



Экологическая химия 2015, 24(1); 56–62.

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЧЕТЫРЕХВЕРСТНОГО И ЛАМБЫ (Г. ПЕТРОЗАВОДСК, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

З. И. Слуковский, А. С. Медведев

*Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук,
ул. Пушкинская 11, Петрозаводск, Карелия, 185910 Россия
e-mail: slukovsky87@gmail.com*

Поступило в редакцию 10 декабря 2014 г.

Проведено эколого-геохимическое исследование донных отложений озер Четырехверстного и Ламбы, расположенных на территории крупного города на северо-западе России – Петрозаводска. Определены основные источники загрязнения изучаемых водных объектов. Сделана сравнительная характеристика содержания тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного, Ламбы и Пряжинского, а также в почвенном покрове и речных осадках г. Петрозаводска. Рассчитаны индексы геоаккумуляции тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях данных водоемов, что позволило оценить экологический статус каждого исследованного элемента.

Ключевые слова: донные отложения, тяжелые металлы, мышьяк, озера, индекс геоаккумуляции

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые металлы и металлоиды являются одними из самых опасных загрязнителей окружающей среды, подверженной процессам антропогенного характера. Разнообразные промышленные выбросы и выбросы от автомобильного, железнодорожного и прочих видов транспорта – главные источники поступления этих поллютантов в природные экосистемы. Городская (урбанизированная) среда представляет собой локальную зону, в которой могут быть сконцентрированы все возможные

очаги техногенного загрязнения, поэтому актуальность мониторинговых и природоохранных мероприятий на этой территории особенно высока, учитывая ее постоянное расширение.

Исследования тяжелых металлов в водных объектах крайне важны при комплексной и всесторонней оценке общего состояния техногенно нарушенной природной среды [1]. Поскольку водоемы и водотоки обычно приурочены к понижениям рельефа местности, то активный поверхностный сток с прилегающего загрязненного почвенного покрова территории города



Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых городских водоемов и точек отбора проб.

делает их концентраторами значительного количества мигрирующих поллютантов. Донные отложения при этом являются своеобразными депо для загрязнителей водных объектов, фиксируя длительный (исторический) эффект антропогенного влияния на экосистему [2]. Тяжелые металлы, сорбируемые в донных отложениях тонкими минеральными частичками, органическим веществом и железомарганцевыми образованиями [3], могут не представлять прямой опасности для живых организмов, основным местом обитания которых является донный грунт. Однако накопление поллютантов в телах некоторых гидробионтов (олигохет, хирономид, моллюсков) может способствовать миграции металлов по трофическим цепям, индуцируя впоследствии заболеваемость у более высокоорганизованных форм водных животных. Кроме того, нарушение физико-химического равновесия донных отложений может спровоцировать явление вторичного загрязнения водной среды, учитывая, что буферная способность донных осадков (особенно верхних слоев) – не безгранична.

Таким образом, основываясь на повышенном интересе, проявляемом к водным объектам г.

Петрозаводска [4], авторами проведены эколого-геохимические исследования одних из наиболее малоизученных водоемов указанного района – малых лесных озер Ламба и Четырехверстное (рис. 1).

Оз. Четырехверстное расположено в юго-восточной части города в микрорайоне Ключевая. Площадь водоема 0.118 км^2 , высота над уровнем моря – 102.2 м , длина береговой линии – 1.5 км , длина озера – 0.6 км , максимальная глубина – 4.6 м [5]. Котловина имеет простое строение с глубоководными участками в северной и центральной части озера. Из оз. Четырехверстного вытекает ручей Каменный, который соединяет водоем с Онежским озером. Показатели рН воды озера варьируются от 7.2 до 8.0 , при этом максимальные значения отмечены в весенний период [6]. По гидробиологическим и геохимическим исследованиям Четырехверстного установлено, что водоем является умеренно-загрязненным [6, 7, 8].

Оз. Ламба представляет собой небольшой по площади водоем (0.014 км^2), расположенный в северо-западной части города Петрозаводска, в микрорайоне Сулажгора. Котловина озера имеет простое строение. Берега водоема низкие, заболоченные [4]. Из северной части озера Ламбы

вытекает ручей Студенец, впадающий в реку Томицу. Длина береговой линии составляет 0.58 км. Средняя глубина водоема равна 3.4 м, максимальная – 5.2 м [5]. Для воды оз. Ламба характерна высокая цветность и низкая прозрачность. Следствием данного факта является низкое видовое богатство и низкая плотность фитоперифитона. В фитоперифитоне озера Ламба на немногочисленных макрофитах встречено 29 видов синезеленых, зеленых и диатомовых водорослей [9].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Отбор проб поверхностного слоя донных отложений оз. Четырехверстного производился со льда водоема в апреле 2012 года (всего 5 образцов). Отбор проб поверхностного слоя отложений оз. Ламбы производился в июне 2013 года при помощи резиновой лодки (всего 3 пробы). Основной инструмент отбора – дночерпатель системы Экмана-Берджи. Исследовались пробы из центральной части водоемов – зоны аккумуляции. Кроме того, при помощи ручного поршневого бура в апреле 2013 года со льда оз. Четырехверстного были отобраны пробы донных отложений на глубину до 1 м. В данной работе усредненный химический состав озерных осадков с глубины от 0.2 до 1.0 м принят в качестве фонового [2]. Это необходимо для максимально объективной оценки загрязненности тяжелыми металлами поверхностного слоя донных отложений.

После отбора проб донных отложений проводилось их просушивание до воздушно-сухого состояния при комнатных условиях. Для достижения максимальной сохранности глинистой фракции жидкая часть пробы просушивалась отдельно – в стеклянных чашках Петри, предварительно промытых дистиллированной водой. Лабораторные исследования проводились на базе “Аналитического центра” Института геологии Карельского научного центра Российской Академии наук (г. Петрозаводск). Содержание микроэлементов в пробах донных отложений определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS. Разложение образцов донных отложений и организмов проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовали навески образцов массой 0.1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение контрольных образцов

(холостых проб) и одного стандартного образца. Для проверки правильности анализа образца использовали стандартный образец химического состава донного ила озера Байкал БИЛ-1 (ГСО 7126-94).

Статистическая обработка выполнена при помощи программы Microsoft Excel 2007. Для графической иллюстрации результатов использованы программы EasyCapture 1.2.0 и Inkscape 0.48.4. Для оценки уровня загрязненности донных отложений тяжелыми металлами использовался индекс геоаккумуляции, рассчитываемый по формуле:

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

где C – концентрация элемента в загрязненном слое донных отложений, B – фоновая концентрация элемента [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные донные отложения озер г. Петрозаводска представлены преимущественно сапропелями [11], высокое содержание органического вещества в которых является дополнительным фактором техногенного статуса изученных отложений вследствие высокой сорбируемости тяжелых металлов гумусовыми кислотами во время водной миграции загрязнителей [12]. Кроме того, содержание в озерных донных отложениях значительного числа тонкодисперсных минеральных частиц также способствует интенсивному накоплению поллютантов на дне петрозаводских водоемов [2]. Следствием этого является значительное превышение концентраций тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях озер Четырехверстное и Ламба (табл.) над содержанием этих элементов в почвенном покрове и речных осадках г. Петрозаводска [13, 14, 15].

Максимальные концентрации большинства исследованных элементов в донных отложениях оз. Четырехверстного отмечены в точках Чет-3 и Чет-4, минимальные – в точке Чет-1 (рис. 1 и табл.). Исключения составляют распределения кадмия и мышьяка, максимальные содержания которых преимущественно отмечаются в крайних точках профиля, по которому отбирались образцы проб. Максимальные концентрации почти всех тяжелых

Содержание тяжелых металлов и мышьяка (мг/кг) в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламбы^a

Значение	Pb	Zn	As	Cd	Co	Ni	Cu	Mo	Cr	Mn	V	W
класс опасности	1				2				3			
Чет-1	35.1	211.9	7.1	1.1	14.1	40.2	79.4	1.5	82.2	1163	75.6	0.7
Чет-2	49.3	271.5	9.6	0.9	20.2	53.2	94.4	1.8	105.2	1150	118.4	1.1
Чет-3	58.5	298.6	6.1	0.9	27.3	76.0	124.2	2.1	136.8	1183	189.9	1.5
Чет-4	57.4	289.4	–	0.8	24.7	69.7	115.1	2.2	123.2	1252	178.9	1.5
Чет-5	44.4	257.3	9.3	0.9	21.1	60.7	101.4	1.9	120.7	1114	123.6	1.1
x_{cp}	48.9	265.7	8.0	0.9	21.5	59.9	102.9	1.9	113.6	1172	137.3	1.2
S	9.7	34.1	1.7	0.1	5.0	14.0	17.5	0.3	20.8	51.1	47.0	0.3
$V, \%$	19.8	12.8	21.1	12.6	23.3	23.4	17.0	14.4	18.3	4.4	34.3	27.8
Лам-1	51.8	529.7	8.8	0.9	20.1	330.7	383.2	5.9	90.6	1203	1850.0	1.9
Лам-2	57.4	427.3	–	0.8	18.8	224.7	262.6	5.0	73.1	992	1513.0	1.8
Лам-3	28.0	451.9	3.0	0.6	18.1	208.7	499.4	2.4	73.7	1120	853.6	1.3
x_{cp}	45.7	469.6	5.9	0.8	19.0	254.7	381.7	4.4	79.1	1105	1405.5	1.7
S	15.6	53.5	4.1	0.2	1.0	66.3	118.4	1.8	9.9	106	506.8	0.3
$V, \%$	34.2	11.4	69.8	21.8	5.2	26.0	31.0	41.1	12.6	9.6	36.1	20.1
Фон	7.5	121.3	31.0	0.8	7.8	22.3	42.0	1.1	39.1	307	34.1	0.3

^a (x_{cp}) среднее арифметическое значение выборки, (S) стандартное отклонение, (V) коэффициент вариации.

металлов (исключение – свинец и медь) и мышьяка в донных отложениях оз. Ламбы приурочены к точке Лам-1 (рис. 1 и табл.). При этом вариативность концентраций изученных элементов в пределах одной выборки достигает 34% (по содержанию ванадия) для оз. Четырехверстного и 70% (по содержанию мышьяка) для оз. Ламбы. Неравномерное распределение содержания тяжелых металлов и мышьяка в исследованных озерных осадках – следствие морфологических особенностей петрозаводских водоемов: образцы проб с максимальными концентрациями большинства элементов отобраны в местах с наибольшей глубиной озер Четырехверстное и Ламба [5], где происходит обильное накопление самых тонких минеральных частиц и органических останков – “эффeкт воронки” [2].

Усредненные содержания тяжелых металлов в поверхностном слое донных отложений петрозаводских озер от 2 до 41 раза превышает концентрации этих элементов в фоновых слоях озерных осадков. Наибольшие превышения отмечены по ванадию, никелю и меди в донных отложениях оз. Ламбы и свинцу – в осадках обоих городских водоемов. Концентрации тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях озер

г. Петрозаводска были подвержены сравнению с данными о содержании микроэлементов в донных осадках оз. Пряжинского, которое также испытывает определенную антропогенную нагрузку [16]. Установлено, что в отложениях оз. Ламбы концентрация ванадия в 70 раз выше, чем в осадках оз. Пряженского, меди в 47 раз, никеля в 31, молибдена в 7, хрома и вольфрама в 5 раз. Концентрация мышьяка в донных отложениях оз. Ламбы и оз. Пряженского находится на одном уровне. В донных отложениях оз. Четырехверстного концентрация меди в 12 раз превышает концентрацию этого же элемента в оз. Пряжинском, никеля, хрома и ванадия в 7 раз. Результаты данного сравнения иллюстрируют значительное влияние фактора крупного города на формирование химического состава донных отложений малых водных объектов, расположенных в пределах урбанизированной территории.

Помимо общего загрязняющего фона города как комплексного источника поступления различных поллютантов в природные экосистемы, необходимо учитывать и локальные источники загрязнения, расположенные вблизи изучаемых объектов. Таким источником для оз. Четырех-

верстного являются выбросы автомобильного и железнодорожного транспорта, поскольку соответствующие объекты инфраструктуры проходят в 100-метровой близости от водоема по направлению господствующих ветров на территории г. Петрозаводска (рис. 2). Повышенное содержание свинца в поверхностном слое донных отложений – индикатор газовых выбросов от сгорания топлива различных транспортных средств [17]. Загрязнение донных отложений оз. Ламбы следует связать с выбросами Петрозаводской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), расположенной в 500 м от водного объекта. И хотя ветра юго-восточного и восточно-юго-восточного направления составляют в г. Петрозаводске 7–8 % от ветров всех направлений, крайне высокий уровень обогащения донных отложений оз. Ламбы ванадием и никелем легко маркирует негативное влияние выбросов ТЭЦ на химический состав изученных осадков [17].

Следует отметить, что содержание кадмия в исследованных донных отложениях озер г. Петрозаводска находится на уровне природных концентраций, а содержание мышьяка в поверхностных слоях озерных осадков в 4–5 раз ниже (!) фоновых значений. Данные факты связаны с преимущественным геогенным происхождением высоких концентраций этих элементов на территории Петрозаводска (в почвенном покрове, в донных отложениях рек города) [7, 14, 18]. Предположительно кадмий и мышьяк генетически связаны с повышенным фоном этих элементов в современных водно-ледниковых отложениях, распространенных на западном побережье Онежского озера, и песчаниках, выходы которых отмечены непосредственно в пределах городской черты (район Ключевая).

Расчет индекса геоаккумуляции и экологическая интерпретация полученных значений [2] показали, что донные отложения оз. Четырехверстного умеренно/сильно загрязнены только по одному элементу – свинцу, по ванадию, марганцу и вольфраму отмечается умеренный уровень техногенного загрязнения (рис. 3). Слабым/умеренным уровнем загрязнения донные отложения оз. Четырехверстного характеризуются по хрому, кобальту, никелю, меди, цинку и молибдену, слабым – по кадмию и мышьяку.

Наибольшее значение I_{geo} для донных отложений оз. Ламбы установлено по ванадию

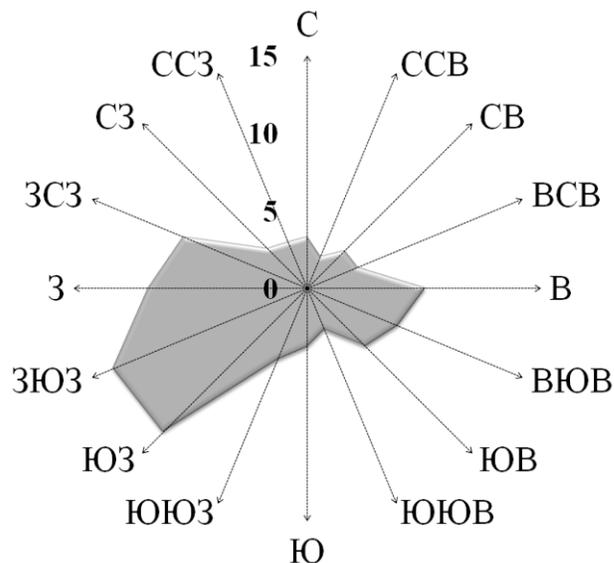


Рис. 2. Роза ветров г. Петрозаводска с 2005 по 2014 гг. (по данным интернет-сайта www.rp5.ru).

(4.7), что обуславливает сильный уровень загрязнения этим тяжелым металлом исследуемой гидроэкосистемы (рис. 4). По другим тяжелым металлам отмечается умеренное/сильное загрязнение водного объекта никелем, медью и свинцом, умеренное – вольфрамом, молибденом, цинком, марганцем, слабым/умеренным – кобальтом и хромом и слабым – кадмием и мышьяком. Таким образом, если не брать во внимание значения индексов геоаккумуляции по кадмию и мышьяку, ряды убывания экологической опасности тяжелых металлов для двух изученных озер существенно разнятся, что подчеркивает влияние специфики локальных источников загрязнения на экосистемы водных объектов. Приоритетными загрязнителями (из числа тяжелых металлов и металлоидов) донных отложений оз. Четырехверстного следует считать – свинец и в меньшей степени – ванадий, марганец и вольфрам, для донных отложений оз. Ламбы – ванадий, никель, медь и свинец и в меньшей степени – вольфрам, молибден, цинк и марганец.

Отмеченный уровень загрязнения донных отложений петрозаводских озер тяжелыми металлами находит отклик в изменении качественных показателей живых организмов – диатомовых водорослей, населяющих водные грунты [8]. Авторами установлено, что увеличение суммарного показателя загрязнения Z_c в пробах

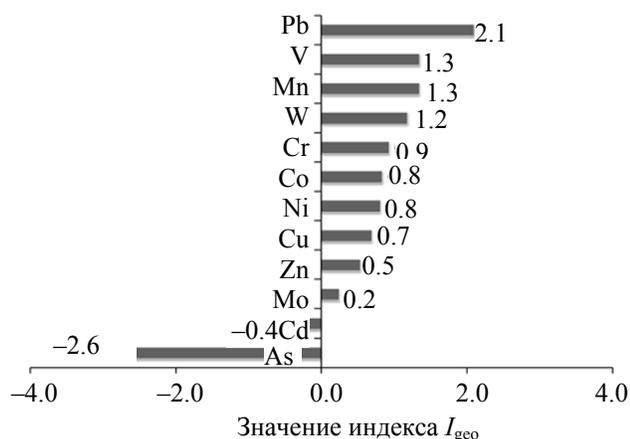


Рис. 3. Индексы геоаккумуляции I_{geo} для тяжелых металлов в донных отложениях оз. Четырехверстного.

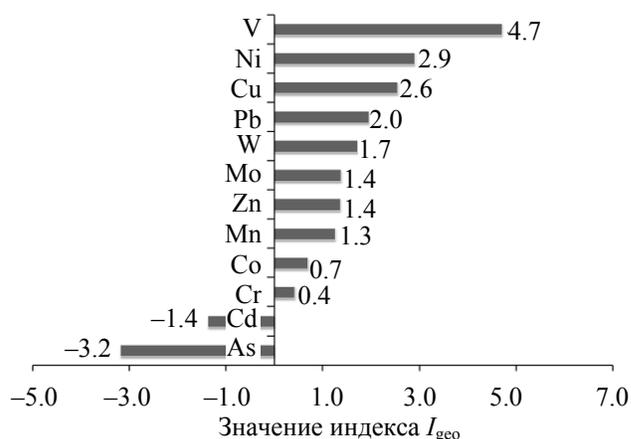


Рис. 4. Индексы геоаккумуляции I_{geo} для тяжелых металлов в донных отложениях оз. Ламбы.

донных отложений оз. Четырехверстного коррелирует с деградацией видового состава обнаруженных створок водорослей диатомового комплекса городского озера. Аналогичные индикаторные закономерности отмечены при исследовании речных донных отложений г. Петрозаводска [19]. Кроме того, отмечено значительное накопление поллютантов (кадмия, свинца, меди, цинка и никеля) в водорослях перифитона петрозаводских озер [9], что говорит о высоком уровне биодоступности загрязнителей и опасности их непрерывной миграции по трофическим цепям.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование химического состава донных отложений двух малых озер Четырехверстного и Ламбы, расположенных на территории г. Петрозаводска, позволили оценить уровень обогащения осадков элементами из числа тяжелых металлов и мышьяком. Установлено, что содержания почти всех изученных элементов в озерных отложениях города превышают концентрации этих же элементов в почвенном покрове и речных донных отложениях Петрозаводска, а также оз. Пряжинского, расположенного вблизи населенного пункта Пряжа (Республика Карелия). Кроме того, авторские расчеты позволили подтвердить факты о концепции преимущественно природного генезиса кадмия и мышьяка на территории г. Петрозаводска, разрабатываемой сотрудниками лаборатории геохимии и моделирования природных и техногенных процессов института геологии КарНЦ РАН.

Специфика повышенного уровня накопления в донных отложениях свинца для оз. Четырехверстного и ванадия и никеля для оз. Ламбы указывает на локальные источники загрязнения водных объектов в пределах городской черты. Четырехверстное преимущественно подвержено загрязняющим выбросам от автомобильного и железнодорожного транспорта, а Ламба – от Петрозаводской ТЭЦ, активно действующей с 70-х годов прошлого века. Анализ полученных значений индексов геоаккумуляции I_{geo} позволил оценить загрязнение донных отложений оз. Четырехверстного как умеренное/сильное ($I_{geo} = 2.1$) по свинцу, а донных отложений оз. Ламба как сильное по ванадию ($I_{geo} = 4.7$) и умеренное/сильное по никелю ($I_{geo} = 2.9$), меди ($I_{geo} = 2.6$) и свинцу ($I_{geo} = 2.0$). Указанные тяжелые металлы предлагается учитывать в качестве приоритетных загрязнителей экосистем петрозаводских озер при проведении комплексных эколого-геохимических исследований.

Авторы выражают искреннюю благодарность М.А. Гоголеву и А.Г. Анхимкову за помощь, оказанную при отборе проб донных отложений, а также сотрудникам аналитической лаборатории В.Л. Утичиной и А.С. Парамонову за качественное проведение лабораторных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мур, Дж.В., Рамамурти, С., *Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния*, Пер. с англ., Москва: Мир, 1987, 288 с.
2. Даувальтер, В.А., *Геоэкология донных отложений озер*, Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012, 242 с.

3. Förstner, U., *Hydrobiologia*, 1987, vol. 149, pp. 221–246.
4. *Водные объекты города Петрозаводска*, Учебное пособие, Ред. А.В. Литвиненко, Т.И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013, 109 с.
5. Потахин, М.С., *Матер. IV Школы-конф. мол. ученых с междунар. участием “Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана” (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.)*, Петрозаводск, 2011, сс. 180–183.
6. Сластина, Ю.Л., Клочкова, М.А., *Матер. IV Школы-конф. мол. ученых с междунар. участием “Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана” (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.)*, Петрозаводск, 2011, сс. 121–123.
7. Крутских, Н.В., Кричевцова, М.В., *Матер. IV Школы-конф. мол. ученых с междунар. участием “Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана” (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.)*, Петрозаводск, 2011, сс. 59–64.
8. Слуковский, З.И., Шелехова, Т.С., *Матер. третьей междунар. научно-практич. конф. “Экологическая геология: теория, практика, региональные проблемы” (Воронеж, 20–22 нояб. 2013 г.)*, Воронеж, 2013, сс. 207–210.
9. Комулайнен, С.Ф., *Труды Карельского научного центра РАН*, 2014, № 2, сс. 43–50.
10. Müller, G., *Umschau in Wissenschaft and Technik*, 1979, vol. 79, pp. 778–783.
11. Лаврова, Н.Б., *Геология и полезные ископаемые Карелии*, 2006, вып. 9, сс. 183–188.
12. Добровольский, В.В., *Природа*, 2004, № 7, сс. 35–39.
13. Рыбаков, Д.С., Слуковский, З.И., *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*, 2012, № 4, сс. 67–73.
14. Рыбаков, Д.С., Крутских, Н.В., Шелехова, Т.С., Лаврова, Н.Б., Слуковский, З.И., Кричевцова, М.В., Лазарева, О.В., *Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия*, Санкт-Петербург: Изд-во ООО “ЭлекСис”, 2013, 130 с.
15. Слуковский, З.И., *Автореф. дисс. канд. биол. наук*, Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2014, 24 с.
16. Белкина, Н.А., Потапова, И.Ю., *Мат. II республ. shk-конф. мол. ученых “Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана” (Петрозаводск, 20–21 февраля 2006 г.)*, Петрозаводск, 2006, с. 67–70.
17. Саэт, Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин, Е.П., Смирнова, Р.С., Башаркевич, И.Л., Онищенко, Т.Л., Павлова, Л.Н., Трефилова, Н.Я., Ачкаров, А.И., Саркисян, С.Ш., *Геохимия окружающей среды*, Москва: Недра, 1990, 335 с.
18. Слуковский, З.И., *Геология и полезные ископаемые Карелии*, 2013, вып. 16, сс. 132–136.
19. Рыбаков, Д.С., Шелехова, Т.С., *Экология*, 2014, № 1, сс. 45–52.

The Content of Heavy Metals and Arsenic into Sediment of Chetyrekhverstnoe and Lamba Lakes (Petrozavodsk, Karelia)

Z. I. Slukovsky and A. S. Medvedev

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

Abstract—We have made the ecogeochemical research of bottom sediments of Chetyrekhverstnoe and Lamba lakes, which are located in Petrozavodsk, Northwest of Russia. The sources of pollution this lakes are determinated by us. We have compared a content of heavy metals and arsenic into sediments of Chetyrekhverstnoe, Lamba and Pryazinskoe lakes. The index of geoaccumulation of heavy metals and arsenic into sediments of Petrozavosk’s lakes are calculated, it allows to estimate the ecology status of each investigated chemical element.

Keywords: bottom sediments, heavy metals, arsenic, lakes, index of geoaccumulation