

## МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ ОЗЕР КАК ИНДИКАТОР ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)\*

© 2018 г. З.И. Слуковский

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Институт геологии, г. Петрозаводск, Россия

**Ключевые слова:** экологический риск, донные отложения, Республика Карелия, малые озера, микроэлементы, тяжелые металлы, биоиндикация, биоаккумуляция.



З.И. Слуковский

Рассмотрены общие вопросы, связанные с воздействием городской среды на состояние экосистемы водного объекта. На примере исследования микроэлементного состава донных отложений шести малых озер Республики Карелии показано значительное влияние техногенеза на возникновение экологических рисков для водной флоры и фауны урбанизированной среды. Основное внимание уделено содержанию тяжелых металлов и металлоидов в пресноводных отложениях. Установлены мощности техногенно измененных озерных отложений для водоемов городов Карелии. Согласно анализу формул геохимических ассоциаций донных отложений урбанизированных озер определены приоритетные загрязняющие вещества (Pb, Sb, Cd, V, Zn, Cu, Ni и др. элементы), с которыми связаны основные экологические риски в пределах городской среды региона. Выявлены закономерности распределения отдельных химических элементов в исследованных озерных донных отложениях в зависимости от геохимической специфики водосборной площади. Приведены примеры прямого негативного воздействия тяжелых металлов на живые организмы водной среды на примере исследования бентосных организмов и ихтиофауны.

Урбанизированная среда создает серьезные предпосылки для экологических рисков. Антропогенное влияние, оказываемое в городе на окружающую среду, приводит к ухудшению состояния биоты, вплоть до гибели отдельных видов и групп организмов. Тяжелые металлы являются одними из

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проекты 18-05-00897 «а», 16-35-00026 «мол\_а»

основных агентов негативного влияния техногенеза в пределах экосистем, затронутых урбанизацией. Регистрация экстремально высоких концентраций тяжелых металлов в почве, донных отложениях водных объектов и живых организмах городской среды иллюстрирует характер, интенсивность и диапазон воздействия тех или иных источников антропогенного воздействия, позволяя оценить экологические риски.

На территории Республики Карелии расположено 13 городов, 12 из которых относятся к категории малых с населением до 50 тыс. чел. и лишь один к категории крупных с населением свыше 250 тыс. чел. Основой экономики большинства городов Карелии являются промышленность и обслуживание автомобильных, железнодорожных и речных путей сообщения. Существенно влияние городской среды региона на экосистемы, расположенные в пределах городских территорий. Учитывая, что Карелия имеет достаточно развитую гидрографическую сеть, насчитывающую около 61 тыс. озер и 23 тыс. рек, в результате антропогенной деятельности наиболее уязвимыми природными объектами являются водоемы и водотоки урбанизированной среды. Поверхностные воды городских территорий относятся к категории вод низкого качества в связи с процессами эвтрофирования и химического загрязнения [1].

Цель работы – провести общую оценку содержания микроэлементов, в т. ч. тяжелых металлов, в донных отложениях городских озер Республики Карелии, являющихся индикаторами состояния водосборных районов и появления экологических рисков на исследуемых территориях.

#### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Состояние урбанизированной среды водного объекта исследовано на примере трех городов – Петрозаводска, Медвежьегорска и Суоярви. В каждом определено эколого-геохимическое состояние донных отложений малых озер, расположенных в пределах городских территорий. Характеристики городских территорий и водных объектов приведены в табл. 1.

Отбор проб донных отложений проводили в 2016 и 2017 гг. в зимний и летний периоды. Для анализа был выбран слой озерных осадков до 30–60 см в зависимости от конкретного водного объекта. Методика отбора и подготовки проб донных отложений к аналитическим исследованиям описана в работах [2, 3]. Оценка микроэлементного состава донных отложений проведена при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой XSeries-2 ICP-MS на базе аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН [4]. Формула геохимической ассоциации рассчитывалась согласно методическим указаниям [5]. При расчете формулы для каждого озера учитывалось содержание того или иного элемента в верхних слоях донных отложений по отношению к условно фоновым концентрациям для

определенного водоема. В работе использованы также материалы по анализу состояния водных организмов из озерных и речных экосистем урбанизированной среды Республики Карелии [6–8]. Проведенный анализ позволил установить величину экологического риска для всех изученных городских озер.

**Таблица 1.** Основные параметры изученных озер урбанизированных районов Карелии

Озеро/город	Площадь, км <sup>2</sup>	Длина (макс.), м	Ширина (средняя), м	Глубина (макс.), м
Петрозаводск (население 290 тыс. чел.)				
Четырехверстное	0,118	600	200	до 4,6
Ламба	0,017	240	70	до 5,2
Медвежьегорск (14 тыс. чел.)				
Китайское	0,120	900	200	до 14
Мыльное	0,090	460	250	до 18
Суоярви (9 тыс. чел.)				
Каймановское (южное)	0,020	360	78	до 5
Кайпинское (северное)	0,090	610	170	до 3

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что донные отложения городских малых озер Карелии относятся к сапропелям – наиболее распространенному типу пресноводных осадков региона [9]. Содержание органического вещества, оцененного по потерям при прокаливании (ППП), варьирует от 30 до 75 % сухого вещества. Необходимо учесть, что органика выступает в качестве одного из основных сорбентов тяжелых металлов, поступающих в водную среду с антропогенно нарушенной водосборной территории [10]. Кроме этого, сорбция тяжелых металлов происходит в результате взаимодействия с тонкими минеральными частицами железа и марганца [11].

Анализ содержания микроэлементов в донных отложениях изученных урбанизированных водоемов позволил оценить мощность техногенно измененного слоя осадка в каждом озере, а также рассчитать ориентировочную скорость седиментации в индустриальное время эксплуатации водных объектов. Она составляет примерно 2–5 мм/год, что несколько выше скорости седиментации в озерах территории Карелии в доиндустриальный период [12], а также скорости образования современных отложений малых озер Мурманской области, расположенных в районах активной техногенной нагрузки [10].

На территории самого крупного города Карелии – Петрозаводска, в озерах Ламба и Четырехверстное, мощность техногенно измененного слоя донных отложений составляет около 48 и 26 см соответственно. В г. Медвежьегорске на химическом составе озерных осадков техногенное влияние прослеживается до глубины 16 см (оз. Китайское) и 24 см (оз. Плотичье). На территории Соуярви – самого малочисленного из выбранных городов Карелии – техногенно измененный слой донных отложений имеет мощность 18 см (оз. Кайпинское). Нижележащие слои донных отложений следует принимать за условно чистые, содержание в них различных микроэлементов отражает фоновый уровень для изучаемых водоемов.

Согласно формулам геохимических ассоциаций донных отложений исследованных городских озер (табл. 2) приоритетным загрязняющим веществом для всех урбанизированных водоемов является Pb. Концентрации этого элемента в верхних слоях озерных отложений многократно превышают условно фоновый уровень для исследованных донных осадков (табл. 2). Наибольшие концентрации Pb установлены в отложениях оз. Ламба (г. Петрозаводск), озер Кайпинское и Каймановское (г. Соуярви) и оз. Плотичье (г. Медвежьегорск). Следует отметить, что во всех водоемах график вертикального распределения Pb имеет плавный перевернутый U-образный вид (рис. 1), что связано с активным использованием в мире в 1940–1980-е годы соединений Pb при изготовлении моторного топлива [13, 14], а также фактором трансграничного атмосферного переноса этого элемента, что многократно отмечалось при изучении малых водоемов севера России и сопредельных стран [15, 16].

Отказ от Pb-содержащего топлива и снижение темпов промышленного производства в странах Западной Европы и России отразились на тенденции небольшого снижения концентраций Pb в самых верхних слоях донных отложений. Однако фоновый уровень Pb для изученных осадков (до 3,9 мг/кг) пока недостижим по причине высокого уровня накопления этого загрязняющего вещества в почвенном покрове урбанизированной среды [17].

При анализе химического состава донных отложений городских озер Карелии следует выделить повышенный уровень концентраций Sb, известной своими токсичными свойствами по отношению к живым организмам. Наибольшее превышение содержания этого металла над фоновым уровнем установлено для оз. Каймановское (табл. 2). Кроме того, отмечается тесная связь между концентрациями Pb и Sb во всех техногенно измененных донных отложениях малых водоемов (рис. 2), что, вероятно, связано с содержанием Sb в пылевых выбросах, с которыми в водную среду региона поступал Pb. Известны повышенные концентрации Sb, а также Pb, Cd, Tl, Hg в ископаемых углях, используемых в качестве топлива в промышленности [18, 19].

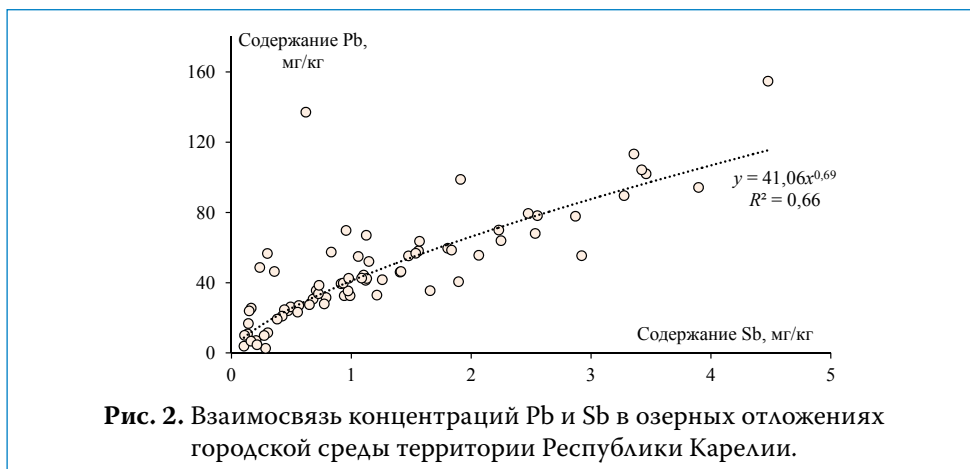
**Таблица 2.** Геохимические ассоциации в техногенно измененных донных отложениях водоемов урбанизированной среды Республики Карелии

Озеро	Формула геохимической ассоциации донных отложений		
	$K_c \geq 10$	$10 > K_c \geq 3$	$3 > K_c \geq 1,5$
Ламба	$Pb_{21,1} - Sn_{16,9} - V_{16,6}$	$Sb_{8,4} - Bi_{5,6} - Ni_{4,5} - Zn_{4,4} - (Rb - Cu)_{4,3} - Ti_{3,7} - Cs_{3,6} - Ga_{3,3} - (Ag - Li)_{3,1} - W_{3,0}$	$Nb_{2,8} - Zr_{2,6} - (Cd - Rb)_{2,5} - (Mo - Ta - Tl)_{2,4} - Cr_{2,2} - Sr_{2,1} - Co_{2,0} - (Hf - Sc)_{1,9} - Ba_{1,7}$
Четырех-верстное	–	$Pb_{5,7} - Sb_{4,3} - Sn_{3,5}$	$(As - Mn)_{2,9} - W_{2,5} - (Rb - Ti)_{2,2} - (Ga - Li - Zn)_{2,1} - (Co - Cr - Cs - Nb - Ta)_{2,0} - (Sr - V)_{1,8} - Tl_{1,7} - Bi_{1,6} - Cu_{1,5}$
Плотичье	$Pb_{10,2}$	$Sb_{9,8} - Zn_{7,5} - Sn_{6,6} - Cu_{6,2} - P_{6,0} - Cd_{3,4}$	$Co_{2,9} - (Bi - V)_{2,7} - Cs_{2,6} - (Mn - Ni)_{2,2} - (As - Cr - Tl)_{2,0} - (Nb - Th)_{1,7} - Ga_{1,6} - Ta_{1,5}$
Китайское	–	$Pb_{6,4} - (Cd - Sb)_{4,5} - Zn_{3,3} - (Bi - Sn)_{3,0}$	$(Mn - P)_{2,6} - (Ta - Tl - U)_{2,0} - Rb_{1,8} - (Ga - Li - V)_{1,7} - (Ba - Nb - Cs)_{1,6} - Be_{1,5}$
Кайпинское (северное)	$Pb_{17,7}$	$Sb_{9,8} - Sn_{5,9} - Cd_{4,2} - Ag_{3,9} - (As - Ba)_{3,6} - Li_{3,5} - Rb_{3,2} - (Co - Ti)_{3,1} - Zr_{3,0}$	$(Sr - V)_{2,9} - (Zn - Cs)_{2,8} - (Bi - Hf)_{2,7} - (Nb - P)_{2,6} - Ga_{2,4} - (Cu - Tl - U)_{2,3} - (Be - W)_{2,2} - Th_{2,1} - (Cr - Ta)_{1,9} - Mn_{1,8} - Ni_{1,6} - Sc_{1,5}$
Каймановское (южное)	$Sb_{19,1} - Pb_{18,4}$	$As_{5,4} - Sn_{4,6} - Zr_{4,3} - (Cu - Hf)_{4,1} - Bi_{3,9} - Li_{3,8} - Rb_{3,7} - (Nb - Ti - Tl)_{3,6} - Ba_{3,5} - (Cs - U)_{3,4} - (Cd - Ga)_{3,3} - (Mo - Ta - Th - V)_{3,0}$	$(Be - Co)_{2,8} - Cr_{2,7} - W_{2,6} - Ag_{2,3} - Sr_{2,2} - Zn_{2,0} - Sc_{1,9} - P_{1,6}$

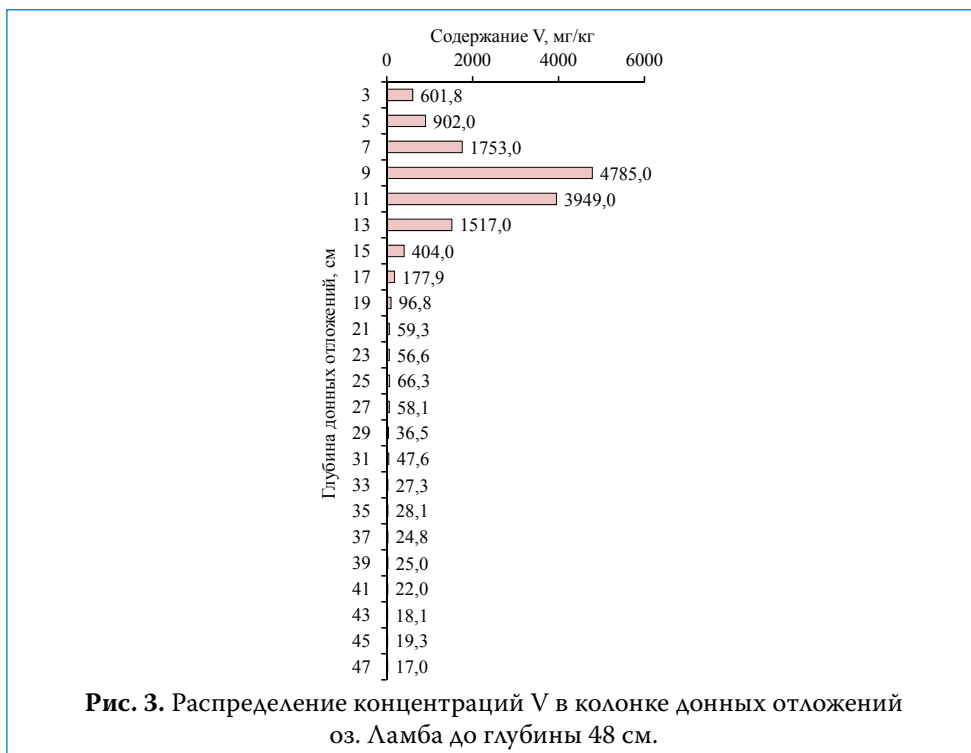
Примечание:  $K_c$  – коэффициент концентрации; нижние индексы – величины коэффициентов концентрации для отдельно взятого элемента.

Повышенные концентрации Cd также отмечены в донных отложениях почти всех исследованных водных объектов (табл. 2). При этом его происхождение может быть связано как с техногенными выбросами [10], так и с повышенным природным фоном этого металла в четвертичных отложениях Карелии [20].

Одним из главных загрязнителей оз. Ламба является V (табл. 2), чье поступление в водную среду связано с деятельностью Петрозаводской теплоцентрали, использующей до сих пор в качестве топлива мазут [21]. Переход на природный газ в начале 2000-х годов отразился на распределении V и сопутствующих ему микроэлементов в разрезе современных отложений оз. Ламба [4]: в результате отказа от использования мазута содержание V за



15 лет снизилось в 8 раз относительно пика концентрации этого элемента в слое 8–10 см донных отложений оз. Ламба (рис. 3). В озерных осадках остальных изученных водных объектов V не является приоритетным загрязняющим веществом, а небольшие превышения над фоновым уровнем могут быть связаны с распространением V-содержащих руд на территории Республики Карелии [22] или небольшими локальными техногенными источниками.



К приоритетным загрязняющим веществам окружающей среды городов Республики Карелии и водных экосистем малых озер можно отнести также Zn и Cu (табл. 2). Наиболее вероятно возникновение экологических рисков от воздействия этих тяжелых металлов на территориях Петрозаводска и Медвежьегорска. В Петрозаводске экстремально высокие концентрации указанных металлов в донных осадках оз. Ламба тесно связаны с деятельностью предприятий машиностроительного комплекса, одно из которых расположено в непосредственной близости от водного объекта [4]. Отмечается тесная взаимосвязь этих элементов, что говорит о едином пути поступления Zn и Cu в водную среду (рис. 4). При этом высокий уровень концентраций этих металлов в озерных осадках малых озер территории Петрозаводска прослеживается по всей мощности изученных в рамках исследования техногенно измененных слоев [2, 4].

Анализ полученных геохимических данных (табл. 2) позволяет также отметить значительную активность щелочных и щелочноземельных элементов в геологической среде урбанизированных районов Карелии. Главным образом, это относится к Rb и Li, чьи коэффициенты концентрации в донных отложениях оз. Ламба (г. Петрозаводск) и озер Кайпинское и Кайма-

новское (г. Суоярви) выделяются на фоне многих других микроэлементов. Предполагается, что в результате их миграционной активности и повышенной аккумуляции в озерных осадках можно говорить о значительном влиянии техногенеза на экосистемы водных объектов в Республике Карелии [23, 24]. Полученные ранее закономерности взаимосвязи концентраций щелочных и тяжелых металлов в городской среде Петрозаводска подтверждаются аналогичными результатами исследования геохимических особенностей донных отложений малых озер г. Суоярви (рис. 5). Содержание Li тесно коррелирует с содержанием большинства тяжелых металлов в донных осадках, демонстрируя единство миграции и аккумуляции типоморфных химических элементов техногенеза в пределах урбанизированной среды [25].

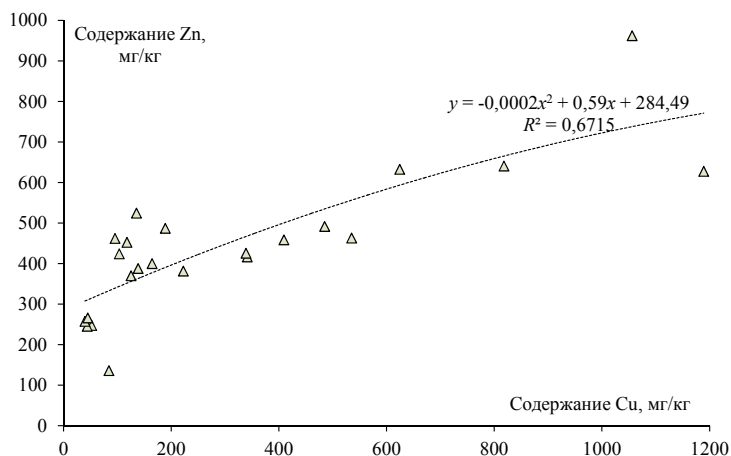


Рис. 4. Взаимосвязь концентраций Zn и Cu в колонке донных отложений, оз. Ламба, г. Петрозаводск.

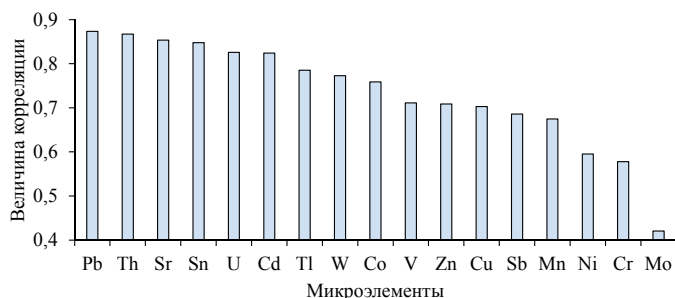
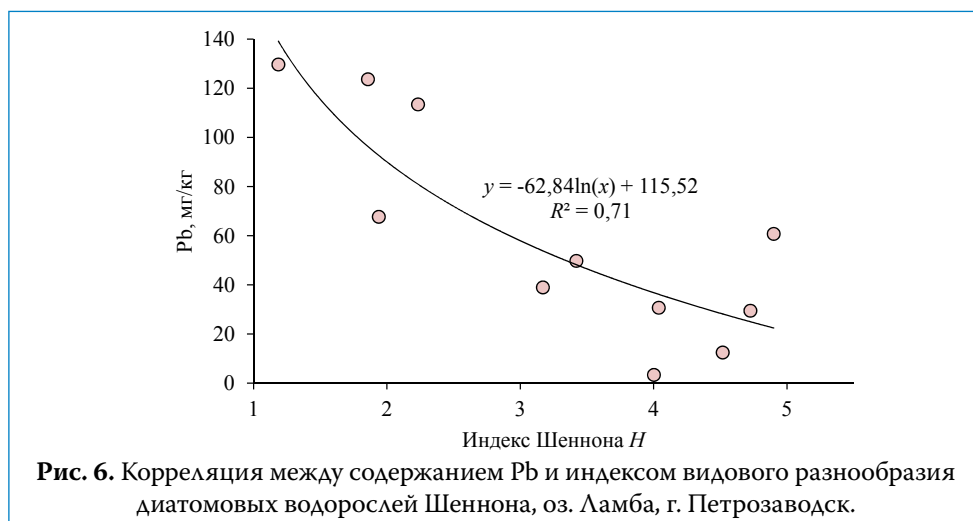


Рис. 5. Корреляция между Li и другими микроэлементами в донных отложениях озер Кайпинское и Каймановское, г. Суоярви ( $R_{крит.} = 0,42$  при  $p < 0,05$ ).



Кроме описанных выше элементов экологические риски для биоты водных объектов исследованных городских территорий могут быть связаны с воздействием W, Sr, Co, Mo, As, Mn и Tl для г. Петрозаводска, P, Co, Ni, Mn, As, Cr, Tl, U, V, Be для г. Медвежьегорска и Sr, V, Bi, P, Tl, U, Be, W, Cr, Mn, Ni, Co, As, Mo для г. Суоярви (табл. 2). Палеоэкологическая реконструкция негативного воздействия тяжелых металлов на экосистему расположенного в черте Петрозаводска оз. Ламба показала, что влияние техногенных факторов отразилось на экологическом состоянии диатомовых водорослей урбанизированного водоема [8]. Установлено, что разнообразие видов диатомовых водорослей городского озера резко снижается в период интенсивной антропогенной нагрузки. Наиболее тесной является корреляция индекса Шеннона  $H$  и концентраций Pb (рис. 6). Учитывая повсеместное распространение свинцового загрязнения на урбанизированных территориях Республики Карелии, логично ожидать обнаружения аналогичного поведения водной биоты и в других водных объектах региона. Более того, проведенные палеоэкологические исследования выявили, что исчезновение в определенный период развития водоема того или иного вида или группы диатомовых водорослей происходит и под воздействием других металлов [8].



Исследование бентосных беспозвоночных и ихтиофауны городских водных объектов г. Петрозаводска позволило установить, что загрязнение тяжелыми металлами донных отложений речных и озерных экосистем приводит к миграции и аккумуляции загрязняющих веществ в живых тканях [6, 7]. В бентосе урбанизированной территории г. Петрозаводска наиболее активно накапливаются Zn, Mo, Cu, Sb и Pb, чьи повышенные

концентрации фиксируются в среде обитания живых организмов, приводят к их угнетению и гибели.

Среди представителей рыбного сообщества отмечается существенное различие в накоплении тяжелых металлов между видами, чей рацион питания составляет преимущественно бентос, и видами, ведущими хищный образ жизни. Так в озерах Петрозаводска наибольшее накопление металлов (V, Zn, Pb, Ni, Cu) приходится на печень, мышцы и кости плотвы, меньшее – на органы речного окуня [7]. При этом аномально высокое содержание V в донных отложениях оз. Ламба явно сказывается на биоаккумуляции этого металла живыми организмами, что, в частности, отражается на значительной концентрации V в печени (рис. 7) и в других органах плотвы. Очевидно, это может привести к морфоструктурным изменениям внутренних органов рыбного сообщества городского водоема. Кроме того, существует риск потребления в пищу рыб изученного водоема местными жителями, учитывая, что городские водоемы используются как объекты рекреации.



Рис. 7. Среднее содержание тяжелых металлов в печени плотвы оз. Ламба, г. Петрозаводск, Республика Карелия, 2015 г. (концентрации указаны в мг/кг сухой массы).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы впервые исследовано общее состояние донных отложений малых озер урбанизированных территорий Республики Карелии. Установлено, что изученные озерные осадки относятся к сапропелям с содержанием органического вещества от 30 до 70 %. Анализ вертикального распределения микроэлементов, в т. ч. тяжелых ме-

таллов, в колонках донных отложений исследованных озер Петрозаводска, Медвежьегорска и Суоярви позволил выявить мощность техногенно измененного слоя осадков для каждого из водоемов: минимальная мощность техногенно измененного слоя донных отложений установлена для оз. Китайского (г. Медвежьегорск) – 16 см, максимальная – для оз. Ламба (г. Петрозаводск) – 48 см. К приоритетным загрязняющим веществам донных отложений исследованных городских озер и их водосборных площадей следует отнести Pb, Sb, Cd, Zn и Cu, демонстрирующие большие коэффициенты концентрации почти во всех осадках урбанизированных водоемов Карелии. Установлена взаимосвязь повышенных концентраций Pb с процессом атмосферного переноса загрязняющих веществ от промышленных предприятий севера России и Европы. В донных отложениях оз. Ламба установлены локальные экстремальные превышения над фоном концентраций V и Ni, поступающих в экосистему водоема в результате выбросов Петрозаводской ТЭЦ.

На примере исследования водных организмов городских озер Республики Карелии впервые показано, какие экологические риски для биоты могут возникнуть в результате влияния тяжелых металлов в антропогенно нарушенной среде. Оценен уровень биоаккумуляции тяжелых металлов бентосными беспозвоночными и представителями ихтиофауны водных объектов г. Петрозаводска. Выяснено, что уровень накопления тяжелых металлов – Pb, Zn, V – в живых тканях иллюстрирует уровень загрязнения металлами урбанизированной среды в целом. Полученные результаты имеют важную практическую значимость, т. к. городские водоемы – объекты рекреационного использования, и конечным пунктом миграции загрязняющих веществ может быть человек. В связи с этим проведенные исследования могут стать основой для разработки мер по обеспечению безопасного использования городских водоемов Карелии – от простого информирования местных жителей об экологическом состоянии водной среды до очистки озер от загрязненных слоев донных отложений или обезвреживания загрязняющих веществ, находящихся в толще осадков.

*Автор выражает благодарность своим коллегам – Н.В. Ильмату, А.С. Медведеву, Д.Г. Новицкому, И.В. Суховской, Е.В. Сыроежко и Т.С. Шелеховой за содействие в проведении совместных эколого-геохимических исследований.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Н.Н., Литвиненко А.В., Фрейдлинг В.А., Кекконен В.В., Зубова А.А., Лозовик П.А., Морозов А.К., Карпечко В.А., Перский Н.Е. Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

2. Слукровский З.И., Медведев А.С. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламба (г. Петрозаводск, Республика Карелия) // Экологическая химия. 2015. № 1. С. 56–62.
3. Слукровский З.И., Медведев А.С., Бубнова Т.П., Сыроежко Е.В. Накопление и вертикальное распределение тяжелых металлов в сапропеле озера Грязное (Медвежьегорский район, Республика Карелия) // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20. № 1/2. С. 177–188. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-177-188.
4. Слукровский З.И., Ильмаст Н.В., Суховская И.В., Борвинская Е.В., Гоголев М.А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63.
5. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек агроландшафтов (формирование, состав, экологическая оценка) // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 1. С. 66–71.
6. Slukovskii Z.I., Polyakova T.N. Analysis of Accumulation of Heavy Metals from River Bottom Sediments of the Urban Environment in the Bodies of Oligochaetes // Inland Water Biology. 2017. Vol. 10. № 3. P. 315–322.
7. Слукровский З.И., Ильмаст Н.В., Суховская И.В., Борвинская Е.В. Анализ содержания тяжелых металлов в органах рыб озера Ламба (Петрозаводск, Республика Карелия) // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: мат-лы VI Всеросс. науч. конф. с международным участием. Апатиты: Из-во Кольского научного центра РАН, 2016. С. 214–218.
8. Слукровский З.И., Шелехова Т.С., Сыроежко Е.В. Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 1. С. 103–123.
9. Синькевич Е.И., Экман И.М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. 177 с.
10. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.
11. Li X., Shen Z., Wai O.W.H., Li Y.-S. Chemical Forms of Pb, Zn and Cu in the Sediment Profiles of the Pearl River Estuary // Marine Pollution Bulletin. 2001. Vol. 42. No 3. P. 215–223.
12. Субетто Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции: Научная монография. Спб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 339 с.
13. McConnell J.R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. Proceedings of the National Academy of Sciences 34, 2008. P. 12140–12144.
14. Thomas V.M. The elimination of lead in gasoline // Annual Review of Energy and the Environment. 1995. Vol. 20. P. 301–324.
15. Даувальтер В.А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова // Геохимия. 2006. № 2. С. 237–240. DOI:10.1134/S0097807810040093.

16. *Keinonen M.* The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966-1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // *The Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 113, No 3. P. 251-268. doi:10.1016/0048-9697(92)90004-C.
17. *Крутских Н.В., Косинова И.И.* Методика трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск) // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2014. № 3. С. 95–97.
18. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра. 1990. 335 с.
19. *Кубатбеков Т.С., Айтманов М.Б., Ибраимакунов М.* Сурьма в природно-техногенных условиях биосферы: вода, почва, растения // *Вестник РУДН. Сер. Агрономия и животноводство*. 2012. № 4. С. 56–60.
20. *Ивантер Э.В., Слуковский З.И., Дудакова Д.С., Медведев А.С., Светов С.А.* Свидетельства цирконового природного кадмиевых аномалий в донных отложениях литорали северной части Ладожского озера // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 468. № 5. С. 562–565.
21. *Гоголашвили Э.Л., Гарифзянов А.Р.* Проблемы анализа ванадия в сточных водах тепловых электростанций // *Энергетика Татарстана*. 2007. № 3. С. 60–63.
22. *Иващенко В.И.* Главные рудно-формационные типы редкометального оруденения Карелии // *Геология рудных месторождений*. 2016. Т. 58. № 2. С. 189–194.
23. *Слуковский З.И., Светов С.А.* Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде // *География и природные ресурсы*. 2016. № 1. С. 38–45.
24. *Блохин М.Г.* Литий и рубидий в компонентах экосистемы залива Петра Великого: автореф. дисс... канд. биол. наук. Владивосток, 2007. 15 с.
25. *Loring D.H.* Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // *Marine Chemistry*. 1990. Vol. 29. P. 155–168. DOI:10.1016/0304-4203(90)90011-Z.

#### **Сведения об авторе:**

Слуковский Захар Иванович, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Институт геологии, Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11; e-mail: slukovskii\_z@igkrc.ru