

ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ НОВИЦКИЙ

магистр 2-го года обучения Института биологии, экологии и агротехнологий, Петрозаводский государственный университет, старший лаборант-исследователь лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Петрозаводск, Российская Федерация)
nov.dimka@mail.ru

НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ ИЛЬМАСТ

доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии рыб и водных беспозвоночных, Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Петрозаводск, Российская Федерация)
ilmast@onego.ru

ЗАХАР ИВАНОВИЧ СЛУКОВСКИЙ

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Петрозаводск, Российская Федерация)
slukovskii_z@igkrc.ru

ИРИНА ВИКТОРОВНА СУХОВСКАЯ

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Петрозаводск, Российская Федерация)
sukhovskaya@inbox.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМОВ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ НА ПРИМЕРЕ ОКУНЯ (*PERCA FLUVIATILIS*)*

Приводятся результаты анализа накопления тяжелых металлов V, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Mo, Sb, Sn, W, определенных масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS, в мышечных тканях, печени и костях речного окуня *Perca fluviatilis* из озера Четырехверстного (площадь – 0,118 км²), расположенного в черте города Петрозаводска. Несмотря на относительную удаленность от центра, водоем подвержен постоянной антропогенной нагрузке. Потенциальными источниками тяжелых металлов, которые со сточными водами ближайшего водосбора поступают и аккумулируются в городском озере, являются объекты хозяйственной деятельности, выбросы автомобильного и железнодорожного транспорта и промышленных предприятий Петрозаводска. В работе представлены результаты исследования динамики накопления тяжелых металлов в донных отложениях, из которых следует, что повышенный уровень загрязнения осадков водоема оказывает влияние на накопление токсичных элементов в живых организмах, в том числе представителях ихтиофауны озера. Результаты опытного лова рыбы на оз. Четырехверстном показали, что ихтиофауна водоема представлена преимущественно речным окунем, наиболее массовым для Карелии видом рыб. Возрастной состав уловов включал особей четырех возрастных групп (от 2+ до 5+), доминировали пятилетки (21 %). Установлено, что наибольшее накопление во всех органах рыб отмечено для эссенциальных элементов P, Zn, Mn, среди тяжелых металлов наибольшим накоплением характеризуется Ni. Отмечено, что почти все тяжелые металлы активнее накапливаются в печени рыб. Большинство элементов имеют тесные корреляционные связи, например между Pb и V или Mo и W, позволяющие судить о единых антропогенных источниках поступления металлов в экосистему городского озера. Ключевые слова: речной окунь, *Perca fluviatilis*, тяжелые металлы, малое озеро, донные отложения, урбанизированная территория, антропогенное воздействие

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды химическими элементами и веществами, становятся все более актуальными в связи с усилением техногенной нагрузки на природную среду. В результате развития промышленности, увеличения урбанизированных территорий, роста инфраструктуры изменяются циклы химических элементов, нарушается баланс физико-химических условий. Одними из наиболее опасных химических загрязнителей являются тяжелые металлы (ТМ), чье токсичное воздействие оказывает влияние на различные уровни организации живых организмов – от молекулярного до поведенческого.

Водные экосистемы крайне уязвимы к антропогенному воздействию. Изменение состояния окружающей среды чаще всего происходит постепенно, однако долговременная антропогенная нагрузка на водосборы озер, рек и других водных объектов приводит к изменению природных условий формирования химического состава экосистемы [7]. Значительное влияние на загрязнение водоемов и прилегающих территорий оказывает неэффективная очистка сточных вод, содержащих обогащенные ТМ выбросы предприятий и фабрик [32].

Рыбное население водных объектов может чутко реагировать на любые изменения, происходящие в экосистеме [9], [28], [33], [37]. Рыбы занимают верхний уровень в трофической системе водоемов. Они имеют более длительный цикл жизни по сравнению с беспозвоночными, поэтому могут информативно отражать последствия длительного загрязнения водных экосистем [15]. Биохимические изменения (белковый, углеводный, липидный обмен) в организме рыб являются индикаторами токсичного влияния загрязнителей, которые проявляются в торможении роста, нарушении процессов созревания гонад, элиминации отдельных видов [4]. Использование представителей ихтиофауны при проведении биогеохимических исследований поведения ТМ позволяет оценить общий уровень загрязнения водного объекта и его водосборной площади, учитывая, что методы биоиндикации имеют ряд несомненных преимуществ по сравнению с чисто химическими подходами. Кроме того, очевидна практическая значимость подобных исследований, принимая во внимание использование водных объектов в хозяйственных и рекреационных целях.

Цель данной работы – оценить уровень накопления тяжелых металлов в организме речного окуня, выловленного в озере Четырехверстном, которое расположено в пределах урбанизированной территории (г. Петрозаводск, Карелия).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озеро Четырехверстное – небольшой водоем площадью 0,118 км², расположенный на юго-востоке г. Петрозаводска (рис. 1). Котловина имеет

простое строение с глубоководными участками в северной и центральной частях. Из озера вытекает ручей Каменный, который впадает в Онежское озеро [2]. Показатели pH воды варьируют в пределах 7,2–8,0, при этом максимальные значения наблюдаются в весенний период [12], [21]. По показателям численности бактериопланктона озеро соответствуют мезотрофным типам водоемов [14]. Донные отложения озера представлены сапропелями и алевритовыми сапропелями, в самых верхних слоях отложений зарегистрировано повышенное содержание различных микроэлементов, в том числе ТМ [16] (рис. 2).



Рис. 1. Карта-схема расположения озера

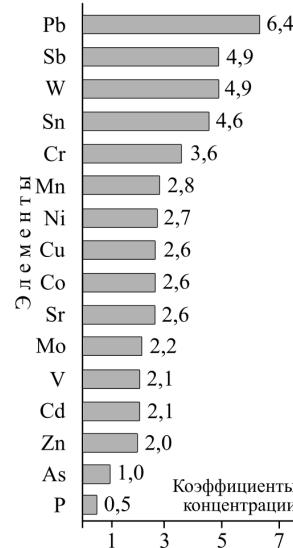


Рис. 2. Уровень накопления химических элементов в верхнем слое (0–20 см) донных отложений оз. Четырехверстного относительно фона

Несмотря на отделение озера от центра города, водоем испытывает значительную антропогенную нагрузку. Ранее на берегу водного объекта располагалась артель «Пимокатная», позднее ставшая фабрикой валяльной обуви, функционировавшей до 1997 года¹. В настоящий момент вблизи озера проходят пути автомобильной и железной дорог. Непосредственно к берегу водоема прилегает гражданская застройка. Горожане используют озеро в хозяйственных и рекреационных целях. Детальные исследования донных

отложений другого петрозаводского озера Ламба показали возможность значительного влияния на малые водные объекты города предприятий машиностроительного комплекса, функционировавших и функционирующих до сих пор, а также фактора трансграничного переноса ряда загрязнителей от предприятий Европы и Северной Америки [23].

Материал по ихтиофауне был собран в августе 2016 года из сетных уловов (сети с ячейей 15–30 мм). Всего было отобрано 46 особей речного окуня *Perca fluviatilis*. Обработку ихтиологических проб проводили по общепринятым методикам [8], [18], [20]. Рыб измеряли, взвешивали, устанавливали пол, степень зрелости половых гонад. Возраст рыб определяли по жаберным крышкам. Затем для химического анализа у каждой отобранный особи окуня брали образцы мышц, костей и печени. Отобранные пробы тканей и органов рыб высушивались при температуре 105 °C, затем истирались до гомогенного состояния в измельчителе и разлагались смесью кислот в открытой системе. Содержание элементов (P, Mn, Sr, Mo, Sn, Sb, W, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, V) в полученных растворах определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS [36]. Статистические расчеты проводились с использованием программы Microsoft Excel 2007. В работе приводятся сравнения концентраций изучаемых элементов в органах речного окуня с их содержанием в донных отложениях и фитоперифитоне оз. Четырехверстного [12], [24], а также в мышцах, костях и печени речного окуня и плотвы оз. Ламба, также расположенного в черте г. Петрозаводска [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты опытного лова рыбы на оз. Четырехверстном показали, что ихтиофауна водоема представлена преимущественно речным окунем, наиболее массовым для Карелии видом рыб. По данным С. В. Герда [3], речной окунь встречается в 87–96 % озер региона. Окунь является второстепенным объектом промысла. Во многих водоемах Республики его запасы недоиспользуются [10], [26], [27].

Возрастной состав уловов был представлен особями четырех возрастных групп (от 2+ до 5+), доминировали пятилетки (21 %) (рис. 3). Количество рыб в возрасте 2+ и 3+ составляло по 11 %, в возрасте 5+ – 3 % соответственно. Длина тела (ad) изученных особей колебалась от 10,2 до 15,6 см (медиана – 13,2), масса тела – от 18 до 54 г (медиана – 33,5). Средние показатели линейно-весового роста окуня приведены на рис. 4. Половой зрелости окунь в условиях оз. Четырехверстного достигает на третьем году жизни (в возрасте 2+). Половой состав уловов свидетельствует о некотором преобладании женских особей в популяции (54 %).

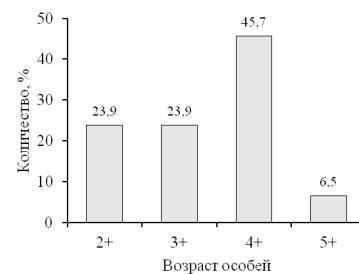


Рис. 3. Возрастной состав уловов окуня оз. Четырехверстного

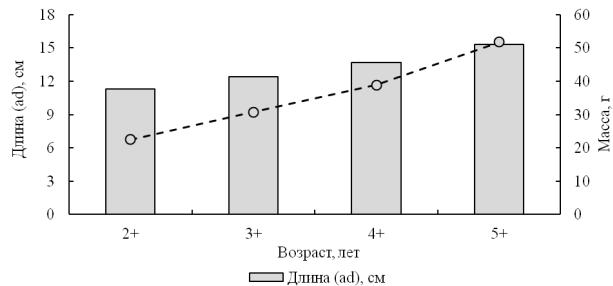


Рис. 4. Линейно-весовые показатели окуня оз. Четырехверстного

Комплексные исследования водоемов г. Петрозаводска проводились и ранее [22]. Сравнительный анализ биологических показателей окуня озер Ламба и Четырехверстного показал, что возрастной состав, линейно-весовые показатели популяций окуня обоих водоемов имеют схожие значения.

Содержание P, Mn, Sr, Sn, Sb, W, Cr, Ni, Cu, Zn и Pb было установлено во всех 100 % исследованных образцов в тканях и органах речного окуня оз. Четырехверстного. Содержание Mo обнаружено в 91 % всех проанализированных образцов, Cd – в 56 % и V – в 12 %. В табл. 1 представлены статистически обработанные данные по всем определенным химическим элементам.

Наибольшее накопление во всех органах отмечено для эссенциальных элементов P, Zn, Mn. Причем если в костях окуней концентрации Mn выше концентраций Zn, то в мышцах и печени Zn занимает второе место после P по уровню биоаккумуляции среди всех изученных элементов, а среднее содержание Mn ниже аналогичного значения по Ni.

Фосфор (P) наиболее активно накапливается в костях и в несколько раз меньше в печени и мышцах окуней: $P_{\text{кости}} (51270) > P_{\text{печень}} (13360) > P_{\text{мышцы}} (10118)$. Следует отметить, что содержание Pb в верхних слоях донных отложений оз. Четырехверстного (1815 мг/кг) значительно ниже концентраций этого элемента в мышцах, костях и печени окуней.

Цинк (Zn). Наибольшее содержание этого элемента наблюдается в костях – 133 мг/кг, а наименьшее в мышцах – 25 мг/кг. Среднее содержание металла в печени окуня составляет 99 мг/кг.

Таблица 1

Основные статистические параметры по выборкам концентраций химических элементов в костях, мышах и печени окуня ($x_{ср}$ – среднее (невзвешенное) значение, x_{min} и x_{max} – максимальное и минимальное значения, S – стандартное отклонение, Me – медиана, V – коэффициент вариации, h/p – нет расчетных данных из-за недостаточного количества значений выборки, h/o – не обнаружено)

Кости, n = 14														
Значение	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	Mn	Sr	Mo	Sn	Sb	W
$x_{ср}$	h/p	2,35	13,69	1,03	133	h/p	0,36	51270	173	47,5	0,07	0,29	0,15	0,13
S	h/p	1,63	1,34	0,37	32	h/p	0,09	5087	60	10,4	0,04	0,06	0,08	0,04
x_{max}	0,48	7,91	16,50	1,54	203	0,05	0,50	58780	271	68,9	0,19	0,40	0,31	0,22
x_{min}	0,00	1,40	11,87	0,00	99	0,00	0,24	41700	81	35,7	0,02	0,16	0,05	0,06
Me	h/p	1,96	13,44	1,09	123	h/p	0,35	52060	180	45,1	0,05	0,29	0,16	0,12
V, %	h/p	69,4	9,8	36,2	23,8	h/p	24,2	9,9	34,8	22,0	62,6	22,5	49,5	33,0
Мышцы, n = 14														
Значение	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	Mn	Sr	Mo	Sn	Sb	W
$x_{ср}$	h/p	1,96	14,4	1,25	25,1	h/p	0,26	10118	5,42	1,40	0,06	0,30	0,15	0,13
S	h/p	0,51	1,6	0,21	3,1	h/p	0,08	672	2,99	0,65	0,05	0,06	0,04	0,04
x_{max}	h/o	3,39	17,0	1,69	31,8	0,03	0,44	11250	10,1	2,43	0,15	0,43	0,24	0,20
x_{min}	h/o	1,28	12,1	0,98	20,0	0,00	0,18	8921	2,09	0,45	0,00	0,19	0,08	0,07
Me	h/p	1,90	14,6	1,22	24,5	h/p	0,25	10335	4,54	1,27	0,05	0,29	0,14	0,12
V, %	h/p	26,1	11,1	17,0	12,2	h/p	28,7	6,6	55,2	46,5	79,6	19,8	27,4	30,6
Печень, n = 14														
Значение	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	Mn	Sr	Mo	Sn	Sb	W
$x_{ср}$	0,32	3,40	15,0	9,1	99	0,30	0,43	13360	28	1,68	0,78	0,80	0,36	0,18
S	0,67	1,62	2,5	1,2	15	0,15	0,21	1914	31	0,91	0,15	0,29	0,17	0,06
x_{max}	2,29	7,85	20,2	10,8	115	0,57	1,07	17770	130	4,09	1,03	1,21	0,61	0,33
x_{min}	0,00	1,73	11,2	6,6	71	0,00	0,22	9285	10	0,55	0,47	0,45	0,07	0,10
Me	h/p	3,14	15,0	9,1	105	0,28	0,37	13180	18	1,62	0,81	0,78	0,43	0,15
V, %	213,6	47,6	16,6	13,0	14,9	49,7	47,7	14,3	110,5	54,1	19,6	36,4	48,5	34,6

Аналогичная динамика распределения Zn в органах окуня отмечается и в оз. Ламба (г. Петрозаводск), а в плотве оз. Ламба максимальное содержание этого элемента установлено в печени. В верхних слоях донных отложений оз. Четырехверстного содержание Zn составляет от 211 до 299 мг/кг, что несколько больше, чем в органах и тканях рыб. Концентрации Zn в костях и печени окуня превышают содержание этого металла в фитоперифитоне водоема (88,2 мг/кг). Учитывая, что значение Zn^2 для пищевой продукции составляет 40 мг/кг, в речном окуне наблюдается превышение содержания в 2 раза в печени и в 3 раза в костях.

Марганец (Mn). Этот эссенциальный элемент активнее аккумулируется в костях и значительно в меньшей степени в печени и мышцах: $Mn_{\text{кости}} (173) > Mn_{\text{печень}} (28) > Mn_{\text{мышцы}} (5,42)$. При этом содержание этого элемента в донных отложениях петрозаводского озера во много раз превышает его накопление в живых тканях.

Никель (Ni). Среднее содержание этого металла во всех пробах составляет от 11,2 до 20,5 мг/кг. Наибольшее накопление по средним значениям отмечено в печени окуня, а наименьшее – в костях. В органах окуня из оз. Ламба накопление этого элемента значительно ниже, основное накопление приходится на костные ткани. Концентрация Ni в поверхностном слое озерных осадков изучаемого водоема (59,9 мг/кг) превышает накопление металла в мышцах, костях и печени окуня, в то же время биоаккумуляция Ni рыбным сообществом оз. Четырехверстного выше, чем фитоперифитоном городского водоема.

Стронций (Sr). Наибольшее накопление этого элемента отмечено в костях рыб (47,5 мг/кг). На порядок меньше накопление Sr в печени и мышцах окуня: $Sr_{\text{кости}} (47,5) > Sr_{\text{печень}} (1,68) > Sr_{\text{мышцы}} (1,40)$.

Медь (Cu). Наибольшее содержание Cu отмечается в печени речного окуня – 9,07 мг/кг, что близко к концентрации этого металла в печени окуня оз. Ламба (9,68). Значительно меньше содержание Cu в мышцах и костях окуня: $Cu_{\text{печень}} (9,07) > Cu_{\text{мышцы}} (1,25) > Cu_{\text{кости}} (1,03)$. В приповерхностном слое донных отложений оз. Четырехверстного содержание Cu варьируется от 79 до 124 мг/кг, что в несколько раз выше концентрации в рыбном сообществе. Фитоперифитон озера также активнее аккумулирует Cu (19 мг/кг) по сравнению с речным окунем.

Свинец (Pb). Наибольшие концентрации приходятся на печень рыб, несколько меньше этот металл аккумулируется в костях и мышцах: $Pb_{\text{печень}} (0,43) > Pb_{\text{кости}} (0,36) > Pb_{\text{мышцы}} (0,26)$. В печени речных окуней оз. Ламба содержание этого элемента также имеет наибольшее значение. При этом накопление Pb в донных отложениях (35–59 мг/кг) и фитоперифитоне (6,62) оз. Четырехверстного во много раз превышает полученные концентрации по речному окуню.

Хром (Cr). Максимальное накопление Cr происходит в печени до 7,85 мг/кг при медиане 3,14. Этот металл обладает тенденцией к накоплению в живых тканях рыб озера, аналогичной свинцу: $Cr_{\text{печень}} (3,4) > Cr_{\text{кости}} (2,35) > Cr_{\text{мышцы}} (1,96)$. В живых тканях окуня оз. Ламба накопление этого металла находится на таком же уровне. Содержание Cr в донных осадках озера (от 82 до 136 мг/кг) при этом значительно превышает полученные концентрации по рыбам.

Сурьма (Sb). Элемент откладывается равномерно в костях и мышцах, однако максимальные концентрации приходятся на печень рыб: $Sb_{\text{печень}} (0,36) > Sb_{\text{кости}} (0,15) = Sb_{\text{мышцы}} (0,15)$. Содержание в донных отложениях этого металла (1,45 мг/кг) незначительно превышает данные по ихтиофауне.

Олово (Sn). Накапливается аналогично сурье: $Sn_{\text{печень}} (0,80) > Sn_{\text{кости}} (0,30) > Sn_{\text{мышцы}} (0,29)$. Приведенные концентрации в живых тканях окуня значительно ниже данных по донным отложениям озера (3,4 мг/кг).

Молибден (Mo). Наибольшее накопление приходится на печень изученных рыб (0,78 мг/кг), в костях и мышцах установлены следовые концентрации этого металла (от 0,02 до 0,15 мг/кг), на порядок ниже содержание этого металла в поверхностных отложениях озера (2,3 мг/кг).

Вольфрам (W). Вольфрам равномерно распределяется в костях и мышцах, немного выше концентрации этого элемента в печени окуня: $W_{\text{печень}} (0,18) > W_{\text{кости}} (0,13) = W_{\text{мышцы}} (0,13)$. В донных отложениях содержание W составляет 1,6 мг/кг.

Ванадий (V). Распределение ванадия в органах окуня неравномерно. Этот металл не обнаружен в мышцах, но и в печени и костях отмечается минимальные значения: $V_{\text{печень}} (0,32) > V_{\text{кости}} (0,03)$. Однако в печени, мышцах и костях окуня оз. Ламба этот элемент имеет гораздо большие значения (от 3,45 мг/кг в мышцах до 194 мг/кг в печени). В донных отложениях оз. Четырехверстного содержание V достигает 190 мг/кг в поверхностном слое (среднее содержание – 137 мг/кг).

Кадмий (Cd). Наибольшее содержание элемента наблюдается в печени – 0,3 мг/кг. Сравнивая полученные значения Cd (0,1 мг/кг), можно отметить превышение содержания в печени окуня городского озера. В меньшем количестве Cd накапливается в мышцах и костях рыб: $Cd_{\text{печень}} (0,30) > Cd_{\text{кости}} (0,02) = Cd_{\text{мышцы}} (0,01)$. В этих же органах речного окуня оз. Ламба Cd накапливается в несколько больших количествах в костях и мышцах и на одном уровне в печени. Содержание Cd в поверхностных слоях донных отложений озера (0,90 мг/кг) незначительно выше его накопления в организме окуня.

Полученные результаты по аккумуляции химических элементов, в первую очередь тяжелых металлов, отражают геохимическую специфиацию донных отложений оз. Четырехверстного,

чье загрязнение связано со множеством различных факторов, носящих как локальный, так и глобальный характер. К числу первых можно отнести деятельность нескольких заводов машиностроительного комплекса на территории города (Zn, Ni, Cr, Cu, W, Mo, Pb), фабрики валяльной обуви (P), выбросов автомобильного и железнодорожного транспорта (Pb, Cd, Zn), а также котельных и теплоцентрали (V, Cr, Ni) [11], [19], [23]. Кроме того, на повышение уровня накопления в донных отложениях Cd и Pb прямое влияние оказывает перенос загрязнителей от источников в других регионах на дальние расстояния [6], [34]. Учитывая, что питание рыбного сообщества озера, представленного речным окунем, тесно связано со средой донных отложений, то это и послужило главным фактором накопления тяжелых металлов в живых тканях. Тем более, что установлены факты накопления указанных загрязнителей в фитоперифите [12], а также олигохетах из речных отложений территории г. Петрозаводска, являющихся частью пищевого

rationa представителей рыбного сообщества городских водных объектов [36].

Для определения корреляционных связей между элементами был проведен анализ методом Пирсона (табл. 2). Наиболее тесная связь ($R > 0,70$) установлена в парах Cu-Mo (0,96), Cu-Sn (0,84), Zn-P (0,72), Cd-Mo (0,83), P-Mn (0,84), P-Sr (0,98), Mn-Sr (0,78), Mo-Sn (0,89), Mo-Sb (0,77), Sn-Sb (0,84). В целом анализ корреляционной матрицы позволяет разделить все изученные элементы на две группы: в первую входят элементы, откладывающиеся преимущественно в костях рыб (Zn, P, Mn, Sr), а во вторую – элементы, накапливающиеся преимущественно в печени (V, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Mo, Sb, Sn, W). Почти все тяжелые металлы, кроме Zn, отнесены ко второй группе элементов. При этом отдельные установленные корреляционные связи, например между Pb и V или Mo и W, могут иметь прямое отношение к непосредственным антропогенным источникам, под чьим постоянным воздействием развивается в последние 100–150 лет экосистема оз. Четырехверстного [16], [25].

Таблица 2

Корреляционная матрица элементного состава окуня (жирным выделены статистически значимые коэффициенты, превышающие $R_{\text{крит.}} = 0,389$ для $p = 0,01$)

	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	P	Mn	Sr	Mo	Sn	Sb
Cr	-0,03												
Ni	0,01	0,34											
Cu	0,32	0,43	0,25										
Zn	0,15	0,36	0,01	0,19									
Cd	0,42	0,30	0,24	0,83*	0,22								
Pb	0,60	0,22	0,15	0,37	0,32	0,37							
P	-0,13	-0,06	-0,23	-0,45	0,72	-0,34	0,09						
Mn	-0,12	-0,09	-0,22	-0,37	0,59	-0,32	0,12	0,84					
Sr	-0,14	-0,10	-0,21	-0,50	0,69	-0,39	0,02	0,98	0,78				
Mo	0,28	0,45	0,31	0,96	0,21	0,83	0,44	-0,42	-0,33	-0,47			
Sn	0,28	0,43	0,39	0,84	0,21	0,68	0,61	-0,35	-0,27	-0,40	0,89		
Sb	0,18	0,21	0,38	0,66	0,16	0,50	0,48	-0,30	-0,12	-0,31	0,77	0,84	
W	0,01	0,10	0,38	0,44	0,09	0,34	0,07	-0,26	-0,18	-0,26	0,53	0,42	0,56

Принимая во внимание важнейшую роль печени как основного органа детоксикации организма, можно объяснить повышенное накопление многих токсичных элементов именно в этом органе рыб городского озера [13]. Аналогичные закономерности отмечаются и в других водоемах Севера России [7], [17]. Накопление Sr и Zn в костях речного окуня связано со схожестью этих элементов по химическим свойствам с Ca, который они замещают в костях рыб при формировании и развитии скелета [4].

Исследуемые элементы являются неотъемлемой и необходимой составляющей для существования в природе любого организма. Однако их избыток, в том числе и избыток эссенциальных

элементов (Cu, Zn), способен негативно сказываться на состоянии рыбного сообщества водного объекта [4], [31]. Установлено, что повышенная аккумуляция тяжелых металлов в организме рыб различных регионов ведет к патологическим изменениям, нарушая работу тканей и органов [1], [5], [28], [30]. Следствием этого процесса является слабая дегенерация особей и некроз тканей. При этом отмечается прямая зависимость между уровнем накопления тяжелых металлов в донных отложениях водного объекта и токсичным воздействием этих загрязнителей на представителей ихтиофауны [29], что говорит о потенциальной опасности повышенного накопления исследованных элементов в оз. Четырехверстном для всей

экосистемы и в будущем. Вероятно, выходом из сложившейся ситуации может быть очистка изученного водоема путем удаления загрязненного слоя донных отложений, составляющего до 30 см от границы воды – дно [16], [25]. По ориентировочным подсчетам, объем зараженного осадка озера составляет 35,4 тыс. м³, и для его вывоза понадобится 1 770 железнодорожных цистерн объемом по 20 м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования установили, что ихтиофауна оз. Четырехверстного, расположенного в черте г. Петрозаводска, представлена преимущественно речным окунем. Преобладающее значение имеют особи пятилетнего возраста. Анализ накопления тяжелых металлов в мышечной ткани, костях и печени окуня оз. Четырехверстного подтвердил его статус техногенно измененного водоема. Основным источником поступления металлов в организм рыб являются загрязненные донные отложения, в химическом

составе которых ранее было установлено повышенное содержание всех изучаемых элементов. Показано, что накопление большинства загрязнителей, к числу которых относятся V, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Mo, Sb, Sn, W, происходит в печени рыб, Zn наиболее активно накапливается в костях. Тесные корреляционные связи между различными элементами, например между Pb и V или Mo и W, позволяют судить о единых антропогенных источниках поступления указанных тяжелых металлов, накопление которых в связи с деятельностью промышленности, транспорта, а также глобального рассеяния ряда элементов происходило в оз. Четырехверстном на протяжении последних 100–150 лет. Начатые биогеохимические исследования необходимо продолжать в связи с важным рекреационным статусом городского водоема. Необходимо принятие мер по очистке озера от загрязненных слоев донных отложений, в противном случае миграция тяжелых металлов по трофическим цепям экосистемы водного объекта будет продолжаться.

* Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания в Институте геологии КарНЦ РАН по бюджетной теме № АААА-А18-118020690231-1 «Эволюция окружающей среды в антропогене, геохимические аспекты динамики современных ландшафтов и прогнозирование экологических рисков на территории юго-восточной Финно-скандии», при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-35-00026 мол_а «Биогеохимические аспекты загрязненности малых водных объектов урбанизированных территорий Южной Карелии», бюджетной темы № 0221-2017-0045 «Закономерности функционирования и динамика сообществ гидробионтов водных экосистем Европейского Севера» и бюджетной темы № 0221-2017-0050 «Биохимические механизмы, определяющие сходство и различия в развитии адаптаций у гидробионтов морских и пресноводных экосистем».

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Промышленность Петрозаводска // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленность_Петрозаводска (дата обращения 10.09.2017).

² СП 4089-86 Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахундов А. Г., Касимов Р. Ю., Рустамов Э. К. Мишечная ткань рыб как биомаркер экологического состояния рек // Вестник Московского государственного областного университета. Сер.: Естественные науки. 2013. № 2. С. 17–20.
- Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 109 с.
- Герд С. В. Некоторые зоogeографические проблемы изучения рыб Карелии // Природные ресурсы, история и культура Карело-Финской ССР. Вып. 2. Петрозаводск: Гос. изд-во Карело-Фин. ССР, 1949. С. 100–115.
- Голованова И. Л. Влияние тяжелых металлов на физиолого-биохимический статус рыб и водных беспозвоночных // Биология внутренних вод. 2008. № 1. С. 99–108.
- Голованова И. Л., Филиппов А. А., Голованов В. К. Влияние температуры, pH и тяжелых металлов (медь, цинк) на активность карбогидраз щуки *Esox Lucius* L. и ее жертвы // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. 2011. № 2. С. 78–83.
- 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.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Состояние пресноводных систем рыбного хозяйства Арктики // Север и рынок: формирование экономического порядка. № 3. Апатиты, 2013. С. 130–133.
- Дгебуадзе Ю. Ю., Чернова О. Ф. Чешуя костищих рыб как диагностическая и регистрирующая структура. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 315 с.
- Ильмост Н. В., Стерлигова О. П., Кучко Я. А., Павловский С. А. Гидробиоценозы Костомукшского водоразлища (бассейн Белого моря) в условиях техногенного загрязнения // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2013. Т. 15. № 3-3. С. 916–920.
- Ильмост Н. В., Стерлигова О. П., Первозванский В. Я. Ресурсные виды // Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 81–85.
- Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия / Д. С. Рыбаков, Н. В. Крутских, Т. С. Шелехова, Н. Б. Лаврова, З. И. Слуковский, М. В. Кричевцова, О. В. Лазарева. СПб.: ООО «Элек-Сис», 2013. 130 с.
- Комулин С. Ф. Фитоперифитон в водоемах г. Петрозаводска (Республика Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 43–50.
- Лявин Б. З., Бияк В. Я., Хоменчук В. О., Курант В. З. Фосфолипидный состав печени и жабр рыб как индикатор состояния поверхностных вод рек Тернополщины // Біологія Тварин. 2014. Т. 16. № 2. С. 56–65.

14. Макарова Е. М., Слуковский З. И., Медведев А. С., Новицкий Д. Г. Оценка качества воды малых озер г. Петрозаводска по показателям бактериопланктона в подледный период // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2017. № 6 (167). С. 72–77.
15. Миссенко Т. И. Водная токсикология. Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.
16. Новицкий Д. Г., Слуковский З. И., Медведев А. С. Геохимия 26-сантиметрового техногенного слоя донных отложений малого лесного озера в черте города Петрозаводск (Республика Карелия) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геэкологии Северо-Запада России: Материалы XXVII молодежной науч. школы-конференции, посвящ. памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты: Издательство Кольского научного центра РАН, 2016. С. 184–188.
17. Попов П. А., Андрюсова Н. В., Попов В. А. Содержание тяжелых металлов в организме сибирского ельца (*Leuciscus leuciscus baicalensis*) // Вода: химия и экология. 2015. № 11. С. 88–92.
18. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пиц. пром-сть, 1966. 376 с.
19. Саэт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
20. Сидоров Г. П., Решетников Ю. С. Лососеобразные рыбы водоемов европейского Северо-Востока. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 346 с.
21. Сластина Ю. Л., Клочкова М. А. Сезонная динамика фитопланктона оз. Четырехверстного // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV Школы-конференции молодых ученых с междунар. участием (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск, 2011. С. 121–123.
22. Слуковский З. И., Ильмист Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В. Анализ содержания тяжелых металлов в органах рыб озера Ламба (Петрозаводск, Республика Карелия) // Материалы VI Всероссийской научной конф. с междунар. участием (посвящ. 120-летию со дня рождения Г. М. Крепса и 110-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тян-Шанского). Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2016. С. 214–218.
23. Слуковский З. И., Ильмист 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 Кarelского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63.
24. Слуковский З. И., Медведев А. С. Вертикальное распределение микроэлементов в донных отложениях малого озера в условиях урбанизированной среды // Вода: химия и экология. 2015. № 3. С. 77–82.
25. Слуковский З. И., Медведев А. С. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламбы (г. Петрозаводск, Республика Карелия) // Экологическая химия. 2015. № 1. С. 56–62.
26. Стерлигова О. П., Ильмист Н. В., Савосин Д. С. Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 224 с.
27. Стерлигова О. П., Ильмист Н. В., Савосин Д. С. Окунь *Perca fluviatilis* (Percidae) разнотипных водоемов Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 2 (155). С. 57–62.
28. Терентьев П. М., Кашилин Н. А. Изучение пространственно-временных особенностей накопления некоторых тяжелых металлов в организмах сига водоемов северной Фенноскандии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 1. С. 57–62.
29. Чуйко Е. В. Влияние содержания тяжелых металлов в донных отложениях на их биоаккумуляцию в ихтиофауне // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 3 (25). С. 139–144.
30. Шакирова Г. Р., Бикташева Ф. Х. Морфологические изменения печени, почек, сердца окуния *Perca fluviatilis* и щуки *Esox lucius* из озера Асылыкуль в результате загрязнения воды тяжелыми металлами // Ветеринария. 2012. № 2. С. 177–180.
31. Atta K. I., Abdel-Karim A. E., Elsheikh E. H. Ultrastructural study of the effect of heavy metals on the regenerating tail fin of the teleost fish, *Oreochromis niloticus* // The Journal of Basic & Applied Zoology. 2012. Vol. 65. Issue 4. P. 232–239.
32. Avila-Perez P., Balcazar M., Zarazua-Ortega G., Barcelo-Quintal I., Diaz-Delgado C. Heavy metal concentration in water and bottom sediments of a Mexican reservoir // The Science of Total Environment. 1999. No 234. P. 185–196.
33. Lydersen E., Lofgren S. Potential effects of metals in reacidified limed water bodies in Norway and Sweden // Environmental Monitoring and Assessment. 2002. Vol. 73. Issue 2. P. 155–178.
34. McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. No 34. P. 12140–12144.
35. Nasr S. M., Okbah M. A., Kaseem S. M. Environmental Assessment of Heavy Metal Pollution in Bottom Sediments of Aden Port, Yemen // International Journal of Oceans and Oceanography. 2006. Vol. 1. No 1. P. 99–109.
36. 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. No 3. P. 315–322.
37. Yi Y., Zhang S. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River // Environmental Science and Pollution Research. 2012. No 19. P. 3989–3996.

Novitsky D. G., Institute of Geology of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ilmast N. V., Institute of Biology of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)
Slukovskii Z. I., Institute of Geology of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)
Suhovskaya I. V., Institute of Biology of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

BIOGEOCHEMICAL ASPECTS OF WATER BODIES POLLUTION OF URBANIZED TERRITORIES IN THE REPUBLIC OF KARELIA ON THE EXAMPLE OF PERCH *PERCA FLUVIATILIS*

The results of the analysis of the accumulation of heavy metals, V, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Mo, Sb, Sn, W are provided. The research was conducted with the mass spectroscopic method based on the XSeries-2 ICP-MS device. The muscular tissues, liver and bones of

the river perch *Perca fluviatilis* from Lake Chetyryokhvestnoe (area – 0,118 km²), located in the city of Petrozavodsk, were studied. Despite the relative remoteness from the center, the reservoir is constantly subjected to the anthropogenic load. Potential sources of heavy metals that enter and accumulate in the waters of the city lake together with the wastewater from the nearest catchment are economic entities and emissions coming from the road and rail transport and industrial enterprises in Petrozavodsk. The paper presents the results of the study of the dynamics of accumulation of heavy metals in bottom sediments. It was concluded that an increased level of contamination of the sediments of the reservoir affects the accumulation of toxic elements in living organisms, including representatives of the fish fauna of the lake. The results of experimental fishing on the Lake Chetyryokhvestnoe showed that the fish fauna of the reservoir is represented mainly by the river perch, the most common type of fish for Karelia. The age composition of catches was represented by the individuals of four age groups (from 2+ to 5+); five-year old species dominated (21%). It was established that the greatest accumulation in all organs of the fish was noted for such essential elements as P, Zn, Mn. As for heavy metals, the greatest accumulation is characterized by Ni. It is noted that almost all heavy metals accumulate actively in the liver of the fish. Most elements have close correlation links, for example, between Pb and V or Mo and W. The obtained results speak of the presence of consistent anthropogenic sources of metals entering the ecosystem of the city lake.

Key words: river perch, *Perca fluviatilis*, heavy metals, small lake, bottom sediments, urban areas, anthropogenic impact

* The study was performed in the framework of the state assignments at the Institute of Geology of the Karelian Research Centre of RAS on the budget theme № AAAA-A18-118020690231-1 “Evolution of the environment in anthropogen, geochemical aspects of the dynamics of modern landscapes and forecasting of environmental risks on the territory of southeastern Fennoscandia”, and with the financial support of RFBR grant No. 16-35-00026 mol_a “Biogeochemical aspects of pollution of small water bodies in urbanized areas of Southern Karelia”, budget theme № 0221-2017-0045 “Regularities of the functioning and dynamics of communities of hydrobionts of aquatic ecosystems in the European North”, and the budget theme № 0221-2017-0050 “Biochemical mechanisms determining the similarities and differences in the development of adaptations of hydrobionts in marine and freshwater ecosystems”.

REFERENCE

1. Akhundov A. G., Kasimov R. Yu., Rustamov E. K. Muscular tissue of fish as a biomarker of the ecological state of rivers. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2013. № 2. P. 17–20. (In Russ.)
2. Water objects of the city of Petrozavodsk: Textbook. Ed. A. V. Litvinenko, T. I. Regerand. Petrozavodsk, 2013. 109 p. (In Russ.)
3. Gerd S. V. Some zoogeographical problems of studying fish of Karelia. *Natural resources, history and culture of the Karelian-Finnish SSR*. Iss. 2. Petrozavodsk, 1949. P. 100–115. (In Russ.)
4. Golovanova I. L. The influence of heavy metals on the physiological and biochemical status of fish and aquatic invertebrates. *Biology of Inland Waters*. 2008. № 1. P. 99–108. (In Russ.)
5. Golovanova I. L., Filippov A. A., Golovanov V. K. Effect of temperature, pH and heavy metals (copper, zinc) on the activity of carbohydrases of *Esox Lucius* L. pike and its prey. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishery*. 2011. № 2. P. 78–83. (In Russ.)
6. Dauvalter V. A. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in the bottom sediments of the water bodies of the White Sea watershed within the Kola Peninsula. *Geochemistry*. 2006. № 2. P. 237–240. (In Russ.)
7. Dauvalter V. A., Kashulin N. A. The state of freshwater systems of Arctic fisheries. *North and the market: the formation of the economic order*. № 3. Apatity, 2013. P. 130–133. (In Russ.)
8. Dgebuadze Yu. Yu., Chernov O. F. Scales of bony fishes as a diagnostic and recording structure. Moscow, 2009. 315 p. (In Russ.)
9. Il'mast N. V., Sterligova O. P., Kuchko Ya. A., Pavlovsky S. A. Hydrobiocenoses of the Kostomuksha Reservoir (White Sea basin) in conditions of technogenic pollution. *Izvestiya Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. № 3-3. P. 916–920. (In Russ.)
10. Il'mast N. V., Sterligova O. P., Pervozvansky V. Ya. Resource species. *Monitoring and conservation of biodiversity of taiga ecosystems in the European North of Russia*. Petrozavodsk, 2010. P. 81–85. (In Russ.)
11. Climatic and geochemical aspects of the formation of environmental risks in the Republic of Karelia / D. S. Rybakov, N. V. Krutskikh, T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova, Z. I. Slukovskii, M. V. Krichevtsava, O. V. Lazarev. St. Petersburg, 2013. 130 p. (In Russ.)
12. Komulainen S. F. Phytoperiphyton in reservoirs of Petrozavodsk (Republic of Karelia). *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. № 2. P. 43–50. (In Russ.)
13. Lyavrin B. Z., Biyak V. Ya., Khomenchuk V. O., Courant V. Z. Phospholipid composition of the liver and gills of fish as an indicator of the state of surface waters of the rivers of Ternopilschiny. *Біологія Тварин*. 2014. Vol. 16. № 2. P. 56–65. (In Russ.)
14. Makarova E. M., Slukovskii Z. I., Medvedev A. S., Novitsky D. G. Assessment of the water quality in small lakes in Petrozavodsk according to indicators of bacterioplankton in the subglacial period. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2017. No 6 (167). P. 72–77 (In Russ.)
15. Moiseenko T. I. Water toxicology. Theoretical and applied aspects. Moscow, 2009. 400 p. (In Russ.)
16. Novitsky D. G., Slukovskii Z. I., Medvedev A. S. Geochemistry of the 26-centimeter technogenic layer of the bottom sediments of a small forest lake in the city of Petrozavodsk (Republic of Karelia). *Actual problems of geology, geophysics and geoecology of the Northwest Russia. Materials XXVII youth scientific school-conference, dedicated to the memory of corresponding Member of the USSR Academy of Sciences K. O. Kratz and Academician of the Russian Academy of Sciences F. P. Mitrofanov*. Apatity, 2016. P. 184–188. (In Russ.)
17. Popov P. A., Androsova N. V., Popov V. A. The content of heavy metals in the organism of the Siberian Yelets (*Leuciscus leuciscus baicalensis*). *Water: chemistry and ecology*. 2015. No 11. P. 88–92. (In Russ.)
18. Pravdin I. F. Guide to the study of fish. Moscow, 1966. 376 p. (In Russ.)
19. Sayet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. Geochemistry of the environment. Moscow, 1990. 335 p. (In Russ.)
20. Sidorov G. P., Reshetnikov Yu. S. Salmonid fishes of the water bodies of the European North-East. Moscow, 2014. 346 p. (In Russ.)
21. Slastina Yu. L., Klochkova M. A. Seasonal dynamics of phytoplankton of the lake. Four-waved. *Water environment and natural and territorial complexes: research, use, protection: Materials of the IV School-conference of young scientists with international participation (Petrozavodsk, August 26–28, 2011)*. Petrozavodsk, 2011. P. 121–123.

22. Slukovskii Z. I., Il'mast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V. Analysis of heavy metals in fish organs of Lake Lamba (Petrozavodsk, Republic of Karelia). *Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference with international participation (dedicated to the 120th anniversary of the birth of G. M. Kreps and the 110th anniversary of the birth of O. I. Semenov-Tian-Shansky)*. Apatity, 2016. P. 214–218. (In Russ.)
23. Slukovskii Z. I., Il'mast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. Geochemical specificity of the process of modern sedimentation under conditions of technogenesis (on the example of Lake Lamba, Petrozavodsk, Karelia). *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. No 10. P. 45–63. (In Russ.)
24. Slukovskii Z. I., Medvedev A. S. Vertical distribution of microelements in bottom sediments of a small lake in an urbanized environment. *Water: chemistry and ecology*. 2015. № 3. P. 77–82. (In Russ.)
25. Slukovskii Z. I., Medvedev A. S. The content of heavy metals and arsenic in the bottom sediments of the Lakes Four Leaves and Lamba (Petrozavodsk, Republic of Karelia). *Ekologicheskaya Khimiya*. 2015. No 1. P. 56–62. (In Russ.)
26. Sterligova O. P., Il'mast N. V., Savosin D. S. Cyclostomes and fishes of fresh water of Karelia. Petrozavodsk, 2016. 224 p. (In Russ.)
27. Sterligova O. P., Il'mast N. V., Savosin D. S. Perch *Perca fluviatilis* (Percidae) of various water bodies of Karelia. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2016. № 2. P. 57–62. (In Russ.)
28. Terentyev P. M., Kashulin N. A. Study of the space-time features of the accumulation of some heavy metals in organisms of the whitefish of northern Fennoscandia. *Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010. № 1. P. 57–62. (In Russ.)
29. Chuiiko E. V. Influence of the content of heavy metals in bottom sediments on their bioaccumulation in the ichthyofauna. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2013. No 3 (25). P. 139–144. (In Russ.)
30. Shakirova G. R., Bikta sheva F. Kh. Morphological changes of *Perca fluviatilis* perch and pike *Esox lucius* from Lake Asylykul as a result of water contamination with heavy metals. *Veterinary Medicine. Abstract journal*. 2012. № 2. P. 177–180. (In Russ.)
31. Atta K. I., Abdel-Karim A. E., Elsheikh E. H. Ultrastructural study of the effect of heavy metals on the regenerating tail fin of the teleost fish, *Oreochromis niloticus*. *The Journal of Basic & Applied Zoology*. 2012. Vol. 65. Issue 4. P. 232–239.
32. Avila-Perez P., Balcazar M., Zarazua-Ortega G., Barcelo-Quintal I., Diaz-Delgado C. Heavy metal concentration in water and bottom sediments of a Mexican reservoir. *The Science of Total Environment*. 1999. No 234. P. 185–196.
33. Lydersen E., Lofgren S. Potential effects of metals in reacidified limed water bodies in Norway and Sweden. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2002. Vol. 73. Issue 2. P. 155–178.
34. McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. No 34. P. 12140–12144.
35. Nasr S. M., Okbah M. A., Kasem S. M. Environmental Assessment of Heavy Metal Pollution in Bottom Sediments of Aden Port, Yemen. *International Journal of Oceans and Oceanography*. 2006. Vol. 1. No 1. P. 99–109.
36. 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. No 3. P. 315–322.
37. Yi Y., Zhang S. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River. *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. No 19. P. 3989–3996.

Поступила в редакцию 17.01.2018