

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 54-43:502.51:504.5:911.375.227

З. И. СЛУКОВСКИЙ, С. А. СВЕТОВ

Институт геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Оценена возможность использования геохимических особенностей миграции и аккумуляции щелочных металлов (лития, рубидия и цезия) в качестве индикаторов антропогенного статуса тяжелых металлов в донных отложениях малых рек техногенно нарушенной (урбанизированной) среды. Изучено поведение указанных элементов в донных отложениях рек Петрозаводска (Республика Карелия). Определение химического состава изучаемых осадков проводилось при помощи рентген-флуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X и масс-спектрометра XSeries-2 ICP-MS, содержание органики в донных отложениях (по показателю ППП) оценивалось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 1100 °С. В результате исследований установлено, что среди тяжелых металлов Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sb, W и Pb имеют преимущественно техногенное происхождение в речных отложениях урбанизированной территории, Cr и Cd — преимущественно природное за счет высокого фона этих элементов в четвертичных образованиях исследуемого района. Отмечена тесная связь микроэлементов техногенного статуса, а также Li, Rb и Cs с содержанием в речных отложениях железо-марганцевых образований и органического вещества, что, безусловно, указывает на общность процессов, способствовавших их попаданию в городской водоток. Установлено, что единство аккумуляции в донных отложениях ряда тяжелых металлов с литофильными элементами (Li, Rb и Cs) благодаря высокой химической активности последних позволяет использовать геохимические особенности щелочных металлов в качестве индикатора техногенного статуса приоритетных загрязнителей городской среды.

Ключевые слова: щелочные и тяжелые металлы, донные отложения, геохимические индикаторы, урбанизация, техногенез.

The possibility of using migration geochemical characteristics and alkali metals (lithium, rubidium, and cesium) accumulation as indicators of anthropogenic status of heavy metals in bottom sediments of small rivers in technogenically disturbed (urbanized) environment. We studied behavior of these elements in bottom sediments of rivers of Petrozavodsk (Republic Karelia). Analysis of the sediments chemical composition was made using ARL ADVANT'X X-ray fluorescence spectrometer and XSeries-2 ICP-MS mass-spectrometer. The content of organic matter in bottom sediments (percentage of other impurities) was evaluated by weight method after heating the investigated samples to the temperature of 1100 °C. As a result of research it was found that, among heavy metals, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sb, W, Pb have predominantly technogenic origin in bottom sediments of urbanized area, while Cr and Cd have primarily natural origin due to the high content of these elements in quaternary formations of the studied area. A close connection was marked between the microelements of technogenic status, as well as Li, Rb, Cs, and the presence of iron-manganese formations and organic matter in river sediments, which obviously denotes commonness of processes contributing to their penetration in urban water flow. It was found that the accumulation consistency in bottom sediments of a number of heavy metals with lithophile elements (Li, Rb and Cs) due to high chemical activity of the latter allows the use of geochemical characteristics of alkali metals as an indicator of technogenic status of primary environmental pollutants.

Keywords: alkaline and heavy metals, bottom sediments, geochemical indicators, urbanization, technogenesis.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Изучение последствий трансформации геологической среды на техногенно нарушенных территориях — важный элемент в комплексных экологических исследованиях и природоохранных мероприятиях. Нарушенное состояние верхней части земной коры ведет к изменениям и в других средах, влияя главным образом на сообщества живых организмов, населяющих воздушное, твердое и водное пространства биосферы. В районах крупных городов, являющихся частными проявлениями техногенно нарушенных территорий, подобные работы необходимы в силу постоянного взаимодействия человека и измененной среды [1].

Из числа загрязнителей техногенно нарушенных территорий особую опасность представляют тяжелые металлы (ТМ) и их соединения, которые не разлагаются, обладают токсичным действием, способны включаться в трофические цепи живых организмов и накапливаться во многих из них. Водные объекты, расположенные в зонах усиленной антропогенной нагрузки, наиболее уязвимы для различных поллютантов, в том числе для ТМ [2]. Вещественный состав донных отложений водоемов и водотоков, являющихся своеобразными депо поступления и аккумуляции различных минеральных и органических соединений, отражает картину длительного (исторического) антропогенного воздействия на гидроэкосистемы, а также на их водосборные площади [3].

На формирование химического состава донных отложений значительное влияние оказывают геохимические особенности коренных пород исследуемой территории, поэтому определение техногенного статуса ТМ — важнейшая задача экологической геохимии и токсикологии. Аномальные концентрации металлополлютантов могут быть связаны не только с антропогенной нагрузкой на изучаемые гидроэкосистемы, но и с естественным природным фоном исследуемых микроэлементов, входящих в качестве примесей в состав различных минералов. Одним из возможных решений этой научной проблемы может быть поиск элементов-индикаторов, сопутствующих загрязнителям в процессе миграции и (или) аккумуляции в донных отложениях антропогенно нарушенных территорий.

Цель данной работы — оценить возможность использования геохимических особенностей миграции и аккумуляции щелочных металлов (лития, рубидия и цезия) в качестве индикаторов техногенного статуса тяжелых металлов в донных отложениях рек Петрозаводска — Лососинки и Неглинки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поставленная цель и сопутствующие ей задачи решались при изучении донных отложений двух малых рек — Лососинки и Неглинки, протекающих в своем нижнем течении по центральной части Петрозаводска, главного города Республики Карелия (рис. 1). Петрозаводск — крупный промышленный и транспортный узел на северо-западе Российской Федерации. Основной вклад в загрязнение окружающей среды города вносят выбросы промышленных предприятий (как действующих, так и закрытых к настоящему времени), автомобильного и железнодорожного транспорта (вокзал и депо железнодорожной станции Петрозаводск исторически расположены в центральной части города).

Уровень накопления и пространственное распределение ТМ в почвенном покрове города и донных отложениях Лососинки и Неглинки соответствуют географии главных источников загрязнения на территории Петрозаводска [4–8]. В реки ТМ поступают преимущественно с водными потоками во время весеннего половодья и сильных дождей летом и осенью [9]. Своеобразными воронками, «улавливающими» загрязнители и направляющими их в речные воды, служат контролируемые и неконтролируемые ливневые канализационные стоки, расположенные по всей длине городских участков Лососинки и Неглинки [10].

Для исследований проанализированы образцы проб донных отложений Лососинки и Неглинки, отобранные в ходе летних полевых работ в 2011 г. Пробы отбирали дночерпателем Экмана–Берджи по общепринятым методическим рекомендациям [11, 12]. Исследовался верхний (до 10 см) слой речных отложений, представляющий собой смесь коренных четвертичных образований и современного наносного материала. В минеральном составе донных отложений преобладают кварц, альбит, микроклин, актинолит, мусковит, диопсид, авгит, хлорит, тремолит и рихтерит. По результатам granulometric analysis установлено преобладание песчаных фракций речных отложений [13].

Просушивание образцов проводилось до воздушно-сухого состояния. Для максимальной сохранности глинистой фракции жидкая часть пробы просушивалась отдельно — в стеклянных чашках Петри, промытых дистиллированной водой. Просеивание проб выполнялось с использованием стандартного сита с размером ячеек 0,1 мм. Химический состав глинисто-алевритовой фракции речных отложений — надежный индикатор загрязненности гидроэкосистем, поскольку обусловлен процессами антропогенного характера на техногенно нарушенных территориях [5, 7, 14].

Содержание SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, TiO_2 в пробах алевритово-глинистой фракции донных отложений определялось при помощи рентген-флуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT[®]X (Thermo Fisher Scientific). Подготовка пробы к анализу включала в себя плавление образца и флюса в золото-платиновых тиглях в электроплавильной печи для приготовления образцов Katanax K1 (SPEX SamplePrep), остывание стекловатого (аморфного) расплава и изготовление из него стеклянного диска для измерений. Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 1100 °С. При исследовании донных отложений этот показатель может служить хорошей количественной характеристикой содержания органики в

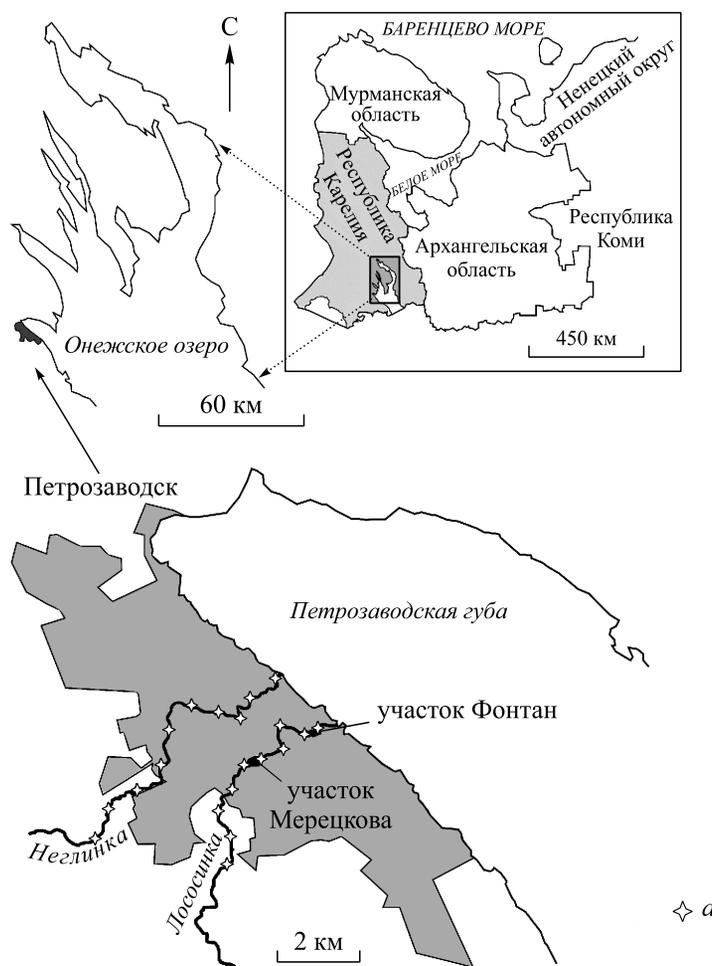


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования.

a — места отбора проб донных отложений.

водных осадках [15]. Контроль данных после прокаливания осуществлялся на термоанализаторе NETZSCH STA 449F1 (температурный максимум 1200 °С). Основной вес проба теряет в диапазоне 200–450 °С, что является следствием выгорания органических соединений в речных отложениях.

Содержание Pb, Sb, Cu, Zn, Co, Mo, Ni, Cr, Cd, Li, Rb и Cs в пробах донных отложений (фракция <0,1 мм) Лососинки и Неглинки определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (ThermoScientific). Разложение образцов выполняли путем кислотного вскрытия в открытой системе, для анализа были взяты навески массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение контрольных холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (ГСО 7126-94) — химический состав донного ила оз. Байкал БИЛ-1.

Согласно принятым в геохимических исследованиях рекомендациям, для интерпретации результатов петрохимического состава донных отложений проводился расчет гидролизатного ($Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_{общ}/SiO_2$) и органо-кремнистого (ППП/ SiO_2) модулей [16]. Корреляционный анализ Пирсона и факторный анализ методом главных компонент выполнены при помощи программ Microsoft Excel 2007 и PSPP 0.8.1 соответственно. Для графической иллюстрации результатов использованы программы EasyCapture 1.2.0 и Inkscape 0.48.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тяжелые металлы, поступающие в донные осадки с техногенно нарушенных территорий, тесно связаны с основными фазами-носителями — тонкодисперсными минеральными частицами, органическим веществом и железомарганцевыми образованиями. Кроме того, в загрязненных речных осад-

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов, Li, Rb и Cs в донных отложениях рек Петрозаводска, в верхней части земной коры и в почвенном покрове города, мг/кг

Элемент	Me	S _{Me}	x _{max}	x _{min}	Me _{фон}	Кларк литосферы [19]	Почва города [6]
Li	15,1	5,3	29,5	6,7	9,3	32,0	—
Cr	53,9	11,0	90,8	33,7	38,4	83,0	—
Co	16,1	5,3	28,1	7,5	7,5	18,0	7,9
Ni	27,9	7,4	43,2	13,3	16,4	58,0	—
Cu	57,0	34,2	178,2	12,4	12,5	47,0	36,5
Zn	133,8	69,5	354,4	43,2	37,3	83,0	84,8
Mo	0,9	0,4	5,3	0,0	0,4	1,1	—
Cd	4,6	2,1	28,7	1,7	4,2	0,1	1,4
Sb	1,0	0,8	3,8	0,1	0,1	0,5	0,8
W	2,3	2,1	20,7	0,1	0,3	1,3	1,0
Pb	25,8	12,2	101,4	10,6	13,1	16,0	25,4
Rb	52,5	8,5	75,3	30,1	47,1	150,0	—
Cs	1,2	0,4	1,9	0,5	1,0	3,7	—

Примечание. Me — медиана, S_{Me} — стандартное отклонение медианы, x_{max} и x_{min} — максимальное и минимальное значения в выборке, Me_{фон} — медианное значение для пригородных участков рек. Прочерк — нет данных.

как все указанные носители ТМ образуют целостную систему [17], что приводит к единству тесноты корреляционных связей валовых концентраций металлополлютантов как с органическим веществом донных отложений, так и с содержанием в них железа и(или) марганца [13]. Это первый тезис, подтверждение которого может указывать на техногенное происхождение ТМ в отложениях рек, озер и других водных объектов на урбанизированных территориях. Вторым подтверждением техногенного статуса ТМ в различных средах (в том числе в водных объектах) может служить биоиндикация и ее многочисленные методы, использующие как количественные (численность, биомасса), так и качественные (определение видового состава) характеристики живых организмов [18].

Накопление ТМ в донных отложениях рек Петрозаводска происходит преимущественно за счет поверхностного стока с загрязненной урбанизированной территории, что обуславливает превышение медианных концентраций поллютантов в отложениях городских водотоков над средним содержанием металлов в почвенном покрове [6] (табл. 1). Фоновые концентрации ТМ в донных отложениях Лососинки и Неглинки, наоборот, ниже по всем изучаемым химическим элементам, кроме кадмия. В речных отложениях городских участков водотоков концентрации таких ТМ, как Cu (медиана 57 мг/кг), Zn (133,8), Cd (4,6), Sb (1,0), W (2,3) и Pb (25,8), превышают также кларковые содержания этих металлов в твердой части земной коры (по Виноградову, 1962) [19]. Концентрации остальных элементов (Li, Cr, Co, Ni, Mo, Rb, Cs) из-за своей распространенности в горных породах оказались ниже кларков.

Наибольшей аккумуляцией (с коэффициентами концентрации >1,5) в донных отложениях на урбанизированной территории относительно фона характеризуются W, Sb, Cu, Zn, Co, Mo, Pb, Ni и Li (рис. 2). Результаты сравнения выборок (город/фон) по критерию Манна–Уитни также свиде-

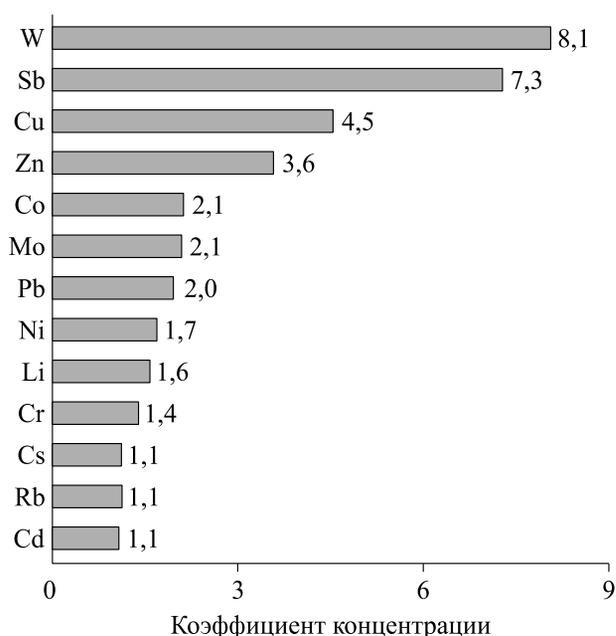


Рис. 2. Значения коэффициентов концентрации тяжелых металлов, Li, Rb и Cs в донных отложениях городских участков рек Лососинки и Неглинки относительно фона.

Корреляционные связи между концентрациями тяжелых металлов, Li, Rb и Cs в донных отложениях городских участков рек Петрозаводска (N = 95)

Элемент	Li	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Sb	W	Pb	Rb
Cr	0,426	1,000										
Co	0,717	0,440	1,000									
Ni	0,802	0,600	0,904	1,000								
Cu	0,511	0,461	0,817	0,857	1,000							
Zn	0,720	0,408	0,832	0,872	0,853	1,000						
Mo	0,400	0,354	0,538	0,593	0,654	0,565	1,000					
Cd	-0,449	0,381	-0,270	-0,299	-0,182	-0,310	-0,173	1,000				
Sb	0,473	0,333	0,611	0,689	0,784	0,769	0,518	-0,211	1,000			
W	0,348	0,419	0,577	0,645	0,789	0,637	0,481	-0,137	0,708	1,000		
Pb	0,464	0,432	0,472	0,620	0,625	0,684	0,397	-0,152	0,708	0,411	1,000	
Rb	0,846	0,521	0,614	0,753	0,444	0,534	0,414	-0,411	0,350	0,371	0,309	1,000
Cs	0,756	0,565	0,705	0,863	0,724	0,761	0,571	-0,339	0,609	0,571	0,605	0,731

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее высокие коэффициенты корреляции ($R > 0,700$), $R_{крит} = 0,267$ (при $p < 0,01$).

тельствуют о более высоком, чем в условно чистых отложениях пригородных участков Лососинки и Неглинки, уровне содержания указанных элементов в донных отложениях в черте Петрозаводска. Лишь по цезию и кадмию установлено незначимое различие выборок концентраций химических элементов ($U_{эмп} > U_{кр}$ при $p \leq 0,01$). Остальные элементы выстраиваются в общий ряд по возрастанию рассчитанных значений U-критерия и, соответственно, уменьшению степени различия выборок следующим образом: Zn ($U_{эмп} = 7$) < Cu (37) < W (56) < Co (62) < Ni (71) < Pb (86,5) < Sb (103) < Li (117) < Cr (127) < Mo (134,5) < Rb (310) ($U_{кр} = 343$ при $p \leq 0,01$).

Корреляционный анализ показал статистически значимый положительный уровень тесноты связей между всеми изученными микроэлементами в донных отложениях рек Петрозаводска при уровне надежности 99 % (табл. 2). Исключение составил кадмий, который является антагонистом всех металлов, кроме хрома. Кадмий, имеющий первостепенное значение при экологических исследованиях из-за своих токсических для живых организмов свойств, имеет преимущественно природное происхождение в донных отложениях петрозаводских рек [20]. В качестве одного из элементов-примесей он входит в структуру гидротермальных цирконов рудных амфиболитов на севере Карелии (от 74 до 600 мг/кг веса минерального зерна) [21]. В речных отложениях Петрозаводска отмечается высокая положительная корреляционная связь кадмия с цирконием, а также с гафнием и редкоземельными элементами — обычными примесями цирконов [20], что служит подтверждением указанного выше тезиса о геогенном происхождении кадмия.

Интерпретация результатов факторного анализа сводится к выявлению сильного техногенного влияния (факторы 1 и 2) на формирование микроэлементного состава донных отложений рек Петрозаводска (табл. 3). При этом отмечено четкое дифференцирование элементов: Co, Cu, Zn, Mo, Sb, W и Pb тяготеют к фактору 1, связанному с поступлением перечисленных металлов в водные экосистемы в качестве загрязнителей, а Li, Rb, Cs — к фактору 2, объединяющему эти литофилы ввиду их высокого потенциала миграционной активности в геологических средах [15]. Никель имеет примерно

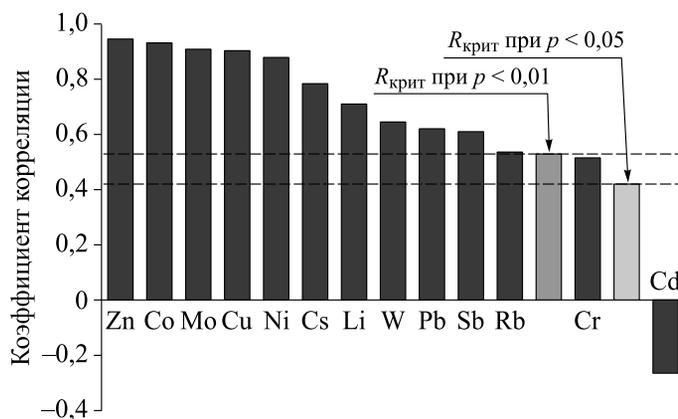
Таблица 3

Факторная модель содержания тяжелых металлов, Li, Rb и Cs (мг/кг) в донных отложениях городских участков рек Петрозаводска (N = 95)

Элемент	Фактор		
	1	2	3
Li	0,31	0,88	-0,13
Cr	0,32	0,50	0,77
Co	0,65	0,59	-0,02
Ni	0,68	0,70	0,06
Cu	0,90	0,30	0,05
Zn	0,80	0,47	-0,08
Mo	0,62	0,29	0,03
Cd	-0,13	-0,38	0,88
Sb	0,89	0,16	-0,05
W	0,80	0,16	0,08
Pb	0,71	0,23	0,07
Rb	0,18	0,93	-0,02
Cs	0,58	0,70	0,03
Вес фактора, %	40,4	29,8	10,8

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее высокие коэффициенты корреляции для каждого элемента в ряду исследуемых факторов.

Рис. 3. Корреляция между концентрациями тяжелых металлов, Li, Rb и Cs и значениями гидролизатного модуля донных отложений рек Петрозаводска (N = 23).

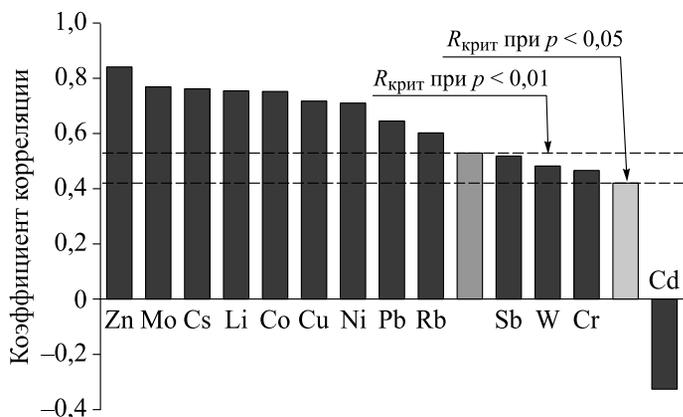


равные коэффициенты корреляции с обоими обозначенными факторами, что, вероятно, говорит о его двойственной природе в речных отложениях Петрозаводска. Фактор 3, объединяющий Cr и Cd, связан со значительным влиянием природного геохимического фона на формирование микроэлементного состава донных отложений Лососинки и Неглинки в пределах городской черты. Поведение хрома может быть связано с широким распространением на территории Карелии хромсодержащих ультраосновных пород [22, 23].

Таким образом, большинство ТМ вместе с щелочными металлами попадает в водные экосистемы извне — в результате процессов механического и химического выветривания и миграции с техногенно нарушенной территории. Данные факты подтверждаются теснотой корреляционной связи между концентрациями исследованных химических элементов и гидролизатным модулем донных отложений рек Петрозаводска (рис. 3). При этом для хрома отмечена статистически значимая положительная корреляционная связь лишь при 95%-м уровне надежности, а для кадмия — статистически незначимая отрицательная. Схожие закономерности наблюдаются при анализе корреляции содержания микроэлементов и органо-кремнистого модуля (рис. 4), что иллюстрирует единство аккумуляции изучаемых металлов в речных отложениях города. Аналогичный ряд убывания коэффициентов корреляции наблюдается при исследовании степени тесноты связи ТМ и железомарганцевых образований в загрязненных донных отложениях Лососинки и Неглинки [17]. Следовательно, к приоритетным загрязнителям гидросистем городских рек относятся Zn, Mo, Co, Cu, Ni, Pb, Sb и W, а щелочные металлы Li, Rb и Cs — их непосредственные спутники, что обусловлено химическими свойствами элементов, в частности высокой химической активностью (в ряду электрохимических потенциалов элементов Li, Rb и Cs занимают три крайние левые позиции относительно водорода со значениями ϕ^0 , В: $-3,04$, $-2,98$ и $-3,03$ соответственно [24]). В целом ряды тесноты корреляционной связи между Li, Rb и Cs и ТМ в донных отложениях имеют схожий вид (элементы выстроены по убыванию абсолютных значений коэффициентов корреляции):

- литий: Ni > Zn > Co > Cu > Sb > Pb > Cr > Mo > W > Cd;
- рубидий: Ni > Co > Zn > Cr > Cu > Mo > W > Sb > Pb > Cd;
- цезий: Ni > Zn > Cu > Co > Sb > Pb > W = Mo > Cr > Cd.

Литий, рубидий и цезий широко распространены в геологической среде. В минеральных образованиях эти химические элементы встречаются преимущественно в качестве примесей. Собственные минералы (очень редкие) образуют только Li и Cs, в то же время эти металлы имеют меньшее распространение в земной коре по сравнению с Rb, который рассматривается исключительно как рассеянный элемент.



В почвенных образованиях и донных отложениях содержание Li, Rb и Cs коррелирует с их концентрациями в материнских породах (геохимическим фоном) [25]. Отмечено, что увеличение содержания глинистых фракций в рыхлых осадочных образованиях ведет к увеличению концентраций Li, Rb и Cs. Исследования канадских

Рис. 4. Корреляция между концентрациями тяжелых металлов, Li, Rb и Cs и значениями органо-кремнистого модуля донных отложений рек Петрозаводска (N = 23).

ученых (на примере моря Баффина) показали допустимость использования такого показателя, как содержание Li в морских донных отложениях, в качестве гранулометрического индикатора, а также для нормирования концентраций ТМ [26, 27]. При этом отмечается природное происхождение Li (совместно с Rb) в океанических осадках за счет терригенного обломочно-глинистого эрозионного материала [28]. Тесная корреляционная связь между Li, Rb и Cs в донных отложениях Охотского моря ($R_{Li-Cs} = 0,76$, $R_{Rb-Cs} = 0,72$, $R_{Li-Rb} = 0,53$ (при $p < 0,05$)) подтверждает единство миграции и накопления щелочных металлов в водных экосистемах и их водосборных площадях [29]. В речных отложениях Лососинки и Неглинки также отмечен высокий уровень корреляции между концентрациями исследуемых щелочных металлов (см. табл. 2).

Описанные закономерности накопления Li, Rb и Cs характерны и для пресноводных гидроэкосистем (на примере рек РФ и США) [30–32]. Российскими исследователями установлена статистически значимая корреляционная связь между содержанием Li и некоторых ТМ в донных отложениях водохранилищ Волги [31, 33]. Однако авторы утверждают, что выявленные ими закономерности говорят о геогенной природе как Li, так и металлополлютантов в загрязненных речных осадках, поскольку не установлено никакой значимой корреляции между ТМ и основными фазами-носителями загрязнителей в изученных донных отложениях Волги. Поскольку ТМ в качестве примесей входят в состав различных минеральных образований, то при подобных эколого-геохимических исследованиях необходимо учитывать весь спектр способов определения техногенного статуса загрязнителей, попадающих в водные экосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реки Лососинка и Неглинка, протекающие по центральной части Петрозаводска, характеризуются высоким уровнем антропогенной нагрузки на протяжении всей длины их городских участков. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях заметно превышает условно фоновые концентрации и концентрации металлов в почвенном покрове водосборной площади петрозаводских рек. Наиболее загрязненными городскими участками Лососинки и Неглинки являются районы с повышенным содержанием в донных отложениях органического вещества, железомарганцевых образований и тонкодисперсных минеральных частиц — основных фаз-носителей тяжелых металлов.

Установлено, что кобальт, никель, медь, цинк, молибден, сурьма, вольфрам и свинец имеют преимущественно техногенное происхождение в речных отложениях, хром и кадмий — преимущественно природное за счет высокого фона этих элементов в четвертичном чехле территории города. Отмечено единство аккумуляции в донных отложениях приоритетных загрязнителей из числа тяжелых и щелочных металлов (лития, рубидия и цезия), высвобожденных из первичных минеральных образований благодаря процессам выветривания. Таким образом, широкое распространение лития, рубидия и цезия в природе, их высокая химическая активность и сорбционная способность позволяют использовать показатели концентрации этих элементов в качестве маркеров техногенного статуса тяжелых металлов в донных отложениях рек Петрозаводска — техногенно нарушенной (урбанизированной) территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Urban ecology: An international perspective on the interaction between humans and nature** / Eds. J. Marzluff, E. Shulenberg, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, C. Zumbunnen, U. Simon. — New York: Springer, 2008. — 808 p.
2. **Мур Дж. В., Рамамурти С.** Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 288 с.
3. **Dauvalter V., Kashulin V., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A.** Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // *Journ. of Environmental Science and Health.* Pt. A. — 2011. — N 46. — P. 1020–1033.
4. **Федорец Н. Г., Медведева М. В.** Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2005. — 96 с.
5. **Рыбаков Д. С., Слукровский З. И.** Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки // *Уч. зап. Петрозавод. ун-та.* — 2012. — № 4. — С. 67–73.
6. **Рыбаков Д. С., Крутских Н. В., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б., Слукровский З. И., Лазарева О. В., Кричевцова М. В.** Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. — СПб.: Изд-во «ЭлекСис», 2013. — 130 с.

7. **Слуковский З. И., Бубнова Т. П.** Химический состав фракции <0,1 мм отложений реки Неглинки — индикатор загрязнения городского водотока // Уч. зап. Петрозавод. ун-та. — 2013. — № 4. — С. 50–56.
8. **Новиков С. Г.** Радиальное распределение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах г. Петрозаводска на землях общего пользования // Соврем. пробл. науки и образования. — 2014. — № 1 [Электронный ресурс]. — <http://www.science-education.ru/115-12088> (дата обращения 14.02.2014).
9. **Рыжков Л. П., Горохов А. В., Марченко Л. П.** Трансформация химического состава вод реки Лососинки под воздействием природных и антропогенных факторов // Уч. зап. Петрозавод. ун-та. — 2012. — № 8, т. 1. — С. 20–24.
10. **Барышев И. А., Хренников В. В., Лузгин В. К.** Влияние городских стоков на бентосных беспозвоночных пороговых участков р. Лососинка (Карелия) // Биология внутренних вод. — 2001. — № 4. — С. 73–78.
11. **ГОСТ 17.1.5.01–80.** Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность [Электронный ресурс]. — http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/ (дата обращения 23.10.2013).
12. **Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами / Ю. Е. Саэт, Л. Н. Алексинская, Е. П. Янин.** — М.: Изд-во Ин-та минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 1982. — 74 с.
13. **Слуковский З. И.** Эколого-геохимический анализ состояния донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере города Петрозаводска): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Петрозаводск, 2014. — 24 с.
14. **Шелехова Т. С., Крутских Н. В.** Геохимические особенности и состав диатомовых комплексов донных осадков р. Шуи (Республика Карелия) // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Экол. исследования. — 2013. — № 6. — С. 76–90.
15. **Даувальтер В. А.** Геоэкология донных отложений озер. — Мурманск: Изд-во Мурман. техн. ун-та, 2012. — 242 с.
16. **Интерпретация геохимических данных / Ред. Е. В. Скляр.** — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 288 с.
17. **Förstner U.** Sediment-associated contaminants — an overview of scientific bases for developing remedial options // *Hydrobiologia*. — 1987. — Vol. 149. — P. 221–246.
18. **Ивантер Э. В., Медведев Н. В.** Экологическая токсикология природных популяций птиц и млекопитающих Севера. — М.: Наука, 2007. — 229 с.
19. **Перельман А. И.** Геохимия. — М.: Высш. шк., 1989. — 528 с.
20. **Слуковский З. И.** Происхождение кадмия в донных отложениях рек города Петрозаводска: техногенез или природа? // Геология и полезные ископаемые Карелии. — 2013. — Вып. 16. — С. 132–136.
21. **Кожевников В. Н., Земцов В. А.** Гидротермальные цирконы из рудных амфиболитов массива Травяная губа, Северная Карелия // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Геология докембрия. — 2014. — № 1. — С. 76–89.
22. **Ивашенко В. И., Ромашкин А. Е.** Минералогия и вопросы генезиса Климовского комплексного благородно-металльного проявления (Беломорский подвижный пояс) // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Геология докембрия. — 2012. — № 3. — С. 65–77.
23. **Рыбникова З. П., Светов С. А.** Геохимия аксессуарных хромитов мезоархейских коматиитов Центральной Карелии (на примере Совдозерской структуры) // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Геология докембрия. — 2014. — № 1. — С. 158–166.
24. **Химия:** Энциклопедия / Под ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Бол. Рос. энциклопедия, 2003. — 972 с.
25. **Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B.** Trace elements from soil to human. — Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. — 550 p.
26. **Loring D. H.** Lithium — a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // *Marine Chemistry*. — 1990. — Vol. 29. — P. 155–168.
27. **Yeats P. A., Milligan T. G., Sutherland T. F., Robinson S. M. C., Smith J. A., Lawton P., Levings C. D.** Lithium-normalized zinc and copper concentrations in sediments as measures of trace metal enrichment due to Salmon Aquaculture // *The Handbook of Environmental Chemistry*. — 2005. — Vol. 5, Pt. M. — P. 207–220.
28. **Блохин М. Г.** Литий и рубидий в компонентах экосистемы залива Петра Великого: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток, 2007. — 15 с.
29. **Саттарова В. В., Астахов А. С., Колесник О. Н.** Геохимические особенности поверхностного слоя донных отложений впадины Дерюгина Охотского моря // Геохимия. — 2013. — № 6. — С. 529–540.
30. **Sreekumaran C., Pillai K. C., Folsom T. R.** The concentrations of lithium, potassium, rubidium and cesium in some western American rivers and marine sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1968. — Vol. 32. — P. 1229–1234.
31. **Гапеева М. В., Законнов В. В., Гапеев А. А.** Локализация и распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // *Вод. ресурсы*. — 1997. — Т. 24, № 2. — С. 174–180.
32. **Асадулин Э. Э., Мирошников А. Ю., Величкий В. И.** Геохимическая специализация донных осадков в зонах смешения вод Оби и Енисея с водами Карского моря // Геохимия. — 2013. — № 12. — С. 1116–1129.
33. **Долотов А. В., Гапеева М. В.** Оценка загрязнения тяжелыми металлами водоемов питьевого назначения (на примере Увдовского водохранилища) // *Экология человека*. — 2009. — № 1. — С. 15–19.

Поступила в редакцию 15 декабря 2014 г.