

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ СРЕДАХ ГОРОДОВ КАРЕЛИИ

© 2020 г. А. В. Горбунов, Б. В. Ермолаев, С. М. Ляпунов, О.И. Окина,  
\*М. В. Фронтасьева, \*С. С. Павлов

ФГБУН «Геологический институт Российской академии наук», г. Москва;  
\*Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ, г. Дубна

*Цель работы* – изучение распределения макро- и микроэлементов в основных урбанизированных средах городов Карелии. *Методы.* Произведен отбор образцов почв, растительности, воды поверхностных водотоков, донных отложений и представителей биоты (рыбы) восьми городов республики. Всего было отобрано около 300 образцов. Анализ отобранного материала проводился с помощью инструментального нейтронного активационного анализа (ИНАА), рентгеноспектрального анализа (РФА), атомной абсорбционной спектроскопии (ААС) с «холодным паром» и масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (ИСП-МС). На основании этого анализа были определены концентрации 32 химических элементов в почве, листьях березы, донных отложениях, воде и представителях биоты (рыбы). *Результаты.* Определен характер распределения макро- и микроэлементов в почве и растительности этих городов, построены геохимические профили распределения элементов в почвах и растительности. Показано, что значения концентрации тяжелых и токсичных металлов в исследованных образцах воды и донных отложений близки к фоновым. Оценена концентрация тяжелых и токсичных металлов в мышцах основных видов рыб; обнаружена высокая концентрация ртути в мышцах рыб-хищников ( $CHg = 0,2 \div 0,3$  мкг/кг). *Выводы.* Уровни суммарного накопления тяжелых и токсичных металлов в почве Петрозаводска относятся к категории опасных ( $Zc = 56$ ), а загрязнение почв городов Питкяранты, Сортавалы и Суоярви – умеренно опасных ( $Zc = 15-31$ ). Обнаружена высокая степень взаимосвязи между концентрациями элементов в почве и в листьях березы. Вода в Ладожском, Онежском озере и озере Суоярви в отношении концентрации представленных в статье элементов отвечает нормативам Российской Федерации для питьевой воды.

**Ключевые слова:** почва, растительность, вода, донные отложения, биота, макро- и микроэлементы, ИНАА, РФА, ИСП-МС

## MACRO- AND MICROELEMENTS DISTRIBUTION IN URBANIZED ECOSYSTEMS OF KARELIA

A. V. Gorbunov, S. M. Lyapunov, B. V. Ermolaev, O. I. Okina, \*M. V. Frontas'eva, \*S. S. Pavlov

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow; \*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*The aim* was to study the distribution of macro-and microelements in the main urban ecosystems of Karelia. *Methods.* Samples of soil, vegetation, surface water, sediments and biota (fish) were taken. In total, 300 samples were collected. The analysis of the material was carried out using epithermal instrumental neutron activation analysis (INAA), x-ray spectral analysis (XRF), and atomic absorption spectrometry (AAS) with "cold steam" and inductively coupled plasma spectrometry (ICP-MS). Concentration of 32 chemical elements in soil, birch leaves, sediments, water and biota (fish) was determined. *Results.* The distribution of macro- and microelements in soil and vegetation of these main cities of Karelia was determined. Geochemical profiles of distribution of elements in soils and vegetation were constructed. Concentration of heavy and toxic metals in the samples of water and sediments was close to the background values. High concentration of mercury in the muscles of predatory fish was found ( $CHg = 0.2 \div 0.3$  mcg/kg). *Conclusions.* The levels of total accumulation of heavy and toxic metals in the soil of Petrozavodsk are classified as hazardous ( $Zc = 56$ ), and soil pollution in Pitkyaranta, Sortavala and Suoyarvi is considered moderately dangerous ( $Zc = 15-31$ ). A high degree of correlation between the concentration of elements in the soil and birch leaves was found. The water in lake Ladoga, lake Onega, and lake Suoyarvi in terms of the concentration of the elements presented in the article meets the Russian standards for drinking water.

**Key words:** soil, vegetation, water, bottom sediments, biota, macro - and microelements, ENAA, XRF, ICP-MS

### Библиографическая ссылка:

Горбунов А. В., Ермолаев Б. В., Ляпунов С. М., Окина О. И., Фронтасьева М. В., Павлов С. С. Особенности распределения макро- и микроэлементов в урбанизированных средах городов Карелии // Экология человека. 2020. № 6. С. 4–14.

### For citing:

Gorbunov A. V., Lyapunov S. M., Ermolaev B. V., Okina O. I., Frontas'eva M. V., Pavlov S. S. Macro- and Microelements Distribution in Urbanized Ecosystems of Karelia. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2020, 8, pp. 4-14.

Считается, что Республика Карелия является одним из немногих регионов России, где природная среда находится в достаточно хорошем состоянии. Относительно небольшое количество промышленных предприятий и низкая плотность населения оказывают незначительную нагрузку на городскую и природную среду. Следует отметить, что в республике работа-

ют 143 крупных и более 3 000 малых предприятий. Основными отраслями в экономике республики являются лесозаготовительная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленность и отрасли, основанные на добыче и переработке минеральных ресурсов. На их долю приходится около 10 % добываемой в России железной руды, 23 %

производимой бумаги, более 9 % целлюлозы, 4 % деловой древесины. В Карелии 175 месторождений 24 видов полезных ископаемых. Разрабатываются месторождения железной руды, титана, ванадия, молибдена, хрома, марганца, никеля. Основные промышленные центры: Петрозаводск, Кондопога, Костомукша, Медвежьегорск, Питкяранта, Олонец, Суоярви. Географическое положение и специфика ландшафта делают природу республики особенно чувствительной к техногенным нагрузкам. Очевидно, что удаленное расположение Карелии от больших промышленных центров не может гарантировать высокую защищенность природной среды от различного рода антропогенных воздействий. Это расположение лишь означает, что характер возникающих в этом случае экологических проблем будет несколько иным, чем в других регионах. Влияние на природную среду Карелии в основном связано с развитием энергоемкой лесной и металлургической промышленности, а также с холодным климатом, требующим сжигания большого количества различных теплоносителей (уголь, мазут, газ, торф).

В Республике Карелия проводится ежегодный мониторинг состояния окружающей среды. Результаты этих исследований публикуются в виде Государственных докладов. Согласно данным, приведенным в «Государственных докладах о состоянии окружающей среды Республики Карелия» [8, 9] экологические проблемы на территории республики практически отсутствуют. Тем не менее анализ существующих литературных источников показал, что, например, концентрация ртути [4, 16] в почве городов северного побережья Ладожского озера — Питкяранте и Сортавале — в 3–4 раза превышает фоновые значения. Особенно это касается Петрозаводска, где в среднем концентрация ртути в почве в 20 раз превышает фоновые значения. Кроме того, зафиксированы превышения ПДК отдельных компонентов в различных урбанизированных средах, приведены факты высокой концентрации сурьмы в почве Питкяранты, хрома и цинка в донных отложениях Онежского озера. Аналогичные проблемы с загрязнением окружающей среды возникают и на территории соседних стран — Финляндии и Норвегии [19–22], но там это преимущественно связано с транспортными потоками и газовыми выбросами. С учетом вышеизложенного изучение особенностей распределения широкого круга химических элементов — загрязнителей в основных природных средах городов Карелии — является актуальным и необходимым. Целью настоящей работы была оценка уровней концентрации и особенностей распределения макро- и микроэлементов в депонирующих и транспортирующих средах городов Карелии.

## Методы

### Отбор образцов

К основным транспортирующим и депонирующим природным средам относятся атмосфера, водные потки, почва, донные отложения и биота. Отбор об-

разцов этих сред проводился на территории восьми городов Карелии: Олонца, Питкяранты, Сортавалы, Суоярви, Петрозаводска, Медвежьегорска, Пиндушей и Повенца. В качестве индикаторов загрязнения атмосферного воздуха использовались листья березы повислой (*Betula pendula*). В Ладожском и Онежском озерах производился вылов рыбы: окуня, судака, щуки и леща.

**Почва.** В городах и поселках образцы почвы отбирались из расчета один образец на 1 км<sup>2</sup> площади города [10] (в Петрозаводске образцы отбирались на набережной и в центральной части города). Пробы отбирались пластиковым инструментом на площадке 5×5 м с глубины 5–10 см методом конверта. Объединенную пробу составляли путем смешивания пяти точечных проб, отобранных на одной площадке. Масса объединенной пробы составляла 0,8–1,0 кг [7, 10]. Пробы высушивали при комнатной температуре и ситовали до крупности зерна 1 мм. Истирания образцов не проводилось.

**Растительность.** Одновременно с отбором проб почвы на тех же площадках отбирали образцы растительности: листья березы с ветвей, расположенных на высоте 1,7–2,0 м от поверхности земли. Отмывания образцов не проводили. Пробы высушивали при температуре 20 °С до постоянного веса и измельчали. Масса образцов в воздушно-сухом состоянии составляла 15–20 г.

**Вода, донные отложения.** Отбор проб производился в Ладожском озере, Онежском озере и озере Суоярви. При отборе проб воды и донных отложений определяли степень загрязнения металлами воды в пределах территории исследуемых городов, вблизи мест с активной антропогенной деятельностью или в местах слабого водообмена: в заливах, заводях и в затоках [5, 6]. Было отобрано по 5 точек вдоль побережья каждого из озер (всего 15 проб). Расстояние между точками отбора составляло ~ 20–40 км. Координаты точек отбора даны в табл. 4. Посуду, используемую при отборе проб, обрабатывали 10 % раствором азотной кислоты, тщательно промывали водопроводной водой, нейтрализовали 2 % раствором бикарбоната натрия и 3–4 раза промывали дистиллированной водой. Перед забором проб сосуды ополаскивали не менее трех раз отбираемой водой, пробы воды объемом не менее 200 см<sup>3</sup> отбирали в емкости из стекла. Поверхностную воду отбирали на расстоянии 2–5 м от береговой линии; там же отбирали пробы донных отложений с глубины 1,0–1,5 м. Отбор проводили в два сосуда. Для определения общей концентрации микроэлементов сразу после отбора проба воду подкисляли концентрированной азотной кислотой из расчета 3,5–4 см<sup>3</sup> концентрированной HNO<sub>3</sub> на 1 дм<sup>3</sup> пробы. При отборе проб для анализа на ртуть также проводили подкисление концентрированной HNO<sub>3</sub> с добавлением 5 % раствора марганцовокислого калия до розовой окраски пробы (4–5 см<sup>3</sup> на 1 дм<sup>3</sup> пробы).

*Рыба.* Отлов окуня, щуки, судака и леща проводили в Ладожском и Онежском озерах непосредственно участники данного проекта, частично недостаток рыбы восполнялся покупкой у местных рыбаков. Образцы отбирали в полиэтиленовые пакеты типа зип-лок, очищали от внешних загрязнений и промывали дистиллированной водой. Для длительной транспортировки образцы замораживали при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При подготовке к анализу рыбу размораживали и помещали в эмалированные кюветы, после этого вырезали с левой стороны, начиная от спинного плавника до начала ребер, вдоль тела 2–4 г скелетных мышц. Весь инструмент и стеклянную посуду мыли 5–10 % азотной кислотой и ополаскивали дистиллированной водой [18].

#### **Анализ образцов**

Образцы почвы, донных отложений и растительности высушивали при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до постоянного веса. Образцы рыбы поступали на анализ с естественным процентом влажности. Анализ микроэлементного состава отобранных образцов проводили в лаборатории Геологического института (ГИН) РАН (Москва) и Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка (ЛНФ) ОИЯИ (Дубна) с помощью эпитеплового нейтронного активационного (ИНАА), рентгеноспектрального методов (РФА), масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (ИСП-МС) и атомной абсорбционной спектрометрии (ААС) с «холодным» паром [1].

Эпитепловой инструментальный нейтронный активационный анализ (ИНАА) проводили на исследовательском реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Анализ осуществлялся с помощью спектрометров на основе детекторов из сверхчистого германия большого объема фирмы «Canberra» с энергетическим разрешением 1,3 кэВ по линии 1 332 кэВ  $\text{Co}^{60}$ . Были определены концентрации Mg, Cl, Na, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Mo, Ag, Sb, I, Cs, La, Au, Hg и Th [12].

Рентгеноспектральный анализ проводили с использованием последовательного волнового РФА спектрометра «S4 Pioneer» Bruker AXS. Обработку полученных результатов проводили с помощью пакета программ «S4 Spectra Plus». С помощью этого метода в почвах определили концентрации Ca, Mn, Ni, Cu, Zn, Rb, Ba, Pb, Th и U.

В случаях, когда требовалось определение низких содержаний элементов в растительности, биоматериалах и воде, использовалась ИСП-МС. Масс-спектрометрия осуществлялась с помощью масс-спектрометра высокого разрешения «ELEMENT-2» (Thermo Fisher Scientific).

Концентрацию ртути определяли методом ААС с «холодным» паром в лаборатории ГИН РАН. Контроль качества результатов анализа проводили с помощью анализа «холостых» проб, стандартных и контрольных образцов биологических материалов, аттестованных на содержание ртути. Предел определения концентрации ртути в образцах почвы, растительности, донных отложений и рыбы составлял

0,1 мкг/кг (ppb), для образцов воды — соответственно 0,01 мкг/л (ppb).

#### **Математическая обработка**

Коэффициент концентрации ( $K_c$ ) рассчитывался по формуле:

$$K_c = C_i / C_{\text{фон}},$$

где  $C_i$  — фактическое содержание элемента;  $C_{\text{фон}}$  — фоновое содержание элемента (заповедник «Кивач»).

Расчет суммарного коэффициента загрязнения почвы ( $Z_c$ ) [10, 13] проводился по формуле:

$$Z_c = \left( \sum_{i=1}^n K_c \right) - (n - 1),$$

где  $K_c$  — коэффициент концентрации  $i$ -го химического элемента,  $n$  — число, равное количеству элементов, входящих в геохимическую ассоциацию (в нашем случае  $n = 15$ ).

#### **Результаты**

В табл. 1 приведены данные о кислотности почвы, концентрации макро- и микроэлементов в восьми городах Карелии. Кислотность почв в городах республики изменяется от кислой ( $\text{pH} = 3,9$ ) до нейтральной или щелочной ( $\text{pH} = 6,7-7,2$ ); средние значения кислотности в основном можно считать нейтральными ( $\text{pH} = 5,5-6,1$ ), поэтому значения ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) взяты для суглинистых и глинистых почв с  $\text{pH KCl} > 5,5$  [2, 3, 10].

Превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) и ОДК тяжелых и токсичных металлов в почве вышеперечисленных городов Карелии не обнаружено. Сравнение приведенных в табл. 1 данных с аналогичными фоновыми (заповедник «Кивач») показало превышение, иногда значительное, концентрации отдельных элементов фоновыми концентрациями. В Олонце можно отметить повышенную концентрацию As, W и Pb; в Пикарянте — Cu, Zn, As, Sb, Ta, W, Hg, Pb; в Сортавале — Cu, Zn, As, Sb, W, Hg, Pb; в Суоярви — As, Sb, Hg, Pb. Наиболее загрязненной оказалась почва Петрозаводска, где зафиксированы повышенные концентрации Ni, Cu, Zn, As, Br, Sb, W, Hg, и Pb. Наиболее «чистыми» оказались почвы Медвежьегорска, Пиндушей и Повенца.

В табл. 2 приведены данные о концентрации элементов в листьях березы (*Betula pendula*) в восьми городах Карелии. Сравнение с фоновыми концентрациями (заповедник Кивач) показало, что в некоторых случаях имеется значительное превышение над фоном концентраций таких элементов, как Zn, Sb, W, Hg, и Pb в Питкяранте, Сортавале и Петрозаводске. Поскольку прямое сравнение концентраций элементов в почве и растительности представляется малопродуктивным, были рассчитаны коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) для 28 элементов.

#### **Обсуждение результатов**

На основании расчетов по приведенной выше формуле были построены биогеохимические профили

Таблица 1

Концентрация макро- и микроэлементов в почве городов Карелии Сср (Мин.–Макс.), мг/кг (ppm), воздушно-сухой вес

Элемент	Олонец n=5	Питкяранта n=5	Сортавала n=7	Суоярви n=5	Зап. «Кивач» n=5	ПДК [2, 7] (ОДК) [3, 10]
pH	6,1(5,8–6,3)	5,5(5,0–6,7)	5,5(4,8–6,6)	6,1(3,1–7,2)	4,7(4,3–5,5)	
Na, %	1,73(1,58–1,82)	1,67(1,25–1,85)	1,69(1,58–1,81)	1,96(1,28–2,39)	1,93(1,81–2,02)	
Mg, %	0,50(0,32–0,82)	0,76(0,33–1,29)	0,96(0,61–1,25)	0,48(0,17–1,01)	0,56(0,35–0,65)	
Al, %	4,69(4,12–5,09)	4,57(4,08–4,97)	5,05(4,22–5,65)	4,79(2,95–5,68)	4,65(4,39–4,77)	
Cl	119(100–136)	125(105–163)	154(119–217)	207(105–454)	110(101–122)	
K, %	1,33(1,21–4,52)	1,31(0,96–1,71)	1,27(1,12–1,14)	1,16(0,81–1,51)	1,27(1,11–1,35)	
Ca, %	0,98(0,81–1,13)	1,15(0,98–1,45)	1,42(1,22–1,66)	1,39(0,90–1,71)	1,25(1,15–1,36)	
Sc	6,84(4,5–11)	8,38(4,5–14)	9,76(5,8–12,8)	5,64(4,31–7,22)	6,2(5,93–6,45)	
Ti, %	0,24(0,11–0,36)	0,26(0,17–0,33)	0,34(0,29–0,37)	0,16(0,11–0,19)	0,22(0,15–0,28)	
V	47(26,6–74)	69(32–119)	83(53–98)	44(38–52)	64(54–69)	150
Cr	41,1(18,4–71)	56(21,3–105)	64(32–76)	38(23–48)	30(22–38)	(100)*
Mn	278(181–384)	424(203–690)	500(418–581)	673(123–1440)	324(285–356)	1500
Fe, %	1,71(1,11–2,62)	2,34(1,08–3,95)	2,62(1,53–3,33)	1,69(1,07–2,79)	1,77(1,71–1,82)	
Co	6,19(3,35–10,7)	7,67(3,54–12)	10,7(5,8–14,4)	4,96(2,51–8,1)	5,8(5,3–6,2)	5, П.Ф. (72)*
Ni	18,1(6,2–27,3)	22,8(10,1–39)	30(17–37)	13,1(4,99–17,4)	12,8(11,9–13,4)	(80)*
Cu	19(7,39–33)	53(21,8–101)	32(20,6–41)	24(6,19–36)	9,8(9,3–10,6)	3, П.Ф. (132)*
Zn	54(22–85)	299(64–584)	121(76–215)	63(12,8–127)	40(32–45)	20, П.Ф. (220)*
As	2,0(1,3–3,1)	3,51(1,78–5,6)	3,05(2,46–4,1)	2,89(0,88–5,1)	1,4(0,73–1,88)	2 (10)*
Br	2,7(2,2–3,1)	4,14(2,33–6,8)	5,55(2,91–8,3)	6,21(2,84–12,4)	2,04(1,56–2,77)	
Rb	73,8(66–91)	112(72–139)	80(72–89)	54(37–84)	46(39–52)	
Sr	220(206–235)	170(113–234)	219(192–237)	275(193–320)	221(205–236)	
Zr	164(103–233)	183(128–214)	171(132–246)	171(126–238)	165(131–198)	
Sb	0,25(0,08–0,56)	0,39(0,15–0,9)	0,45(0,18–0,74)	0,47(0,13–0,73)	0,11(0,09–0,13)	4,5
Cs	1,5(0,88–2,6)	2,67(1,45–4,4)	2,22(1,65–2,63)	1,3(0,85–2,5)	0,81(0,73–1,01)	
Ba	628(572–658)	499(347–628)	720(623–869)	556(430–738)	387(333–410)	
La	20,9(15,5–29,5)	24(15,8–32)	24,8(12,2–31,5)	15,2(7,8–24)	6,2(5,2–8,1)	
Ce	39,1(28–56)	48,3(35–65)	45(21,7–57)	33(16,6–51)	13,4(11–15,5)	
Hf	4,04(2,7–5,2)	5,02(3,5–5,8)	4,0(3,15–5,7)	4,42(3,05–7,8)	3,9(3,11–4,2)	
Ta	0,67(0,45–0,93)	1,17(0,86–1,4)	0,64(0,36–1,04)	0,46(0,29–0,85)	0,24(0,18–0,31)	
W	1,82(0,44–6,3)	5,89(1,28–19,2)	1,04(0,74–1,7)	0,85(0,34–1,25)	0,29(0,21–0,32)	
Hg, ppb	37(27–57)	81(41–180)	99(31–147)	89(52–175)	0,025(0,021–0,029)	2100
Pb	29(7,81–93)	48(17,4–122)	31(13–50)	32,8(18,4–69)	9,9(9–12,2)	32(130)*
Th	5,88(3,8–9,5)	11,1(7,6–14,4)	7,97(4,75–9,6)	4,69(2,25–10)	1,84(1,11–2,12)	
U	1,27(0,74–1,8)	3,19(2,1–4,3)	2,14(1,11–2,8)	1,48(0,62–3,72)	0,65(0,58–0,71)	
Элемент	Петрозаводск n=9	Медвежьегорск n=7	Пиндуши n=5	Повенец n=5	Зап. «Кивач» n=5	ПДК [2, 7] (ОДК) [3, 10]
pH	5,8(4,9–5,9)	5,5(4,8–6,2)	6,05(5,8–6,4)	5,6(4,9–6,5)	4,7(4,3–5,5)	
Na, %	1,14(0,59–1,57)	2,15(1,85–247)	2,41(2,29–2,46)	2,26(2,07–2,54)	1,93(1,81–2,02)	
Mg, %	0,52(0,26–0,82)	0,51(0,39–0,65)	0,44(0,39–0,49)	0,77(0,51–1,37)	0,56(0,35–0,65)	
Al, %	3,43(1,83–4,32)	5,18(5,08–5,31)	5,24(5,03–5,38)	5,44(5,21–6,07)	4,65(4,39–4,77)	
Cl	166(120–207)	158(119–192)	105(95–119)	127(105–150)	110(101–122)	
K, %	1,03(0,47–1,52)	1,47(1,19–1,73)	1,61(1,47–1,83)	1,29(1,14–1,43)	1,27(1,11–1,35)	
Ca, %	1,10(0,55–1,40)	1,36(1,08–1,69)	1,38(1,31–1,48)	1,69(1,46–2,09)	1,25(1,15–1,36)	
Sc	5,98(3,22–8,4)	5,23(3,81–7,93)	4,23(377–4,72)	5,87(4,51–8,2)	6,2(5,93–6,45)	
Ti, %	0,21(0,096–0,29)	0,16(0,13–0,21)	0,13(0,11–0,14)	0,17(0,15–0,18)	0,22(0,15–0,28)	
V	59(34–78)	39,5(25,5–57)	28,7(23,5–30,6)	38(35–47)	64(54–69)	150
Cr	42,8(29,3–62)	32,2(16,1–65)	27,6(21,7–39)	47(25–73)	30(22–38)	(100)*
Mn	415(107–684)	225(120–318)	199(182–230)	271(233–340)	324(285–356)	1500
Fe, %	2,44(1,23–3,76)	1,43(0,78–2,29)	1,12(1,01–1,24)	1,43(1,09–1,74)	1,77(1,71–1,82)	
Co	6,82(2,75–10,2)	4,56(2,24–8,3)	3,55(3,32–3,94)	4,93(3,84–7,11)	5,8(5,3–6,2)	5, П.Ф. (72)*
Ni	21,8(10,7–34)	12,2(6,53–26,7)	8,15(7,51–9,62)	10,2(7,73–12,8)	12,8(11,9–13,4)	(80)*
Cu	49(13,1–75)	10,7(3,79–27,8)	6,79(4,99–8,58)	23,3(11,2–42)	9,8(9,3–10,6)	3, П.Ф. (132)*
Zn	142(57–295)	42,6(9,8–82)	34(21–50)	38,6(19,7–89)	40(32–45)	20, П.Ф. (220)*
As	7,28(3,54–21)	2,81(0,58–7,5)	1,46(0,61–3,51)	1,16(0,92–1,53)	1,4(0,73–1,88)	2 (10)*
Br	10,3(5,4–24)	3,08(2,16–4,12)	2,46(1,98–3,04)	2,65(1,95–3,75)	2,04(1,56–2,77)	
Rb	48(17,7–71)	61(48–95)	68(57–91)	43,6(39,5–50)	46(39–52)	

Продолжение таблицы 1

Элемент	Петрозаводск n=9	Медвежьегорск n=7	Пиндуши n=5	Повенец n=5	Зап. «Кивач» n=5	ПДК [2, 7] (ОДК) [3, 10]
Sr	151(82–190)	233(200–265)	231(213–246)	2,37(210–266)	221(205–236)	
Zr	106(47–180)	131(84–184)	129(100–148)	208(96–420)	165(131–198)	
Sb	1,54(0,26–4,3)	0,38(,14–0,94)	0,17(0,04–0,32)	0,38(0,12–1,14)	0,11(0,09–0,13)	4,5
Cs	1,24(0,41–2,1)	1,15(0,72–1,66)	0,92(0,75–1,33)	0,63(0,49–0,74)	0,81(0,73–1,01)	
Ba	449(279–559)	859(349–1160)	1033(867–1180)	841(671–948)	387(333–410)	
La	12,5(4,41–22)	13,8(4,95–21,3)	14,1(12,3–16,1)	12,8(8,13–15,5)	6,2(5,2–8,1)	
Ce	25,8(10,2–45)	28,8(9,75–46)	29,5(23,3–32)	26,1(17,2–34,3)	13,4(11–15,5)	
Hf	2,47(1,22–4,15)	3,28(2,44–4,53)	3,15(2,56–3,85)	4,69(2,33–9,1)	3,9(3,11–4,2)	
Ta	0,34(0,12–0,62)	0,54(0,28–0,84)	0,32(0,26–0,44)	0,22(0,21–0,24)	0,24(0,18–0,31)	
W	2,33(0,71–4,61)	0,48(0,14–0,83)	0,36(0,15–0,74)	0,41(0,27–0,53)	0,29(0,21–0,32)	
Hg, ppb	489(97–1074)	98(27–286)	21,4(15,6–29,8)	61(16,8–107)	0,025(0,021–0,029)	2100
Pb	74(25–125)	13,1(7,81–18,4)	9,14(7,81–12,1)	14,7(9,94–17,4)	9,9(9–12,2)	32(130)*
Th	4,36(1,57–5,66)	5,73(1,78–9,81)	4,99(2,73–7,2)	3,91(2,07–6,51)	1,84(1,11–2,12)	
U	1,27(0,82–2,07)	1,44(0,62–2,84)	1,44(0,94–1,64)	0,85(0,78–0,92)	0,65(0,58–0,71)	

Примечания: П. Ф. – подвижные формы; \* – ОДК для суглинистых и глинистых почв с рН КСl >5,5.

Таблица 2

Концентрация макро- и микроэлементов в растительности городов Карелии  
Ср (Мин.–Макс.), мг/кг (ppm), воздушно-сухой вес

Элемент	Олонец n=5	Питкяранта n=5	Сортавала n=7	Суоярви n=6	Зап. «Кивач» n=5
Na	77(42–118)	359(158–547)	198(66–373)	73(39–104)	79(45–93)
Mg	3170(2546–3770)	2505(1627–3805)	2900(2329–3435)	3562(2885–4670)	2911(2105–3387)
Al	197(73–393)	612(209–946)	437(126–912)	186(91–311)	220(174–303)
Cl	223(110–296)	205(106–271)	556(192–1420)	201(91–316)	200(98–287)
K, %	1,11(0,86–1,33)	1,27(0,98–1,55)	1,07(1,03–1,17)	1,29(1,15–1,38)	1,31(1,02–1,44)
Ca, %	1,18(0,93–1,53)	1,03(0,75–1,28)	1,24(1,11–1,37)	1,37(1,24–1,63)	1,33(1,11–1,47)
Sc	0,036(0,009–0,078)	0,11(0,05–0,19)	0,082(0,022–0,18)	0,025(0,008–0,038)	0,042(0,033–0,048)
V	0,36(0,26–0,46)	1,64(1,03–2,21)	0,93(0,59–1,24)	0,24(0,07–0,38)	0,29(0,22–0,34)
Cr	0,91(0,62–1,22)	3,25(1,95–6,5)	3,51(0,87–7,22)	1,43(1,01–1,88)	0,74(0,61–0,78)
Mn	398(66–765)	434(106–1030)	296(87–738)	292(179–481)	438(385–491)
Fe	160(78–273)	420(204–685)	363(127–640)	163(85–222)	159(111–198)
Co	0,27(0,14–0,38)	0,55(0,21–1,01)	0,71(0,27–2,02)	0,31(0,09–0,74)	0,35(0,28–0,44)
Ni	2,61(1,73–3,77)	5,13(1,94–11)	5,16(2,25–7,63)	1,88(1,15–2,45)	3,49(3,02–3,66)
Cu	10(8,3–12)	21(16–25)	22(15–25)	12(7,2–18)	11(6,5–15)
Zn	271(169–421)	502(244–766)	276(170–372)	335(187–450)	273(222–301)
As	0,27(0,21–0,36)	0,74(0,58–0,87)	0,44(0,37–0,51)	0,41(0,32–0,52)	0,48(0,41–0,55)
Br	1,77(1,65–2,05)	2,71(1,92–3,35)	1,67(1,43–1,86)	2,63(2,21–2,94)	2,16(1,88–2,35)
Rb	5,64(2,54–9,7)	16,4(10,5–23)	9,62(2,64–24,2)	27,2(17,8–47)	9,2(8,1–13,2)
Sr	55(39–96)	32(27–39)	50(42–59)	76(44–145)	63(48–99)
Sb	0,023(0,005–0,046)	0,034(0,022–0,047)	0,046(0,016–0,072)	0,021(0,012–0,032)	0,036(0,021–0,045)
Cs	0,014(0,008–0,025)	0,066(0,047–0,11)	0,031(0,016–0,089)	0,045(0,014–0,13)	0,014(0,008–0,021)
Ba	85(48–110)	92(42–171)	119(41–197)	77(52–107)	94(78–105)
La	0,16(0,07–0,24)	0,65(0,27–1,11)	0,29(0,11–0,54)	0,12(0,10–0,14)	0,16(0,12–0,22)
Ce	0,44(0,38–0,51)	1,48(0,62–2,45)	0,69(0,26–1,33)	0,25(0,21–0,33)	0,42(0,32–0,48)
Hf, ppb	41(40–42)	91(27–163)	59(17–102)	24(21–31)	44(36–49)
Ta, ppb	60(21–87)	47(12–76)	60(28–110)	27(16–47)	50(33–69)
W, ppb	26(14–52)	73(29–17)	93(48–210)	16(11–29)	30(12–45)
Hg, ppb	23(16–37)	20(15–20)	18(12–22)	19(12–27)	12(9,2–15)
Pb	0,03(0,01–0,04)	0,06(0,04–0,09)	0,05(0,03–0,08)	0,03(0,01–0,05)	0,02(0,01–0,03)
Th, ppb	32(18–62)	320(120–521)	155(63–192)	33(15–55)	22(14–35)
U, ppb	8(2–17)	103(33–160)	35(19–64)	42(11–130)	5(4–8)
Элемент	Петрозаводск n=9	Медвежьегорск n=8	Пиндуши n=5	Повенец n=5	Зап. «Кивач» n=5
Na	76(52–96)	94(37–157)	98(62–139)	72(43–136)	79(45–93)
Mg	4360(2551–10500)	2940(1778–3626)	1982(1700–2484)	3033(2562–3391)	2911(2105–3387)
Al	293(148–525)	378(149–922)	283(163–455)	148(62–292)	220(174–303)
Cl	282(208–364)	258(112–461)	180(140–224)	295(125–488)	200(98–287)

Продолжение таблицы 2

Элемент	Петрозаводск n=9	Медвежьегорск n=8	Пиндуши n=5	Повенец n=5	Зап. «Кивач» n=5
K, %	1,11(0,87–1,36)	1,11(0,95–1,33)	0,92(0,77–1,05)	0,77(0,67–1,04)	1,31(1,02–1,44)
Ca, %	1,39(0,92–2,64)	1,22(1,04–1,44)	0,94(0,78–1,08)	0,98(0,58–1,45)	1,33(1,11–1,47)
Sc	0,065(0,043–0,078)	0,045(0,037–0,056)	0,031(0,02–0,044)	0,028(0,015–0,046)	0,042(0,033–0,048)
V	0,92(0,61–1,33)	0,53(0,095–1,42)	0,34(0,24–0,54)	0,24(0,09–0,44)	0,29(0,22–0,34)
Cr	1,47(1,14–1,89)	2,33(0,86–4,31)	0,91(0,66–1,11)	1,22(0,98–1,56)	0,74(0,61–0,78)
Mn	834(113–3390)	508(350–1100)	174(80–344)	361(137–533)	438(385–491)
Fe	320(260–400)	222(156–318)	145(98–199)	114(64–189)	159(111–198)
Co	0,31(0,16–0,82)	0,44(0,28–1,13)	0,14(0,08–0,19)	0,17(0,05–0,34)	0,35(0,28–0,44)
Ni	2,71(1,42–3,65)	3,31(1,46–5,32)	1,54(1,28–2,21)	2,34(1,85–2,91)	3,49(3,02–3,66)
Cu	18(10–24)	18(12–28)	12(7,5–16)	10(6,3–15)	11(6,5–15)
Zn	350(251–525)	512(323–648)	276(213–410)	286(201–380)	273(222–301)
As	0,37(0,26–0,55)	0,29(0,21–0,38)	0,15(0,09–0,31)	0,17(0,12–0,23)	0,48(0,41–0,55)
Br	1,76(1,52–2,33)	1,83(1,36–2,34)	1,55(1,15–2,35)	1,48(1,12–1,78)	2,16(1,88–2,35)
Rb	10,7(5,91–22)	25,5(17,5–41)	22,2(10,5–33)	12,2(9,81–15,4)	9,2(8,1–13,2)
Sr	31(21–40)	45,2(41–49)	36(24,3–57)	32(13,8–47)	63(48–99)
Sb	0,051(0,039–0,77)	0,022(0,010–0,038)	0,016(0,01–0,025)	0,014(0,009–0,019)	0,036(0,021–0,045)
Cs	0,012(0,01–0,015)	0,086(0,043–0,18)	0,063(0,024–0,11)	0,023(0,011–0,039)	0,014(0,008–0,021)
Ba	97(19–184)	68(39–91)	103(63–165)	100(66–152)	94(78–105)
La	0,11(0,064–0,13)	0,21(0,09–0,32)	0,21(0,15–0,27)	0,16(0,11–0,18)	0,16(0,12–0,22)
Ce	0,26(0,18–0,37)	0,48(0,71–0,65)	0,51(0,35–0,65)	0,32(0,28–0,38)	0,42(0,32–0,48)
Hf,ppb	29(23–37)	35(32–38)	29(21–39)	24(18–35)	44(36–49)
Ta,ppb	12(10–19)	11(8–13)	8(6–11)	4(2–7)	50(33–69)
W,ppb	50(30–60)	49(13–110)	28(12–41)	23(15–34)	30(12–45)
Hg,ppb	13(11–16)	20(14–29)	16(12–18)	11(9–13)	12(9,2–15)
Pb	0,05(0,02–0,08)	0,03(0,01–0,05)	0,02(0,01–0,05)	0,02(0,01–0,05)	0,02(0,01–0,03)
Th,ppb	19(15–22)	83(42–13)	84(57–14)	35(11–73)	22(14–35)
U,ppb	10(9–36)	31(15–45)	24(17–37)	16(10–23)	5(4–8)

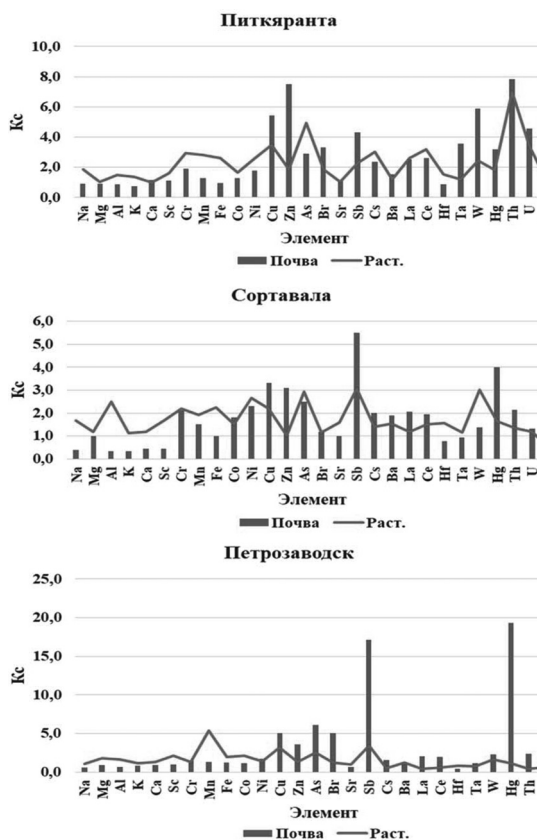


Рис. 1. Распределение элементов в почве и растительности городов Питкяранта, Sortавала и Петрозаводск

распределения элементов в почве и растительности городов Питкяранта, Sortавала и Петрозаводск (рис. 1).

Анализ приведенных на рис. 1 графиков показал, что для почвы Питкяранты характерно загрязнение ( $K_c = 5-7,5$ ) Cu, Zn, Sb, W, Th, и Pb; для Sortавалы характерно загрязнение почвы Cu, Zn, Sb, Hg ( $K_c = 3-5$ ); почва Петрозаводска загрязнена Cu, As, Br, Sb, Hg и Pb ( $K_c = 5-19$ ). Уровень загрязнения листьев березы значительно ниже (в 2-4 раза), чем почвы, но перечень загрязняющих элементов в основном повторяет почвенное загрязнение. Коэффициенты корреляции между концентрациями элементов в почве и в листьях березы для Питкяранты составляли  $r = 0,904$ ,  $p < 0,001$ , для Sortавалы  $r = 0,955$ ,  $p < 0,001$ , для Петрозаводска  $r = 0,628$ ,  $p < 0,001$ . Таким образом, показана большая степень этой зависимости (расчет проводили с помощью программы MINITAB-16). Кроме значений предельно допустимой концентрации (ПДК) для Российской Федерации нормируется значение так называемого суммарного коэффициента загрязнения почвы ( $Z_c$ ) по основным токсичным элементам [10, 13]. Так как токсичные элементы делятся на три класса опасности: 1-й класс – чрезвычайно опасные, к ним относятся Zn, As, Se, Cd, Hg и Pb; 2-й класс – высоко опасные: Co, Ni, Cr, Cu, Sb и Mo; 3-й класс – умеренно опасные: Ba, V, W, Mn, и Sr, то расчет  $Z_c$  проведен с учетом

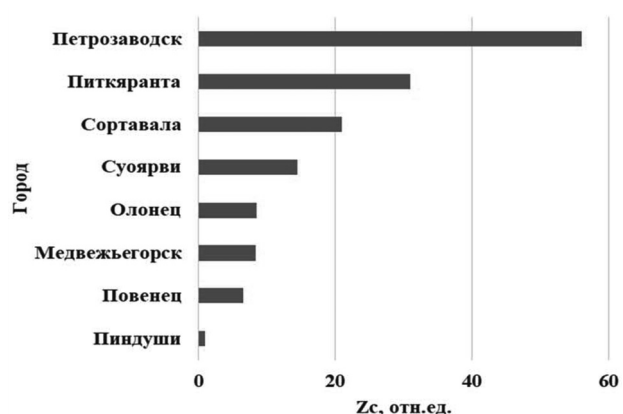


Рис. 2. Распределение суммарного коэффициента почвы (Zc) в городах Карелии

коэффициента концентрации (K<sub>c</sub>) пятнадцати элементов, относящихся к этим группам опасности: Mo, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Sb, Ba, W, Hg и Pb.

Результаты этих расчетов подтверждают, что наиболее высокие концентрации токсичных элементов по сравнению с фоновыми выявлены в почвах городов Питкяранта, Петрозаводск и Сортавала (рис. 2). В табл. 3 приведена классификация почв по степени опасности в зависимости от значения Z<sub>c</sub> [10]. В соответствии с этой классификацией загрязнение почв

городов Олонца, Медвежьегорска, Повенеца и Пиндушей находится в пределах допустимого, загрязнение почв Петрозаводска классифицируется как опасное (Z<sub>c</sub> = 56), Питкяранты, Сортавалы и Суоярви – как умеренно опасное (Z<sub>c</sub> = 15–31).

Таблица 3

Категория	Величина Z <sub>c</sub>
Допустимая	Менее 16
Умеренно опасная	16–32
Опасная	32–128
Чрезвычайно опасная	Более 128

Все восемь городов (за исключением Олонца), в которых проводилось исследование, расположены на берегах трех озер: Ладожского, Суоярви и Онежского, соответственно снабжение городов питьевой водой производится также из этих озер. В табл. 4 показаны уровень кислотности и концентрация микроэлементов в воде этих трех озер, а также значения ПДК микроэлементов в питьевой воде. Анализируя эти данные, можно сделать вывод о том, что вода в Ладожском, Онежском озерах и озере Суоярви по концентрации микроэлементов соответствует нормативам, принятым в РФ для питьевой воды [5, 14].

Таблица 4

	Ладожское озеро n=5	Озеро Суоярви n=5	Онежское озеро n=5	ПДК [14]
Коорд. точек отбора проб С.Ш./В.Д.	61.14215/32.47045	62.22967/32.30377	61.79817/34.37320	–
	61.49062/31.60484	62.10594/32.33424	62.56895/35.11337	–
	61.57126/31.45035	62.00991/32.36612	62.89031/34.45693	–
	61.69837/30.69018	62.11126/32.36990	62.89282/34.55032	–
	61.68171/30.71310	62.17124/32.41539	62.82758/34.82777	–
pH отн. ед.	6,67(5,01–7,89)	7,78(7,68–7,89)	7,35(6,33–7,91)	–
Li	1,01(0,75–1,18)	0,33(0,31–0,35)	0,81(0,58–1,13)	30
Cr	0,36(0,22–0,51)	0,37(0,32–0,40)	0,32(0,21–0,53)	50
Mn	22,3(6,97–35,4)	40(38–42)	49(22,5–84)	100
Co	0,11(0,04–0,18)	0,16(0,15–0,17)	0,11(0,031–0,24)	100
Ni	0,97(0,72–1,33)	0,46(0,39–0,57)	1,26(0,72–1,63)	100
Cu	1,36(0,85–1,7)	2,25(1,97–2,58)	2,12(1,55–3,51)	1000
Zn	5,12(4,36–6,6)	7,28(6,12–8,66)	10,1(6,53–16,1)	5000
As	0,75(0,61–0,87)	0,84(0,46–1,43)	0,43(0,23–0,52)	50
Br	12,07(8,62–14)	7,19(6,97–7,33)	11,2(9,9–13,9)	–
Rb	1,52(1,28–2,0)	0,91(0,87–0,96)	1,56(0,98–2,12)	100
Sr	38,40(11–53)	16,8(15,3–19,1)	34,4(21–61)	7000
Mo	0,14(0,08–0,25)	0,039(0,034–0,045)	0,23(0,069–0,61)	250
Cd	0,05(0,02–0,08)	0,057(0,047–0,065)	0,039(0,025–0,051)	1
Sn	0,08(0,07–0,09)	0,18(0,14–0,24)	0,16(0,14–0,16)	–
Sb	0,13(0,07–0,18)	0,44(0,22–1,01)	2,48(0,97–3,58)	50
Cs	0,03(0,02–0,04)	0,021(0,01–0,032)	<0,01	–
La	0,28(0,22–0,37)	0,66(0,48–0,99)	1,67(0,063–0,25)	–
Ce	0,46(0,38–0,59)	1,11(1,02–0,21)	0,29(0,097–0,49)	–
Hg	0,035(0,016–0,056)	0,064(0,039–0,088)	0,028(0,017–0,039)	0,5
Pb	0,44(0,25–0,62)	1,36(0,81–1,87)	0,51(0,23–0,93)	30
Th	0,05(0,03–0,09)	0,012(0,01–0,014)	0,13(0,11–0,14)	–
U	0,11(0,08–0,14)	0,046(0,035–0,063)	0,15(0,075–0,21)	–

Таблица 5

**Концентрация макро- и микроэлементов в донных отложениях трех озер Карелии**  
Ср. (Ммин.–Ммакс.) мг/кг (ppm), воздушно-сухой вес

Элемент	Ладожское озеро	Озеро Суоярви	Онежское озеро	Норматив [9]
	n=5	n=5	n=5	
Na, %	2,05(1,94–2,17)	2,25(2,06–2,41)	1,88(1,65–2,17)	–
Mg	3670(2270–5754)	2305(1369–3859)	5760(2115–7287)	–
Al, %	4,83(4,64–5,10)	4,73(4,61–4,85)	4,78(4,21–5,32)	–
S	179(134–225)	<100	938(250–2014)	–
Cl	68(39–95)	98(65–128)	111(47–245)	–
K, %	1,72(1,42–2,02)	1,31(1,11–1,52)	1,27(1,05–1,65)	–
Ca, %	0,96(0,81–1,09)	1,01(0,72–1,29)	1,53(0,88–2,29)	–
Sc	4,71(1,82–8,4)	4,53(1,46–5,91)	5,21(2,46–7,11)	–
Ti	1300(682–1800)	1449(561–2440)	1676(765–2720)	–
V	28,3(17,6–43)	25,1(15,1–37)	32,2(14,5–42)	–
Cr	22,3(8,79–44)	20,9(13,4–26,6)	78(19,5–229)	100*–380**–380***
Mn	208(156–246)	212(92–378)	288(126–446)	–
Fe, %	1,14(0,72–1,87)	0,93(0,55–1,42)	1,50(0,72–2,06)	–
Co	3,94(1,81–7,42)	2,32(0,94–3,51)	6,28(2,55–11)	–
Ni	8,46(4,2–15,3)	5,05(2,46–7,11)	19,4(7,25–46)	35–35–210
Cu	5,52(4,32–6,81)	7,73(2,11–15)	58(14,2–107)	35–35–190
Zn	25,3(22,6–29,5)	32,6(15,5–82)	744(145–1810)	140–480–720
As	1,79(0,56–3,85)	0,53(0,43–0,66)	1,18(0,62–2,21)	29–55–55
Br	1,45(1,13–1,74)	2,01(1,55–2,42)	2,64(2,11–3,26)	–
Rb	90(66–102)	45,5(38–51)	47(38–59)	–
Sr	181(159–209)	287(264–310)	246(224–306)	–
Zr	156(65–293)	157(55–258)	121(72–207)	–
Sb	0,061(0,024–0,11)	0,05(0,043–0,064)	1,23(0,45–4,6)	–
Cs	1,38(0,96–2,22)	0,54(0,39–0,63)	0,61(0,53–0,72)	–
Ba	471(365–529)	670(529–875)	1050(512–2530)	–
La	10,9(9,21–13,2)	7,83(3,14–13,8)	9,42(8,2–12,4)	–
Ce	21(19,5–26)	15,4(6,8–26,6)	19,1(14,5–27)	–
Hf	3,98(1,26–7,61)	3,67(1,59–5,92)	2,83(1,87–4,55)	–
Ta	0,45(0,34–0,62)	0,33(0,11–0,73)	0,26(0,094–0,41)	–
W	0,85(0,46–1,13)	1,21(0,48–1,62)	4,12(1,15–7,32)	–
Hg ppm	22,1(12,4–32)	18,2(16–19)	35,8(6,2–59)	300–500–10000
Pb	19(13,1–28,1)	21,5(7,66–43,6)	174(19,1–362)	85–530–530
Th	3,61(2,33–4,32)	1,56(0,98–2,37)	2,55(1,97–3,11)	–
U	0,91(0,62–1,12)	0,56(0,35–0,77)	0,73(0,53–1,04)	–

*Примечание.* \* – целевой уровень (фон); \*\* – предельно возможный уровень; \*\*\* – уровень, требующий вмешательства.

Донные осадки являются депонирующей средой, и их химический состав отражает долговременные закономерности. Эта система образована нанесением и отложением на дно водоемов разных веществ в итоге физических, химических и биологических процессов. Оценка загрязнения донных отложений существенно затруднена тем, что для донных осадков отсутствует понятие «предельно допустимые концентрации», что связано с санитарно-токсикологической сущностью данного показателя. В настоящее время существует только один региональный норматив, который вводит такие понятия, как «целевой уровень» концентрации (аналог-фон), «предельно возможный» уровень (аналог ПДК) и уровень «требующий вмешательства» [11]. В табл. 5 приведены данные о концентрации химических элементов в донных отложениях Ладожского, Онежского озер и озера Суоярви. В качестве объекта для сравнения использованы данные по почве, отобранной в запо-

веднике «Кивач», а также нормативы, приведенные в работе [11].

К числу приоритетных загрязняющих веществ донных отложений относятся тяжелые металлы. В отличие от органических загрязняющих веществ, подвергающихся процессам разложения, металлы способны лишь к перераспределению между отдельными компонентами водных систем, они существуют в разных формах и различных степенях окисления. Анализируя данные, приведенные в табл. 5, можно отметить, что концентрация химических элементов в донных отложениях в основном находится в пределах «фоновых» значений. Наиболее загрязненными оказались донные отложения Онежского озера: для них характерно повышенное содержание S, Cr, Cu, Zn, Sb, Ba, W и Pb. Являясь составной частью грунтов, металлы попадают в организмы бентосов, а далее рыб, и в особенности хищных как вершины водной трофической цепочки. В табл. 6 приведены данные



Таблица 6

Концентрация микроэлементов в мышцах рыб Ладожского и Онежского озер («живой вес»), Спр. (Смин.–Смакс.), мг/кг (ppm)

Ладожское озеро				
Объект	Щука, n=6	Судак, n=5	Окунь, n=9	ПДК [15]
Элемент/Масса, г	662(240–2100)	1100(560–1660)	205(120–360)	
Cr	0,07(0,05–0,09)	0,049(0,047–0,055)	0,055(0,039–0,069)	1
Mn	0,29(0,14–0,41)	0,86(0,51–1,21)	0,45(0,35–0,57)	–
Fe	2,47(1,61–4,65)	4,45(1,64–7,25)	5,51(4,48–6,2)	–
Co	0,004(0,003–0,01)	0,008(0,003–0,012)	0,006(0,003–0,009)	–
Ni	0,04(0,03–0,06)	0,051(0,034–0,067)	0,046(0,038–0,06)	–
Cu	0,36(0,26–0,56)	0,42(0,29–0,55)	0,41(0,33–0,51)	10
Zn	11,1(6,50–17,75)	6,27(5,55–6,98)	8,34(6,91–9,81)	40
As	0,06(0,04–0,10)	0,065(0,062–0,068)	0,036(0,028–0,046)	1
Se	0,16(0,13–0,21)	0,23(0,21–0,24)	0,25(0,23–0,29)	–
Br	2,24(1,15–3,32)	1,93(1,54–2,33)	2,11(1,95–2,22)	–
Rb	10,43(9,06–11,93)	7,82(2,86–12,8)	11,3(9,5–13,1)	–
Mo	0,02(0,01–0,02)	0,02(0,01–0,03)	0,02(0,01–0,03)	–
Sr	3,18(1,44–7,67)	3,24(1,3–5,18)	1,48(1,11–2,02)	–
Cd	0,01(0,00–0,01)	0,007(0,005–0,011)	0,008(0,005–0,011)	0
Sn	<0,005	<0,005	0,012(0,009–0,018)	–
Cs	0,04(0,02–0,05)	0,024(0,006–0,043)	0,022(0,011–0,029)	
Hg	0,33(0,23–0,49)	0,197(0,06–0,334)	0,23(0,12–0,31)	0,3–0,6
Pb	<0,05	0,099(0,058–0,14)	0,067(0,043–0,085)	1
Онежское озеро				
Объект	Щука, n=8	Судак, n=5	Окунь, n=10	ПДК [15]
Эл–т/Масса, г	410(230–960)	425(360–673)	155(82–332)	
Cr	0,086(0,068–0,096)	0,061(0,045–0,072)	0,055(0,042–0,065)	1
Mn	0,31(0,14–0,63)	0,330(0,21–0,33)	0,44(0,22–0,55)	–
Fe	3,02(1,73–5,6)	4,167(3,2–5,5)	4,58(3,84–5,42)	–
Co	0,004(0,003–0,008)	0,005(0,006–0,005)	0,006(0,003–0,011)	–
Ni	0,051(0,031–0,062)	0,033(0,04–0,03)	0,039(0,03–0,047)	–
Cu	0,42(0,31–0,56)	0,353(0,43–0,35)	0,43(0,31–0,49)	10
Zn	10,5(6,5–18,3)	8,600(8,20–10,30)	8,77(7,21–11)	40
As	0,075(0,063–0,11)	0,036(0,032–0,041)	0,034(0,03–0,042)	1
Se	0,17(0,13–0,26)	0,22(0,18–0,25)	0,24(0,21–0,26)	–
Br	3,12(2,87–3,35)	2,18(1,22–3,13)	2,72(2,33–3,18)	–
Rb	11,2(10,4–11,9)	10,920(13,00–12,20)	10,9(8,21–12,3)	–
Mo	0,026(0,024–0,028)	0,013(0,012–0,016)	0,019(0,013–0,025)	–
Sr	3,31(1,44–6,51)	1,33(1,32–1,21)	1,42(1,02–1,96)	–
Cd	0,006(0,004–0,008)	0,008(0,011–0,005)	0,007(0,006–0,008)	0
Sn	<0,005	0,006(0,005–0,007)	0,011(0,007–0,013)	–
Cs	0,03(0,019–0,045)	0,023(0,025–0,030)	0,022(0,014–0,03)	
Hg	0,38(0,21–0,54)	0,37(0,31–0,43)	0,22(0,11–0,29)	0,3–0,6
Pb	0,15(0,12–0,18)	0,056(0,055–0,053)	0,065(0,047–0,074)	1

о концентрации тяжелых и токсичных металлов в мышцах щуки, судака и окуня, выловленных в Ладожском и Онежском озерах.

Сравнение данных, приведенных в табл. 6, со значениями ПДК показало, что концентрация тяжелых и токсичных металлов в мышцах окуня, судака и щуки в обоих озерах находится в пределах принятых в РФ нормативов. При этом следует обратить внимание на достаточно высокую концентрацию ртути в мышцах щуки, судака и окуня. Ртуть и ее соединения являются высокотоксичным, кумулятивным ядом, поражающим кроветворную, ферментативную, нервную системы и почки. Ртуть относится к числу элементов, постоянно присутствующих в окружающей среде и живых орга-

низмах. В мышцах рыбы ртуть присутствует в основном (до 80 %) в метилированной форме: метилртути (метилртутный гидроксид  $\text{CH}_3\text{HgOH}$  (ММНг)) [17, 18]. Это соединение – наиболее стабильная форма метилового ртути в пресноводной среде и является самым распространенным органическим соединением ртути в пресноводных системах. Среднеарифметическая концентрация Hg в мышцах щуки, судака и окуня, показанная в табл. 6, составляет значение 0,3–0,5 от ПДК. Тем не менее, принимая во внимание возможность кумулятивного накопления Hg в организме человека, следует признать потенциальную опасность регулярного употребления этих видов рыб в рационе питания местного населения.

**Выводы**

• Суммарное загрязнение почв городов Олонца, Медвежьегорска, Повенца и Пиндушей находится в пределах допустимого. Загрязнение почв Петрозаводска классифицируется как опасное, городов Питкяранта, Сортавала и Суоярви — как умеренно опасное.

• Взаимосвязь между концентрацией элементов в почве и листьях березы (листья не отмывались от поверхностного загрязнения) следует признать высокой, что позволяет считать в данном конкретном случае листья березы косвенным индикатором загрязнения воздушной среды.

• Вода в Ладожском, Онежском озерах и озере Суоярви по концентрации микроэлементов соответствует нормативам, принятым в РФ для питьевой воды (ГОСТ, СанПин).

• В донных отложениях Онежского озера обнаружено повышенное содержание S, Cr, Cu, Zn, Sb, Ba, W и Pb. Пространственное распределение и уровни загрязнения донных отложений Онежского озера этими элементами нуждаются в дальнейшем изучении.

• Концентрация тяжелых и токсичных металлов в мышцах окуня, судака и щуки в Ладожском и Онежском озерах находятся в пределах ПДК, принятых в РФ. Тем не менее следует признать потенциальную опасность регулярного употребления этих видов рыб в рационе питания местного населения.

*Работа выполнена в рамках совместных исследований Геологического института РАН (г. Москва) и Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ (г. Дубна).*

**Благодарности**

Авторы выражают свою глубокую благодарность коллегам и друзьям, оказавшим неоценимую помощь в проведении данной работы: Г. А. Грановской и Н. А. Чугунову. Отдельно свою признательность авторы выражают А. С. Духанину за предоставление базы и помощь в проведении полевых работ.

**Авторство**

Горбунов А. В. внес основной вклад в концепцию и дизайн исследования, подготовил первый вариант статьи; Ляпунов С. М. существенно переработал и окончательно утвердил присланную в редакцию рукопись; Ермолаев Б. В. внес определяющий вклад в анализ и интерпретацию данных, существенно переработал статью на предмет важного интеллектуального содержания; Окина О. И. внесла определяющий вклад в анализ и интерпретацию данных по концентрации элементов в водной среде и биоте; Фронтасьева М. В. разработала общий дизайн и отрецензировала текст статьи; Павлов С. С. произвел математическую обработку данных.

Горбунов Анатолий Викторович — ORCID 0000-0001-7794-100X; SPIN 1279-0204

Ляпунов Сергей Михайлович — ORCID 0000-0002-9532-4387; SPIN 7250-0308

Ермолаев Борис Владимирович — ORCID 0000-0001-9072-312X; SPIN 2249-0209

Окина Ольга Ильинична — ORCID 0000-0002-1947-4551; SPIN3243-7281

Фронтасьева Марина Владимировна — ORCID 0000-0003-2366-4873

**Список литературы**

1. Беклемишев М. К., Иванов В. М., Мугинова С. В., Осипова Е. А., Проскурнин М. А., Шаповалова Е. Н. Объекты окружающей среды и их аналитический контроль // Методы анализа объектов окружающей среды / под ред. Шеховцовой Т. Н. Краснодар: Арт-Офис, 2007. 380 с.

2. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 23 января 2006 г. № 1 с 1 апреля 2006 г. Роспотребнадзор 2006, М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006, С. 15.

3. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 18 мая 2009 г. N 32) М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. С. 11.

4. Горбунов А. В., Ляпунов С. М., Ермолаев Б. В. Распределение ртути в природных и урбанизированных средах Карелии // Экология человека. 2019. № 4. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-4-10-17>

5. ГОСТ Р 51592-2000. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2008. С. 48.

6. ГОСТ Р 51593-2000. Вода питьевая. Отбор проб. М.: Стандартинформ, 2008. С. 295–304.

7. ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005). Качество почвы. Отбор проб. Ч. 5. Руководство по изучению городских и промышленных участков на предмет загрязнения почвы. М.: Стандартинформ, 2009. С. 30.

8. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2015 г. / Министерство по природопользованию и экологии Республики Карелия; редкол.: А. Н. Громцев (гл. ред.) и др. Петрозаводск, 2016. 260 с. URL: <http://economy.krc.karelia.ru/publ.php?id=17566&plang=r>

9. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2017 г. / Министерство по природопользованию и экологии Республики Карелия; редкол.: А. Н. Громцев (гл. ред.) и др. Петрозаводск, 2018. 272 с.

10. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания. М.: Минздрав России, 1999. С. 11

11. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив. Санкт-Петербург, 1996, 20 с.

12. НСАМ 510-ЯФ. Определение микроэлементов в горных породах, рудах, почвах, донных отложениях, золах растений, и в твердых биологических материалах растительного и животного происхождения нейтронно-активационным методом. М., 2011. 38 с.

13. Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

14. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав России, 2002. С. 46.

15. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Минздрав России, 2002. С. 269.

16. Яшин И. М., Кузнецов П. В., Петухова А. А. Экогеохимическая оценка почв и лесопарковых фаций

Петрозаводска // Известия ТСХА. Вып. 4, 2011. С. 30–43.

17. ADDENDUM FOR ORGANIC MERCURY COMPOUNDS (Alkyl and Dialkyl Mercury Compounds) Supplement to the 1999 Toxicological Profile for Mercury // Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology and Human Health Sciences Atlanta, GA 30333, March 2013. P. 143.

18. Anatoliy V. Gorbunov, Boris V. Ermolaev, Sergey M. Lyapunov, Olga I. Okina, Sergey S. Pavlov, Marina V. Frontasyeva. Estimation of Mercury Intake from Consumption of Fish and Seafood in Russia // Food and Nutrition Sciences. 2016. Vol. 7. P. 1–8. Available at: <http://www.scirp.org/journal/ins>, doi: 10.4236/ins.2016.77053.

19. Bergback B., Johansson K., Mohlander U. Urban metal flows: a case study of Stockholm // Water Air Soil Pollution. 2001. Vol. 1. P. 3–24.

20. Hjortenkrans D., Bergbäck B., Häggerud A., Hjortenkrans D., Bergbäck B., Häggerud A. Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005 // Environmental Sciences and technologies. 2007. Vol. 41. P. 5224–5230.

21. Lokola-Ruskanoia K., Cantola M., Halonen T. et al. Mercury-haltiger Schwarzer Schiefer und menschlicher Quecksilberverbrauch in Ostfinnland // Auswirkungen und Mechanismen, Okologische Geologie. 2003. Vol. 43, N 3. P. 283–297.

22. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases // Report TKKENY-4. 2nd edition. EspooTurku, Finland, 2002. 298 p.

#### References

1. Beklemishev M. K., Ivanov V. M., Muginova S. V., Osipova E. A., Proskurnin M. A., Shapovalova E. N. *Obekty okruzhayushhej sredy i ix analiticheskij kontrol. Metody analiza obektov okruzhayushhej sredy* [Environmental Objects and their analytical control. Methods of analysis of environmental objects]. Ed. Shekhovtsova T. N. Krasnodar, Art-Office Publ., 2007, 380 p.

2. GN 2.1.7.2041-06. *Maximum permissible concentrations (MPC) chemicals in the soil*. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006, p. 15. [In Russian]

3. GN 2.1.7.2511-09. *Approximate permissible concentrations (UEC) of chemicals in soil Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor*, 2009, p. 11. [In Russian]

4. Gorbunov A. V., Lyapunov S. M., Ermolaev B. V. Distribution of Mercury in Natural and Urban Environments of Karelia, Northwest Russia. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2019, 4, pp. 10-17. Available at: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-4-10-17> [In Russian]

5. GOST R 51592-2000. *Water. General requirements for sampling*. Moscow, Standardinform, 2008, p. 48. [In Russian]

6. GOST R 51593-2000. *Drinking Water. Sampling*. Moscow, Standardinform, 2008, p. 295-304. [In Russian]

7. GOST R 53123-2008 (ISO 10381-5:2005). *Soil Quality. Sampling. Pt. 5. Guidelines for the study of urban and industrial sites for soil contamination*. Moscow, Standardinform, 2009, p. 30. [In Russian]

8. *State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2015*. Ministry of nature management and ecology of the Republic of Karelia. A. N. Gromtsev (ed.) and others. Petrozavodsk, 2016, 260 p. Available at: <http://economy.krc.karelia.ru/publ.php?id=17566&plang=r> [In Russian]

9. *State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2017*. Ministry of nature management and ecology of the Republic of Karelia. A. N. Gromtsev (editor-in-chief) and others]. Petrozavodsk, 2018, 272 p. [In Russian]

10. MU 2.1.7.730-99. *Hygienic assessment of soil quality in populated areas. Methodical instructions. Regionalnyj normativ*. Moscow, Ministry of Health of Russia, 1999, p. 11. [In Russian]

11. *Norms and criteria for assessment of contamination of bottom sediments in water bodies of St. Petersburg. The regional standard*. Saint Petersburg, 1996 r, 20 p. [In Russian]

12. NSAM 510-YAF. *Determination of trace elements in rocks, ores, soils, bottom sediments, plant ashes, and solid biological materials of plant and animal origin by neutron activation method*. Moscow, 2011, 38 p. [In Russian]

13. Saet J. E., Revich B. A., Yanin E. P. *Geoximiya okruzhayushhej sredy* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.

14. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control*. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2002, p. 46. [In Russian]

15. SanPiN 2.3.2.1078-01. *Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products*. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2002, p. 269. [In Russian]

16. Yashin I. M., Kuznetsov P. V., Petukhova A. A. Ecogeochemical assessment of soils and Park facies of Petrozavodsk. *Izvestiya TSXA* [Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy]. 2011, 4, pp. 30-43 [In Russian]

17. ADDENDUM FOR ORGANIC MERCURY COMPOUNDS (Alkyl and Dialkyl Mercury Compounds) Supplement to the 1999 Toxicological Profile for Mercury. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology and Human Health Sciences Atlanta, GA 30333, March 2013, p. 143.

18. Anatoliy V. Gorbunov, Boris V. Ermolaev, Sergey M. Lyapunov, Olga I. Okina, Sergey S. Pavlov, Marina V. Frontasyeva. Estimation of Mercury Intake from Consumption of Fish and Seafood in Russia. *Food and Nutrition Sciences*. 2016, 7, pp. 1-8, Available at: <http://www.scirp.org/journal/ins> doi: 10.4236/ins.2016.77053.

19. Bergback B., Johansson K., Mohlander U. Urban metal flows: a case study of Stockholm. *Water Air Soil Pollution*. 2001, 1, pp. 3-24.

20. Hjortenkrans D., Bergbäck B., Häggerud A., Hjortenkrans D., Bergbäck B., Häggerud A. Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. *Environmental Sciences and technologies*. 2007, 41, pp. 5224-5230.

21. Lokola-Ruskanoia K., Cantola M., Halonen T. et al. Mercury-haltiger Schwarzer Schiefer und menschlicher Quecksilberverbrauch in Ostfinnland. *Auswirkungen und Mechanismen, Okologische Geologie*. 2003, 43 (3), pp. 283-297.

22. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. *Report TKKENY-4. 2nd edition*. EspooTurku, Finland, 2002, 298 p.

#### Контактная информация:

Горбунов Анатолий Викторович – старший научный сотрудник лаборатории химико-аналитических исследований ФГБУН «Геологический институт РАН»

Адрес: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7

E-mail: anatolygor@yandex.ru