). Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochemistry International*, 53(3), 213–223. <https://doi.org/10.1134/S001670291503009X>
- Müller, G. (1979). Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. — Veränderungen seit 1971. *Umschau in Wissenschaft and Technik*, 79, 778–783. (In German)
- Norton, S., Dillon, P., Evans, R. (1990). The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments. *Acidic Precipitation*, 73–101. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4454-7_4
- Nriagu, J. O. (1990). The rise and fall of leaded gasoline. *Science of The Total Environment*, 92, 13–28. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90318-O](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90318-O)
- Rainbow, P.S., Hildrew, A. G., Smith, B. D., Geatches, T., Luoma, S. N. (2012). Caddisflies as biomonitors identifying thresholds of toxic metal bioavailability that affect the stream benthos. *Environmental Pollution*, 166, 196–207.
- Rognerud, S., Hongve, D., Fjeld, E., Ottesen, R. T. (2000). Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway. *Environmental Geology*, 39 (7), 723–732.
- Shevchenko, V. P., Dolotov, Y. S., Filatov, N. N., Alexeeva, T. N., Filippov, A. S., Nothig, E.-M., Novigatsky, A. N., Pautova, L. A., Platonov, A. V., Politova, N. V., Rat'kova, T. N., Stein, R. (2005). Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia). *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 57–66.
- Slukovskii, Z. I. (2015). Geoecological Assessment of Small Rivers in the Big Industrial City Based on the Data on Heavy Metal Content in Bottom Sediments. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40 (6), 420–426. <https://doi.org/10.3103/S1068373915060084>
- Slukovskii, Z. I., Medvedev, M. A., Siroezhko, E. V. (2020). Long-range heavy metal aerosols transport as a factor of the formation of the geochemical characteristics of current lake bottom sediments from the southwestern republic of Karelia (exemplified by lake Ukonlampi, Lahdenpohja district). *Journal of Elementology*, 25 (1). <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.1.1816>
- Stankevica, K., Klavins, M., Rutina, L. (2012). Accumulation of metals in sapropel. *Material science and applied chemistry*, 26, 99–105.
- Tessier, A., Campbell, P.G., Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844–851.
- Thomas, V. (1995). The elimination of lead in gasoline. *Annual Review of Energy and the Environment*, 20, 301–324.
- Tokarev, I. V., Borodulina, G. S., Blazhennikova, I. V., Avramenko, I. A. (2015). Isotope-geochemical data on ferruginous mineral waters: Conditions of formation of “Marcial Waters” resort, Karelia. *Geochemistry International*, 53, 83–86. <https://doi.org/10.1134/S0016702914110093>
- Verta, M., Tolonen, K., Simola, H. (1998). History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments. *Science of The Total Environment*, 87/88, 1–18.
- Vierikko, K., Yli-Pelkonen, V. (2019). Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland. *Urban Ecosystems*, 22, 769–783. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00849-7>
- Vinogradova, A., Kotova, E., Topchaya, V. (2017). Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. *Geography and Natural Resources*, 38(1), 78–85. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010103>
- Violante, A., Krishnamurti, G. S. R., Pigna, M. (2007). Factors affecting the sorption desorption of trace elements in soil environments. In: A., Violante, P.M., Huang, G.M., Gadd, ed., *Biophysico-chemical Processes of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments*. Wiley IUPAC, Ser. “Biophysico-chemical Processes in Environmental Systems”, 169–214.
- Virkutyte, J., Vadakoityte, S., Sinkevičius, S., Sillanpää, M. (2008). Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(2), 119–132. <https://doi.org/10.1080/02757540801920105>

Статья поступила в редакцию 3 июля 2019 г.
Статья рекомендована в печать 27 ноября 2019 г.

Контактная информация:

Слуковский Захар Иванович — slukovsky87@gmail.com

Accumulation level and fractions of heavy metals in sediments of small lakes of the urbanized area (Karelia)*

Z. I. Slukovskii

Institute of North Industrial Ecology Problems of Kola Science Center of RAS,
13a, Academgorodok ul., Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation
Institute of Geology of Karelian Research Center of RAS,
11, Pushkinskaya ul., Petrozavodsk, 185910, Republic of Karelia, Russian Federation

For citation: Slukovskii, Z. I. (2020). Accumulation level and fractions of heavy metals in sediments of small lakes of the urbanized area (Karelia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (1), 172–193. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.109> (In Russian)

A detailed analysis of the environmental geochemistry features of the sediments of two small lakes located in Petrozavodsk city was presented. Samples of lakes were collected in 2016 and 2018 using a peat drill for deep layers of sediments and a sampler Limnos for modern layers of deposits. In the laboratory, after the drying and abrasion of samples until the powder condition, sediments were measured by an X-ray fluorescence spectrometer and mass-spectral method on a XSeries-2 ICP-MS instrument. To have an environmental interpretation of results the sum indicator of pollution and index of geoaccumulation were calculated for each waterbody. The results showed the lake sediments of Petrozavodsk have different geochemistry features and various levels of pollution of heavy metals. In comparison with the background, such metals as Pb, Sb, V, Cu, Zn, W, and Bi have the highest level of accumulation in Petrozavodsk's lakes. At the same time, the sediments of lake Chetyrekhverstnoye characterized by pollution from low to middle level and the sediments of lake Lamba have a pollution level from low to extremely high values. Almost all metals are predominantly in mineral phases, however, metals significantly have an association with organic matter and exchange fractions that present dangerously due to the migration of pollutants in systems “from sediments into the water” and “from sediments into biota”.

Keywords: heavy metals, sediments, form of pollutants, small lakes, urbanization, Republic of Karelia.

References

- Bartnicki, J. (1994). An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results. *Water, Air, & Soil Pollution*, 75 (3–4), 227–263. <https://doi.org/10.1007/BF00482939>
- Dauvalter, V. A. (2006). Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, and As) in bottom sediments of water bodies of the white sea catchment area on the kola peninsula. *Geochemistry International*, 44 (2), 205–208. <https://doi.org/10.1134/S001670290602011X>
- Dauvalter, V. A. (2012). *Geoecology of bottom sediments of lakes*. Murmansk: MGTU Press. (In Russian)
- Dauvalter, V., Kashulin, V., Sandimirov, S., Terentjev, P., Denisov, D., Amundsen, P.-A. (2011). Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46, 1020–1033.
- Davydova, N., Subetto, D., Kukkonen, M., Simola, H. (1999). Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages. *Boreal Environment Research*, 4(3), 269–275.
- Dolotov, A. V., Gapeeva, M. V. (2009). Evaluation of heavy metals pollution of drinking water reservoirs (on the example of the Uvodsky reservoir). *Ekologiya cheloveka*, 1, 15–19. (In Russian)

* The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research according to the research project no. 18-05-00897.

- Escobar, J., Whitmore, T. J., Kamenov, G. D., Riedinger-Whitmore, M. A. (2013). Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *Journal of Paleolimnology*, 49 (2), 237–252.
- Filatov, N. N., Litvinenko, A. V., Freyndling, V. A. (2001). *Catalog of lakes and rivers of Karelia*. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Förstner, U., Heise, S., Schwartz, R., Westrich, B., Ahlf, W. (2004). Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *Journal of Soils and Sediments*, 4(4), 247–260.
- Håkanson, L. (1984). Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects. *Water Resources Research*, 20 (1), 41–46.
- Harguinteguy, C. A., Cirelli, A. F., Pignata, M. L. (2014). Heavy metal accumulation in leaves of aquatic plant *Stuckenia filiformis* and its relationship with sediment and water in the Suquia river (Argentina). *Microchemical Journal*, 114, 111–118.
- Hosono, T., Alvarez, K., Kuwae, M. (2016). Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources. *Science of The Total Environment*, 559, 24–37.
- Ivanov, D. V., Ziganshin, I. I., Osmelkin, E. V. (2011). Assessment of the sedimentation rate in the lakes of Kazan and adjacent territories. *Geosursy*, 2 (38), 46–48. (In Russian)
- Keinonen, M. (1992). The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *Science of The Total Environment*, 113(3), 251–268. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90004-C](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90004-C)
- Krutskiy, N. V., Borodulina, G. S., Kaznina, N. M., Batova, Y. V., Ryazancev, P. A., Ahmetova, G. V., Novikov, S. G., Kravchenko, I. Y. (2016). Geoecological bases of the organization of monitoring of northern urbanized territories (on the example of Petrozavodsk). *Trudy Karelskogo nauchnogo centra*, 12, 52–67. (In Russian)
- Krutskiy, N. V., Kosinova I. I. (2014). Methods of transformation of the environment according to the results of ecological and geochemical studies (on the example of Petrozavodsk). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*, 3, 95–97. (In Russian)
- Kuwae, M., Tsugeki, N. K., Agusa, T., Toyoda, K., Tani, Y., Ueda, S., Tanabe, S., Urabe, J. (2013) Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia. *Science of the Total Environment*, 442, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.037>
- Latushkina, E. N., Rasskazov, A. A. (2013). Mineralogical genesis of microelements of modern bottom sediments of rivers in urbanized areas experiencing a high man-made load (using the example of the Moscow River and small rivers of the Moscow Region). *Vestnik Buriatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 4, 16–24. (In Russian)
- Lavrova, N. B. (2005). The development of vegetation of the Onega Lake basin during the degradation of the last glaciation. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii*, 8, 143–148. (In Russian)
- Li, X., Shen, Z., Wai, O. W. H., Li, Y.-S. (2001). Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 42 (3), 215–223.
- López, D. L., Gierlowski-Kordesch, E., Hollenkamp, C. (2010). Geochemical Mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213, 27–45.
- Lozovik, P. A., Galahina, N. E. (2017). Changes in the chemical composition of the Kenti River as a result of anthropogenic influence. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra*, 3, 21–35. (In Russian)
- Maslennikova, A. V., Udachin, V. N., Deryagin, V. V. (2014). *Paleoecology and geochemistry of the lake sedimentation of the Holocene of the Urals*. Ekaterinburg: South Ural State University Press. (In Russian)
- McConnell, J. R., Edwards, R. (2008). Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings of the national academy of sciences*, 34, 12140–12144.
- Moiseenko, T. I. (2015). Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochemistry International*, 53(3), 213–223. <https://doi.org/10.1134/S001670291503009X>
- Moiseenko, T. I., Dauvalter, V. A., Rodyushkin, I. V. (1997). *Geochemical migration of elements in a subarctic reservoir (using the example of Lake Imandra)*. Apatity: Kol'skii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Moiseenko, T. I., Gashkina, N. A. (2010). *The formation of the chemical composition of lake waters in a changing environment*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Müller, G. (1979). Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. — Veränderungen seit 1971. *Umschau in Wissenschaft and Technik*, 79, 778–783. (In German)

- Norton, S., Dillon, P., Evans, R. (1990). The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments. *Acidic Precipitation*, 73–101. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4454-7_4
- Novickij, D. G., Ilmast, N. V., Slukovskii, Z. I., Suhovskaya, I. V. (2018). Biogeochemical aspects of water pollution in urban areas in the Republic of Karelia on the example of a perch (*Perca fluviatilis*). *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 3, 42–51. (In Russian)
- Novikov, S. G. (2014). *Ecological assessment of pollution by heavy metals of soil in urban areas by land use categories (for example, the city of Petrozavodsk)*. PhD. (In Russian)
- Nriagu, J. O. (1990). The rise and fall of leaded gasoline. *Science of The Total Environment*, 92, 13–28. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90318-O](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90318-O)
- Opekunov, A. Y., Manuylov, S. F., Shakhverdov, V. A., Churakov, A. V., Kurinnyy, N. A. (2012). Composition and properties of bottom sediments of r. Moika and Obvodnyi channel (St. Petersburg). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 7. Geologiya. Geografiya*, (2), 65–80. (In Russian)
- Petrova, E. A. (2006). Patterns of distribution and forms of heavy metals in the bottom sediments of Lake Ladoga. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 7. Geologiya. Geografiya*, 1, 18–29. (In Russian)
- Potakhin, M. S. (2011). Morphological features of reservoirs in Petrozavodsk. In: *Vodnaia sreda i prirodno-territorialnye komplekсы: issledovanie, ispol'zovanie, okhrana: materialy IV shkoly-konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (Petrozavodsk, 26–28 avgusta 2011 g.)*. Petrozavodsk, 180–183. (In Russian)
- Potakhin, M. S., Belkina, N. A., Slukovskii, Z. I., Novitskiy, D. G., Morozova, I. V. (2018). Changes in the bottom sediments of Vygozero as a result of multifactorial anthropogenic impact. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*, 3(48), 107–117. (In Russian)
- Rainbow, P. S., Hildrew, A. G., Smith, B. D., Geatches, T., Luoma, S. N. (2012). Caddisflies as biomonitors identifying thresholds of toxic metal bioavailability that affect the stream benthos. *Environmental Pollution*, 166, 196–207.
- Rognerud, S., Hongve, D., Fjeld, E., Ottesen, R. T. (2000). Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway. *Environmental Geology*, 39 (7), 723–732.
- Saet, I. E., Revich, B. A., Ianin, E. P. (1990). *Geochemistry of the environment*. Nedra Publ., Moscow. (In Russian)
- Shafigullina, G. T., Udachin, V. N. (2009). The content of heavy metals in bottom sediments of the Uchaly geotechnical system. *Razvedka i okhrana nedr*, 1, 60–66. (In Russian)
- Shevchenko, V. P., Dolotov, Y. S., Filatov, N. N., Alexeeva, T. N., Filippov, A. S., Nothig, E.-M., Novigatsky, A. N., Pautova, L. A., Platonov, A. V., Politova, N. V., Rat'kova, T. N., Stein, R. (2005). Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia). *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 57–66.
- Sin'kevich E. I., Ekman, I. M. (1995). Bottom sediments of the lakes of the Eastern part of the Fennoscandian crystal shield. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I. (2014). *Ecological and geochemical analysis of the state of bottom sediments of small rivers in urbanized areas (on the example of the city of Petrozavodsk)*. PhD. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I. (2015). Geoecological Assessment of Small Rivers in the Big Industrial City Based on the Data on Heavy Metal Content in Bottom Sediments. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40 (6), 420–426. <https://doi.org/10.3103/S1068373915060084>
- Slukovskii, Z. I. (2018). The trace element composition of bottom sediments of small lakes as an indicator of environmental risks in the urbanized environment (the Republic of Karelia). *Vodnoe khoziaistvo Rossii*, 6, 70–82. (In Russian) <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-6-6>
- Slukovskii, Z. I. (2019). Fly migration and accumulation of lead. *Priroda*, 5, 29–34. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Ilmast, N. V., Sukhovskaia, I. V., Borvinskaia, E. V. (2016). Analysis of the heavy metals content in the organs of fish of Lamba Lake (Petrozavodsk, Republic of Karelia). In: *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniia: materialy VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 120-letiiu so dnia rozhdeniia G. M. Krepsa i 110-letiiu so dnia rozhdeniia O. I. Semenova-Tian'-Shanskogo*. Apatity: Kol'skii nauchyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Ilmast, N. V., Sukhovskaia, I. V., Borvinskaia, E. V., Gogolev, M. A. (2017). The geochemical specifics of processes of modern sedimentation on the bottom of Lamba Lake in conditions of technological impact. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, 10, 45–63. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Medvedev, A. S. (2015). The Content of Heavy Metals and Arsenic into Sediment of Chetyrekhverstnoe and Lamba Lakes (Petrozavodsk, Karelia). *Ekologicheskaiia khimiia*, 1, 56–62. (In Russian)

- Slukovskii, Z. I., Medvedev, A. S., Bubnova, T. P., Syroezhko, E. V. (2017). Accumulation and vertical distribution of heavy metals in sapropel of Gryaznoe Lake (Medvezhëgorsk district, Republic of Karelia). *Vestnik Murmanskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 20(1/2), 177–188. (In Russian) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-177-188>
- Slukovskii, Z. I., Medvedev, M. A., Siroezhko, E. V. (2020). Long-range heavy metal aerosols transport as a factor of the formation of the geochemical characteristics of current lake bottom sediments from the southwestern republic of Karelia (exemplified by lake Ukonlampi, Lahdenpohja district). *Journal of Elementology*, 25 (1). <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.1.1816>
- Stankevica, K., Klavins, M., Rutina, L. (2012). Accumulation of metals in sapropel. *Material science and applied chemistry*, 26, 99–105.
- Starodymova, D. P., Shevchenko, V. P., Kokryatskaya, N. M., Aliyev, R. A., Bychkov, A. Y., Zabelina, S. A., Chupakov, A. V. (2016). Geochemistry of bottom sediments of a small lake (catchment area of Lake Onega, Arkhangelsk region). *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniia*, 9, 172–177. (In Russian)
- Strakhovenko, V. D. (2011). *Geochemistry of bottom sediments of the small continental lakes of Siberia*. Doctor of Science. (In Russian)
- Tessier, A., Campbell, P. G., Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844–851.
- Thomas, V. (1995). The elimination of lead in gasoline. *Annual Review of Energy and the Environment*, 20, 301–324.
- Tokarev, I. V., Borodulina, G. S., Blazhennikova, I. V., Avramenko, I. A. (2015). Isotope-geochemical data on ferruginous mineral waters: Conditions of formation of “Marcial Waters” resort, Karelia. *Geochemistry International*, 53, 83–86. <https://doi.org/10.1134/S0016702914110093>
- Verta, M., Tolonen, K., Simola, H. (1998). History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments. *Science of The Total Environment*, 87/88, 1–18.
- Vierikko, K., Yli-Pelkonen, V. (2019). Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland. *Urban Ecosystems*, 22, 769–783. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00849-7>
- Vinogradova, A., Kotova, E., Topchaya, V. (2017). Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. *Geography and Natural Resources*, 38(1), 78–85. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010103>
- Violante, A., Krishnamurti, G. S. R., Pigna, M. (2007). Factors affecting the sorption desorption of trace elements in soil environments. In: A., Violante, P. M., Huang, G. M., Gadd, ed., *Biophysico-chemical Processes of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments*. Wiley IUPAC, Series “Biophysico-chemical Processes in Environmental Systems”, 169–214.
- Virkutyte, J., Vadakojyte, S., Sinkevičius, S., Sillanpää, M. (2008). Heavy metal distribution and chemical partitioning in Lake Saimaa (SE Finland) sediments and moss *Pleuroziumschreberi*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(2), 119–132. <https://doi.org/10.1080/02757540801920105>
- Water objects of Petrozavodsk*. (2013). Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Yanin, Y. P. (2011). Forms of cadmium in man-made muds of the Pakhra River and assessment of its migration abilities. *Geografiia i prirodnye resursy*, 1, 42–46. (In Russian)
- Yanin, Y. P. (2013). *Technogenic river silts (material composition, geochemical features, environmental assessment)*. Moscow: VINITI Publ. (In Russian)

Received: July 3, 2019
Accepted: November 27, 2019

Contact information:

Zakhar I. Slukovskii — slukovsky87@gmail.com