

УДК 597.2/.5:574.64

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РЫБАХ МАЛЫХ ОЗЕР ЗЕЛЕННОГО ПОЯСА ФЕННОСКАНДИИ (НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, И. М. Королева

*Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное структурное подразделение
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии
наук», Апатиты, Россия*

Исследованы закономерности накопления тяжелых металлов (ТМ) в организмах рыб водоемов Мурманской области в пределах Зеленого пояса Фенноскандии (ЗПФ), испытывающих продолжительное влияние воздушного загрязнения, связанного с функционированием предприятия цветной металлургии. Установлено, что отрицательные последствия аэротехногенного загрязнения водоемов Кольской горно-металлургической компанией (ГМК) проявляются вне зависимости от доминирующих в течение года направлений ветра. Сокращение объемов выбросов Никельской площадкой Кольской ГМК за прошедшие десятилетия не привело к значительному уменьшению уровня антропогенной нагрузки. Напротив, отмечается долговременная тенденция к увеличению содержания Си в органах сига, гольца, щуки и окуня всех исследованных озер. У рыб в изученных водоемах отмечено градиентное снижение накопления Си и Ni в органах-мишенях по мере удаления водоемов от источника загрязнения. Выявленная закономерность согласуется с интенсивностью развития патологий органов сига. Обыкновенный сиг (*Coregonus lavaretus* (L., 1758)) является наиболее надежным тест-объектом, достоверно отражающим интенсивность нагрузки долговременного воздействия ТМ. Предполагается, что величина площади водосбора водоема может определять интенсивность и скорость накопления ТМ в организмах рыб. Совокупный эффект сохраняющейся антропогенной нагрузки ТМ на водоемы исследованной территории, процессов изменения климата, антропогенного эвтрофирования вод может выражаться в снижении биологического разнообразия фауны рыб ЗПФ, сокращении численности ценных видов рыб. Выявленные закономерности могут быть использованы при оценке состояния действующих охраняемых территорий и проектировании ООПТ ЗПФ.

Ключевые слова: Зеленый пояс Фенноскандии; биоразнообразие ихтиофауны Мурманской области; воздушное загрязнение; тяжелые металлы; индикаторные виды.

P. M. Terentjev, E. M. Zubova, N. A. Kashulin, I. M. Koroleva. PATTERNS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN FISH IN LAKES OF THE FENNOSCANDIAN GREEN BELT (IN THE MURMANSK REGION)

The patterns of heavy metals (HM) accumulation in fish from lakes of the Murmansk Region within the Green Belt of Fennoscandia (GBF) exposed to long-term air-borne pollution associated with the operation of a non-ferrous metal processing enterprise have been studied. The detrimental effects of air-borne water pollution from the Kola GMK

mine and smelter do not depend on the dominant wind directions. The reduction in emissions from the Nickel site of the Kola GMK in the past decades has not led to a significant decrease in the level of anthropogenic load. On the contrary, a long-term upward trend is observed in the content of Cu in the organs of whitefish, char, pike and perch in all the lakes studied. The accumulation of Cu and Ni in fish target organs tended to decrease along the distance gradient from the source of pollution. The revealed pattern is consistent with the intensity of pathologies development in whitefish organs. The common whitefish (*Coregonus lavaretus* (L., 1758)) is the most reliable test object that reflects the degree of pressure from long-term exposure to HM. The size of the catchment area is supposed to predetermine the intensity and rate of HM accumulation in fish organisms. The cumulative effect of persistent anthropogenic HM load on waterbodies in the study area, climate change processes, and man-induced eutrophication of waters can show in a decline in the biological diversity of the fish fauna in GBF, reduction in the number of valuable fish species. The identified patterns can be used in assessing the state both of existing and planned protected areas inside GBF.

Keywords: Green Belt of Fennoscandia; fish fauna biodiversity of the Murmansk Region; air pollution; heavy metals; indicator species.

Введение

Территория Мурманской области в пределах современных границ Зеленого пояса Фенноскандии (ЗПФ) [Боровичев и др., 2018] характеризуется большим числом рек и озер. Несмотря на практически полное отсутствие урбанизированных территорий, включая приграничные районы Северной Финляндии и Норвегии, водоемы указанной области испытывают влияние процессов воздушного загрязнения ТМ [Amundsen et al., 2011; Rognerud et al., 2013]. К числу крупнейших промышленных предприятий региона, оказывающих влияние на состояние наземных и водных экосистем, принадлежит предприятие цветной металлургии Никельская площадка Кольской ГМК ПАО ГМК «Норильский никель» [Кашулин и др., 2009; Yiköörkkö et al., 2015]. Учитывая особый статус территории ЗПФ [Титов и др., 2009], проблема сохранения биологического разнообразия и оценки состояния пресноводных экосистем в условиях аэротехногенного воздействия, в частности токсического влияния ТМ, стоит весьма остро. Для оценки антропогенного пресса на экосистемы водоемов помимо изучения гидрохимических показателей широко используют гидробионтов. Рыбы, как индикаторы качества вод, представители верхнего трофического уровня водоемов и объекты питания человека, могут быть использованы для оценки уровня антропогенной нагрузки (в частности ТМ) на пресноводные экосистемы [Моисеенко, 1984; Кашулин и др., 1999; Authman et al., 2015; Rose et al., 2015].

Имеющиеся материалы собственных исследований по накоплению ТМ в организмах рыб водоемов приграничного района России, Финляндии и Норвегии могут представлять интерес

в контексте приуроченности к ЗПФ рассматриваемой территории, испытывающей долговременное воздействие ТМ. Цель данной работы – выявление градиентных закономерностей нагрузки ТМ предприятия медно-никелевого производства на водоемы ЗПФ, расположенные в направлении, противоположном преобладающей «розе ветров», на основе анализа накопления Cu, Ni и Zn в организмах рыб. Также задачей исследования являлось определение особенностей долговременного аккумуляирования ТМ различными представителями рыбной части сообщества и обоснование выбора показательных тест-объектов, отражающих интенсивность антропогенного влияния на территориях, имеющих природоохранный статус.

Материалы и методы

В работе использованы материалы собственных исследований ИППЭС КНЦ РАН в период с 2002 по 2013 гг. (табл. 1). Изученные водоемы находятся в пределах лесной зоны ЗПФ в приграничном районе крайней северо-западной части РФ (Мурманская область) с северными областями Норвегии и Финляндии (рис. 1). Критерием выбора водоемов являлось их расположение в юго-западном и южном направлении на различном удалении от Никельской площадки Кольской ГМК в пределах ЗПФ. Несмотря на то что господствующими в течение года являются ветры южного и юго-западного направлений (рис. 1), влиянию дымовых выбросов предприятия за счет атмосферного переноса и выпадения с атмосферными осадками подвержена вся территория Мурманской области и сопредельных стран [Раткин, 2006]. Оз. Куэтсъярви расположено в непосредствен-

Таблица 1. Объем проанализированных образцов органов рыб, основные характеристики и некоторые гидрохимические показатели исследованных водоемов

Table 1. Volume of the analyzed samples of fish organs, the main characteristics and some hydrochemical parameters of the studied lakes

Показатель Index	Озера Lakes					
	Куэтсьярви Kuetsyarvi	Шуонияур Shuoniyaur	Иля-Наутсиярви Ilya-Nautsiyarvi	Виртуовошъяур Virtuovoshyaur	Кочеяур Kocheyaur	Ковдор Kovdor
Период исследований Period of study	2004–2013	2005–2012	2012	2005–2013	2002–2009	2002–2004
Количество отобранных образцов тканей рыб The number of sampled fish tissues	Сиг Whitefish (373) Щука Pike (165) Окунь Perch (156)	Голец Charr (109) Кумжа Trout (50)	Сиг Whitefish (50) Щука Pike (50) Окунь Perch (50)	Сиг Whitefish (143) Щука Pike (70) Окунь Perch (150)	Сиг Whitefish (213) Щука Pike (80) Окунь Perch (155)	Сиг Whitefish (128) Ряпушка (100)
Водосбор Catchment	р. Пасвик Pasvik Riv.	р. Пасвик Pasvik Riv.	р. Пасвик Pasvik Riv.	р. Пасвик Pasvik Riv.	р. Тулома Tuloma Riv.	р. Нива Niva Riv.
Высота н. у. м., м Altitude, m	21,3	180,1	154	182	133,1	211
Макс. глубина, м Max. depth, m	37	10	9	13	8	24,1
Площадь озера, км ² Lake area, km ²	17	11,3	3,8	1,25	3,2	0,54
Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	628,4	285,8	262	13,7	27,5	133
pH	$\frac{7,06}{6,71-7,31}$	$\frac{6,59}{6,17-6,85}$	-	$\frac{6,66}{6,12-6,96}$	$\frac{7,08}{6,88-7,29}$	$\frac{8,44}{7,16-9,87}$
HCO ₃ ⁻ , мг/л HCO ₃ ⁻ , mg/l	$\frac{17,5}{11,0-21,9}$	$\frac{4,8}{4,3-5,5}$	-	$\frac{8,2}{5,7-11,4}$	$\frac{12,9}{11,8-16,5}$	$\frac{78,9}{33,7-153,3}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л SO ₄ ²⁻ , mg/l	$\frac{28,8}{16,8-40,3}$	$\frac{4,1}{3,1-8,5}$	-	$\frac{3,01}{2,08-6,90}$	$\frac{2,75}{2,04-6,40}$	$\frac{81,6}{37,0-270,0}$
Общая минерализация, мг/л Total mineralization, mg/l	$\frac{69,0}{43,8-90,5}$	$\frac{15,7}{13,6-26,0}$	-	$\frac{3,01}{2,08-6,90}$	$\frac{22,4}{20,0-31,3}$	$\frac{233,2}{143,5-619,0}$
Cu, мкг/л Cu, µg/l	$\frac{9,6}{6,3-18,1}$	$\frac{4,7}{2,0-11,0}$	-	$\frac{1,2}{0,5-3,4}$	$\frac{1,70}{0,20-18,0}$	$\frac{2,1}{0,8-11,3}$
Ni, мкг/л Ni, µg/l	$\frac{116}{74-182}$	$\frac{7,4}{4,7-17,0}$	-	$\frac{1,2}{0,5-3,6}$	$\frac{0,9}{0,1-3,0}$	$\frac{2,3}{0,4-8,2}$

ной близости от предприятия медно-никелевого производства, испытывая, помимо воздушного загрязнения, также интенсивное влияние промышленных стоков Кольской ГМК. Показатели содержания меди и никеля в воде данного водоема в 2–8 и 16–129 раз выше по сравнению с другими рассматриваемыми водоемами (табл. 1). Оз. Шуонияур входит в импактную зону воздействия предприятия [Раткин, 2006]. На более значительном расстоянии от источника азротехногенной эмиссии находятся озера Иля-Наутсиярви, Виртуовошъяур, Кочеяур и Ковдор (рис. 1). Последнее в то же время расположено в зоне воздействия предприятия Ковдорский ГОК, обуславливающего более высокие показатели сульфат-ионов, гидрокарбонат-ионов и общей минерализации (табл. 1).

Отбор материалов проводился стандартным набором ставных сетей длиной 30 м и высотой 1,5 м с размерами ячеи от 8 до 55 мм, из нейлонового монофиламента. Обработка ихтиологического материала проводилась согласно ранее описанным методикам [Правдин, 1966; Кашулин и др., 1999].

Для определения содержания Cu, Ni и Zn отбирались образцы печени, почек, жабр и мышечной ткани. Для исключения возрастных вариаций аккумуляции ТМ в организмах отбор материала проводился у рыб со сходными размерно-весовыми показателями. Вскрытие и отбор проб проводили с использованием ножей, пинцетов и скальпелей из нержавеющей стали. Полученные образцы замораживали для дальнейшего анализа. В лабораторных усло-



Рис. 1. Схема района исследований: 1 – оз. Куэтсьярви 69.441814°, 30.167189°; 2 – оз. Шуонияур 69.244156°, 30.007887°; 3 – оз. Иля-Наутсиярви 68.825404°, 29.104949°; 4 – оз. Виртуовошъяур 68.767815°, 28.810493°; 5 – оз. Кочеяур 68.596075°, 28.680380°; 6 – оз. Ковдор 67.553845°, 30.487454°. Указана «роза ветров» метеостанции пгт. Никель [Архив..., 2019]

Fig. 1. Study area: 1 – Lake Kuetsjarvi 69.441814°, 30.167189°; 2 – Lake Shuonijaur 69.244156°, 30.007887°; 3 – Lake Ilya-Nautsjarvi 68.825404°, 29.104949°; 4 – Lake Virtuovoshjaur 68.767815°, 28.810493°; 5 – Lake Kochejaur 68.596075°, 28.680380°; 6 – Lake Kovdor 67.553845°, 30.487454°. Rose of wind according to weather station data of Nickel City is indicated [Archives..., 2019]

виях их высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 90 °С, после чего органическую матрицу удаляли в растворе концентрированной азотной кислоты в микроволновой системе разложения (Multivave 3000,

Anton Paar, Австрия) с дальнейшей фильтрацией. Определение содержания меди и никеля в жабрах, почках и печени проводилось методом атомно-адсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени или графитовых трубах

с использованием приборов Perkin-Elmer 5000 с графитовой печью HGA-400. Концентрация металлов выражалась в мкг/г сухого веса тканей. Образцы растворов для определения металлов сравнивались с сертифицированным стандартным образцом Fluka Chemie GmbH (Швейцария). Контроль качества осуществлялся с использованием стандартных образцов DORM-2.

Результаты и обсуждение

Озера в пределах рассматриваемой области ЗПФ характеризуются наличием в составе ихтиофауны таких распространенных видов, как: обыкновенный голец (*Phoxinus phoxinus* (L., 1758)), налим (*Lota lota* (L., 1758)), речной окунь (*Perca fluviatilis* (L., 1758)), обыкновенный ерш (*Gymnocephalus cernuus* (L., 1758)), обыкновенная щука (*Esox lucius* (L., 1758)), девятиглая колюшка (*Pungitius pungitius* (L., 1758)). Нередки в уловах также арктический голец (*Salvelinus alpinus* (L., 1758)), кумжа (*Salmo trutta* (L., 1758)), обыкновенный сиг (*Coregonus lavaretus* (L., 1758)), европейская ряпушка (*Coregonus albula* (L., 1758)). Для водоемов бассейна Князегубского/Иовского водохранилища помимо указанных видов также характерны представители карповых – плотва (*Rutilus rutilus* (L., 1758)), язь (*Leuciscus idus* (L., 1758)) и лещ (*Abramis brama* (L., 1758)). В большинстве малых озер побережья Баренцева моря отмечается трехглая колюшка (*Gasterosteus aculeatus* (L., 1758)) [Правдин, 1954; Галкин и др., 1966; Рыбы..., 2010].

Обыкновенный сиг отмечен во всех исследованных водоемах, за исключением оз. Шуонияур, в котором обитают главным образом кумжа и арктический голец. Поскольку сиг, окунь и щука являются наиболее распространенными представителями фауны рыб, сравнительный анализ пространственно-временных закономерностей накопления ТМ проводился для указанных видов. Интенсивность накопления ТМ в организмах рыб неравномерна. Наиболее высокие значения содержания меди для всех озер и рассматриваемых видов отмечались в печени, никеля – в почках. Концентрация цинка достигала наиболее высоких величин в почках и жабрах. Указанные органы-мишени были выбраны в качестве репрезентативного критерия токсикологической нагрузки на организмы рыб.

Многолетний анализ содержания Си в организмах рыб одного возрастного состава и со сходными размерно-весовыми характеристиками подтверждает ранее установленные закономерности [Ylikörkkö et al., 2015] об увеличении интенсивности нагрузки на оз. Куэтсьярви. Отмечено, что концентрации металла были

выше у сига (табл. 2), достигая у отдельных особей максимального содержания в печени – 196 мкг/г, а в почках – 112,5 мкг/г сух. веса. Видоспецифичность накопления была статистически подтверждена по содержанию Си в печени сига и щуки ($t = 6,86$; $p < 0,001$), сига и окуня ($t = 6,06$; $p < 0,001$) (рис. 2).

Аналогичная особенность отмечена и для Ni, содержание которого в почках рассматриваемых рыб, в особенности у сига, достигало 59 мкг/г сух. веса. Статистически значимые различия его накопления в почках между рассматриваемыми видами выявлены для сига и щуки ($t = 7,90$; $p < 0,001$), сига и окуня ($t = 10,80$; $p < 0,001$). Отмечено, что содержание Zn в почках и жабрах сига, щуки и окуня имеет наиболее высокие значения в отличие от Си и Ni. У сига концентрация Zn в почках достигала 984, в жабрах – более 1000 мкг/г, а у щуки до 816 (почки) и 834 (жабры) мкг/г (табл. 2).

В оз. Шуонияур анализировались уровни накопления ТМ в организмах арктического гольца и кумжи. Было отмечено, что содержание Си в печени кумжи достигает 285 мкг/г сух. веса (табл. 2), накопление Си в печени гольца возросло за последнее десятилетие (рис. 3). Концентрация Ni в почках была наиболее высокой у гольца (до 28 мкг/г сух. веса). Для Ni, в отличие от Си, отмечается противоположная тенденция – снижение уровней его накопления у кумжи и гольца за последние годы (рис. 3). Видоспецифичность накопления Ni в почках гольца и кумжи была статистически подтверждена ($t = 3,94$; $p < 0,001$).

Очевидно, что влияние Ni на рыб более выражено вблизи предприятия цветной металлургии. Ранее нами было показано, что никель определяет интенсивность накопления других ТМ в организмах рыб [Kashulin et al., 2011]. По мере удаления водоема от источника загрязнения в органах рыб отмечается рост содержания Си.

Элемент Zn, имеющий наиболее высокие абсолютные показатели содержания в тканях рыб, способен усиливать токсическое воздействие никеля и меди на организм [Моисеенко и др., 2002]. Максимальные показатели его накопления были отмечены у кумжи в почках (до 298 мкг/г) и жабрах (до 535 мкг/г). Показано, что накопление Си в жабрах гольца и кумжи имеет достоверные отличия ($t = 10,02$; $p < 0,001$).

У рыб оз. Иля-Наутсиярви наиболее высокая концентрация Си отмечалась в печени и почках. Среднее содержание Си в печени сига достигало 38, а в почках – 16,3 мкг/г сух. веса (табл. 3). Максимальное содержание Ni в данном водоеме отмечено в почках сига (до 34 мкг/г). Вы-

Таблица 2. Содержание Cu, Ni и Zn в органах рыб оз. Куэтсъярви и оз. Шуонияур

Table 2. Concentration of Cu, Ni and Zn in fish organs of Lakes Kuetsyarvi and Shuoniyaur

	Показатель Index	Жабры gills	Мышцы muscle	Печень liver	Почки kidneys
сиг, оз. Куэтсъярви whitefish, Lake Kuetsjarvi					
Cu	mean ± SD	6,94 ± 3,32	0,94 ± 0,25	50,42 ± 31,81	15,57 ± 6,50
	min-max	1,30-42,57	0,51-1,92	13,71-195,82	3,67-112,50
Ni	mean ± SD	10,75 ± 6,17	1,36 ± 0,94	5,57 ± 3,90	30,94 ± 10,86
	min-max	2,49-42,62	0,13-6,84	1,27-21,38	5,16-59,05
Zn	mean ± SD	555,47 ± 307,21	20,44 ± 6,44	136,54 ± 38,25	373,33 ± 174,06
	min-max	191,57-2105,45	11,62-52,49	44,29-262,40	96,77-984,17
окунь, оз. Куэтсъярви perch, Lake Kuetsjarvi					
Cu	mean ± SD	2,36 ± 0,64	0,82 ± 0,37	12,61 ± 7,53	5,84 ± 4,11
	min-max	1,07-4,16	0,23-1,89	4,33-39,21	1,26-21,94
Ni	mean ± SD	3,70 ± 1,78	0,99 ± 0,57	1,39 ± 0,60	11,57 ± 33,28
	min-max	1,08-8,32	0,08-3,07	0,30-2,40	0,26-22,89
Zn	mean ± SD	81,79 ± 14,47	19,35 ± 3,24	90,78 ± 21,10	153,52 ± 70,64
	min-max	59,04-113,53	13,72-25,92	48,79-123,43	61,46-374,33
щука, оз. Куэтсъярви pike, Lake Kuetsjarvi					
Cu	mean ± SD	2,03 ± 0,65	0,90 ± 0,38	11,89 ± 4,97	5,91 ± 1,62
	min-max	1,06-3,83	0,60-2,74	5,14-26,67	2,52-9,45
Ni	mean ± SD	3,19 ± 1,06	0,87 ± 0,49	1,12 ± 0,38	7,90 ± 2,74
	min-max	1,65-6,42	0,06-2,58	0,35-1,94	3,75-15,87
Zn	mean ± SD	491,43 ± 119,55	19,42 ± 3,49	91,48 ± 26,26	418,03 ± 124,86
	min-max	307,12-834,03	13,53-31,97	49,60-180,36	253,46-816,12
голец, оз. Шуонияур charr, Lake Shuonijaur					
Cu	mean ± SD	3,52 ± 1,31	1,10 ± 0,16	130,92 ± 134,49	18,76 ± 9,92
	min-max	2,03-7,51	0,83-1,52	6,39-500,67	9,38-47,27
Ni	mean ± SD	3,91 ± 1,55	1,20 ± 0,60	1,84 ± 0,52	10,81 ± 7,00
	min-max	2,35-9,79	0,70-2,51	1,20-3,48	3,11-28,13
Zn	mean ± SD	122,19 ± 22,46	18,18 ± 4,00	153,22 ± 44,97	178,23 ± 56,63
	min-max	68,41-172,19	14,39-33,00	81,37-267,54	97,75-304,88
кумжа, оз. Шуонияур trout, Lake Shuonijaur					
Cu	mean ± SD	3,25 ± 1,08	1,04 ± 0,23	180,20 ± 65,28	7,56 ± 2,03
	min-max	2,16-5,03	0,56-1,41	92,12-285,03	3,92-12,16
Ni	mean ± SD	3,30 ± 0,88	0,73 ± 0,13	1,28 ± 0,24	4,63 ± 1,32
	min-max	2,25-5,47	0,56-1,01	0,92-1,72	2,56-7,60
Zn	mean ± SD	368,93 ± 77,93	19,61 ± 3,80	108,73 ± 22,77	254,66 ± 35,39
	min-max	285,85-534,70	16,45-29,70	88,83-172,67	178,28-298,09

явлена статистически достоверная видовая специфичность накопления меди между сигом и щукой/окунем в печени ($t = 2,17/3,94$; $p < 0,001$) и почках ($t = 3,16/4,71$; $p < 0,0001$). Для Ni подобных закономерностей не выявлено. Содержание Zn в исследованных органах рыб было выше у щуки. Значительная концентрация элемента отмечена также в жабрах сига (табл. 3). Выявлены достоверные отличия в содержании Zn у щуки и окуня в почках ($t = 7,45$;

$p < 0,0001$) и жабрах ($t = 22,58$; $p < 0,0001$), у щуки и сига в почках ($t = 5,41$; $p < 0,0001$).

Отмечено, что показатели содержания Cu в организмах рыб оз. Виртуовошъяур за период наблюдений (2005–2013 гг.) не претерпели существенных изменений. В печени и почках, где накопление Cu происходит более интенсивно, концентрации металла были выше у сига. Причем для данного вида отмечена устойчивая тенденция к увеличению содержания Cu в печени

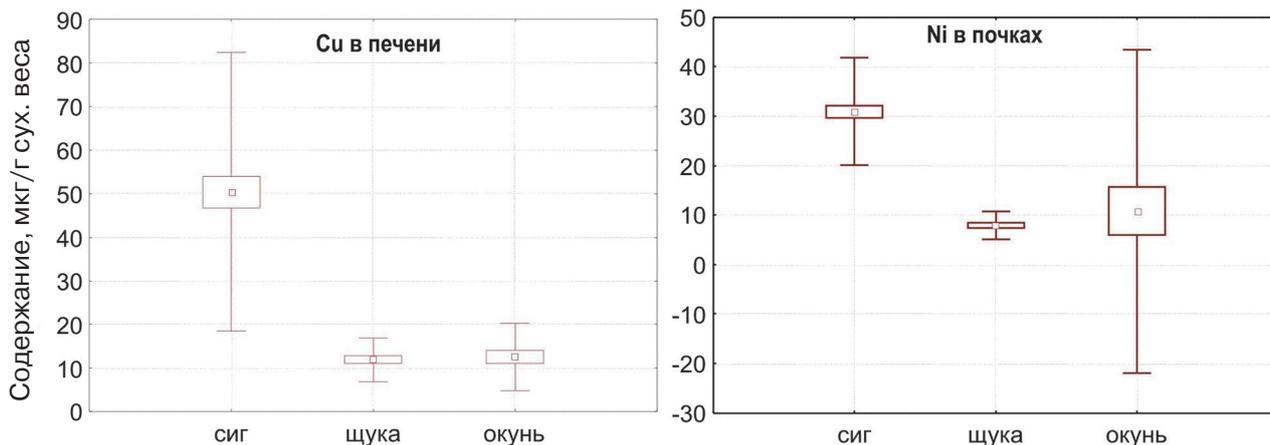


Рис. 2. Содержание меди и никеля у рыб оз. Куэтсъярви (в мкг/г сухого веса)

Fig. 2. Cu and Ni in fishes of Lake Kuetsjarvi (in ppm dry weight)

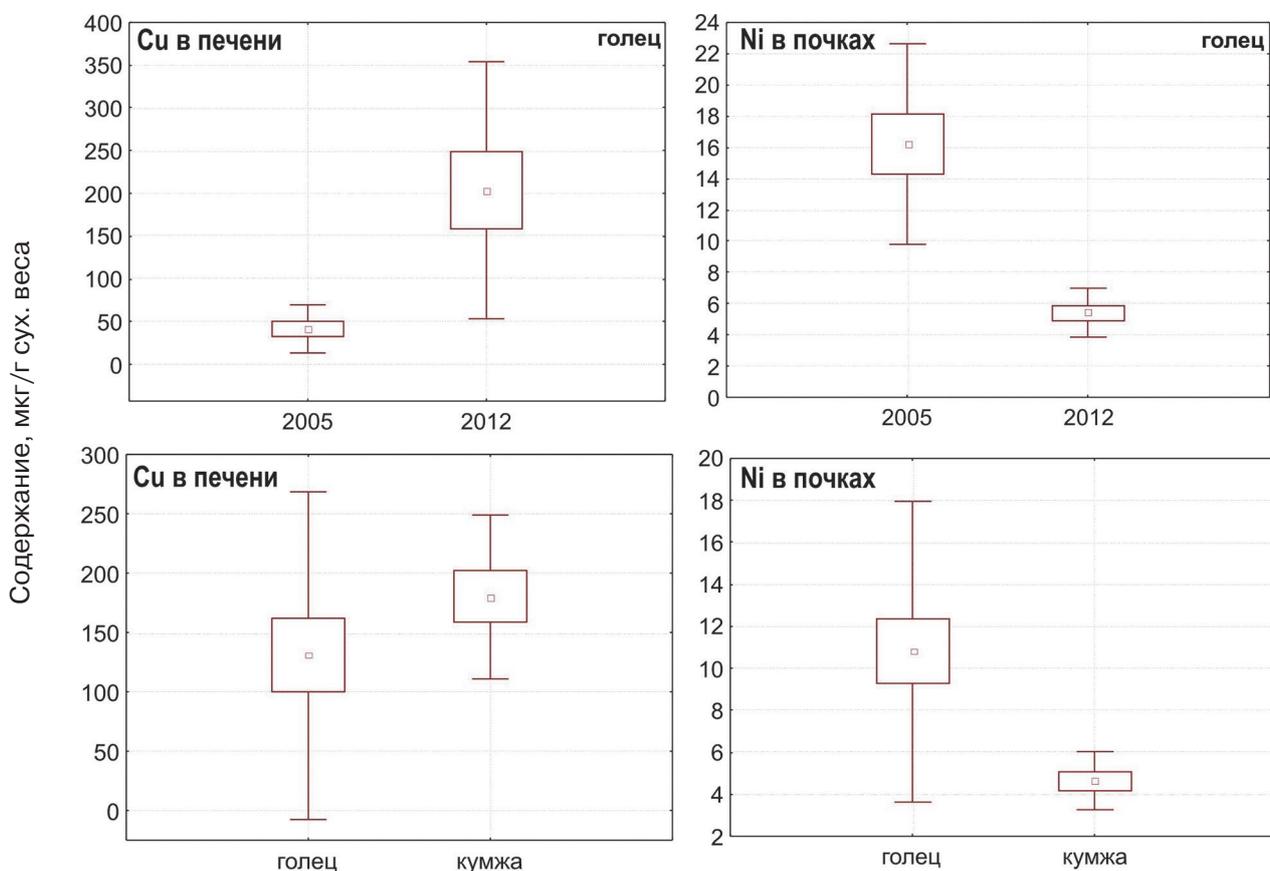


Рис. 3. Содержание меди и никеля у рыб оз. Шуонияур (в мкг/г сухого веса)

Fig. 3. Cu and Ni in fishes of Lake Shuonijaur (in ppm dry weight)

на протяжении последнего десятилетия (рис. 4). Это может свидетельствовать о сохраняющемся уровне нагрузки Cu на водоемы приграничного района за счет как процессов аэротехногенного переноса, так и поступления с территорий водосборных бассейнов. Анализ содержания ТМ в колонках донных отложений (ДО) показал, что ее поступление в водоем на протяжении последних десятилетий сохраняет тенденцию к ро-

сту [Даувальтер и др., 2015]. Наиболее высокое содержание Cu в печени отдельных особей сига достигало 174, в почках – 165 мкг/г (табл. 3). Видоспецифичность накопления Cu в печени и почках окуня и щуки статистически подтверждена по отношению к сигу ($t = 2,96-4,76$; $p < 0,001$).

Для Ni отмечена тенденция к снижению уровня его накопления в анализируемых органах всех рассматриваемых видов (рис. 4).

Таблица 3. Содержание Cu, Ni и Zn в органах рыб оз. Иля-Наутсиярви и оз. Виртуовошъяур
 Table 3. Concentration of Cu, Ni and Zn in fish organs of Lakes Ilya-Nautsijarvi and Virtuovoshjaur

	Показатель Index	жабры gills	мышцы muscle	печень liver	почки kidneys
сиг, оз. Иля-Наутсиярви whitefish, Lake Ilya-Nautsijarvi					
Cu	mean ± SD	1,26 ± 0,23	0,69 ± 0,11	37,91 ± 18,80	16,28 ± 7,35
	min-max	0,90-1,59	0,45-0,84	16,67-73,01	8,59-34,20
Ni	mean ± SD	1,15 ± 0,55	0,53 ± 0,16	0,90 ± 0,27	2,38 ± 1,90
	min-max	0,63-2,56	0,21-0,70	0,52-1,41	1,12-7,32
Zn	mean ± SD	459,42 ± 288,22	18,10 ± 3,87	208,64 ± 67,27	287,14 ± 93,07
	min-max	169,09-1125,15	13,72-25,45	124,44-334,40	198,33-504,72
окунь, оз. Иля-Наутсиярви perch, Lake Ilya-Nautsijarvi					
Cu	mean ± SD	1,38 ± 0,17	0,77 ± 0,16	11,65 ± 5,75	4,41 ± 1,56
	min-max	1,05-1,70	0,55-1,11	5,67-23,72	2,93-8,43
Ni	mean ± SD	1,39 ± 0,25	0,73 ± 0,17	0,91 ± 0,21	1,66 ± 1,01
	min-max	1,03-1,72	0,56-1,11	0,63-1,22	0,87-4,54
Zn	mean ± SD	91,77 ± 7,29	18,56 ± 2,31	103,89 ± 20,79	25,80
	min-max	83,00-108,66	13,37-20,72	72,63-137,61	181,48
щука, оз. Иля-Наутсиярви pike, Lake Ilya-Nautsijarvi					
Cu	mean ± SD	1,80 ± 0,16	0,69 ± 0,13	22,16 ± 9,67	6,28 ± 0,84
	min-max	1,56-2,13	0,52-1,03	13,27-45,69	5,25-7,64
Ni	mean ± SD	1,65 ± 0,68	0,74 ± 0,15	0,55 ± 0,24	1,13 ± 0,22
	min-max	0,75-3,21	0,54-1,01	0,31-1,05	0,81-1,57
Zn	mean ± SD	525,92 ± 57,21	19,58 ± 1,68	241,73 ± 100,98	938,25 ± 330,21
	min-max	432,57-609,14	16,68-21,84	102,00-450,12	411,57-1470,50
сиг, оз. Виртуовошъяур whitefish, Lake Virtuovoshjaur					
Cu	mean ± SD	1,99 ± 0,65	0,93 ± 0,30	56,17 ± 37,75	31,01 ± 13,92
	min-max	1,18-4,40	0,50-1,70	11,00-174,09	6,78-165,00
Ni	mean ± SD	2,59 ± 5,20	0,78 ± 0,19	1,14 ± 0,56	4,48 ± 1,26
	min-max	0,82-29,97	0,47-1,17	0,61-6,14	1,75-15,00
Zn	mean ± SD	426,15 ± 238,71	17,96 ± 3,92	234,24 ± 70,91	345,83 ± 122,43
	min-max	148,45-1090,36	13,46-29,49	77,52-440,91	166,67-677,21
окунь, оз. Виртуовошъяур perch, Lake Virtuovoshjaur					
Cu	mean ± SD	1,47 ± 0,31	0,99 ± 0,38	13,01 ± 6,09	7,22 ± 3,52
	min-max	1,02-2,19	0,54-8,38	6,03-36,64	3,34-16,72
Ni	mean ± SD	2,60 ± 0,85	0,62 ± 0,09	1,18 ± 0,33	3,38 ± 2,15
	min-max	1,31-4,57	0,44-0,83	0,46-1,92	0,63-8,60
Zn	mean ± SD	76,77 ± 12,41	18,36 ± 2,30	114,72 ± 22,64	116,94 ± 21,91
	min-max	56,88-110,13	15,08-25,07	87,00-213,33	57,46-187,50
щука, оз. Виртуовошъяур pike, Lake Virtuovoshjaur					
Cu	mean ± SD	1,69 ± 0,28	0,80 ± 0,17	13,79 ± 9,65	10,02 ± 5,74
	min-max	1,30-2,42	0,60-1,26	6,54-40,07	4,99-26,87
Ni	mean ± SD	3,51 ± 0,91	0,91 ± 0,26	0,73 ± 0,22	2,80 ± 1,71
	min-max	1,75-5,02	0,56-1,50	0,46-1,16	1,16-6,41
Zn	mean ± SD	519,11 ± 101,97	21,73 ± 3,58	338,28 ± 67,53	1049,11 ± 459,81
	min-max	348,57-762,24	15,35-30,28	219,66-509,47	363,40-1832,34

В почках сига среднее содержание металла находилось на уровне 4,5 мкг/г (табл. 3). У окуня и щуки аналогичные показатели не превышали

3,4 и 2,8 мкг/г сух. веса соответственно. Между рассматриваемыми видами рыб не было отмечено достоверных отличий в накоплении Ni.

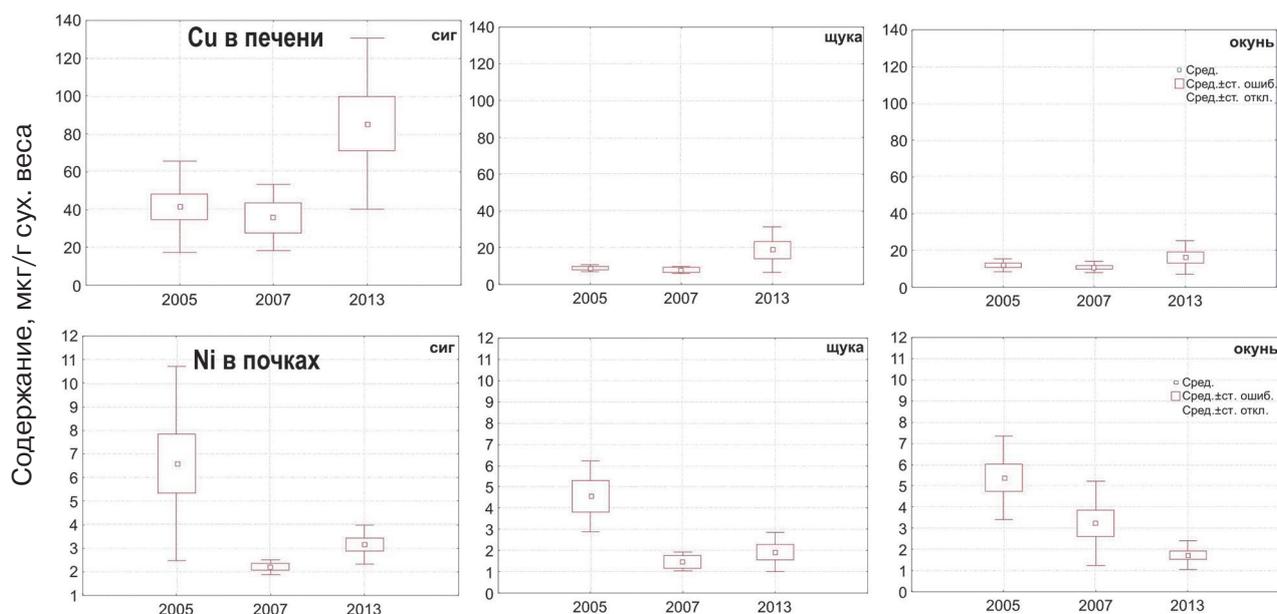


Рис. 4. Содержание меди и никеля в рыбах оз. Виртуовошъяур за различные периоды исследований (в мкг/г сухого веса)

Fig. 4. Cu and Ni concentration in fishes of Lake Virtuovoshjaur (in ppm dry weight)

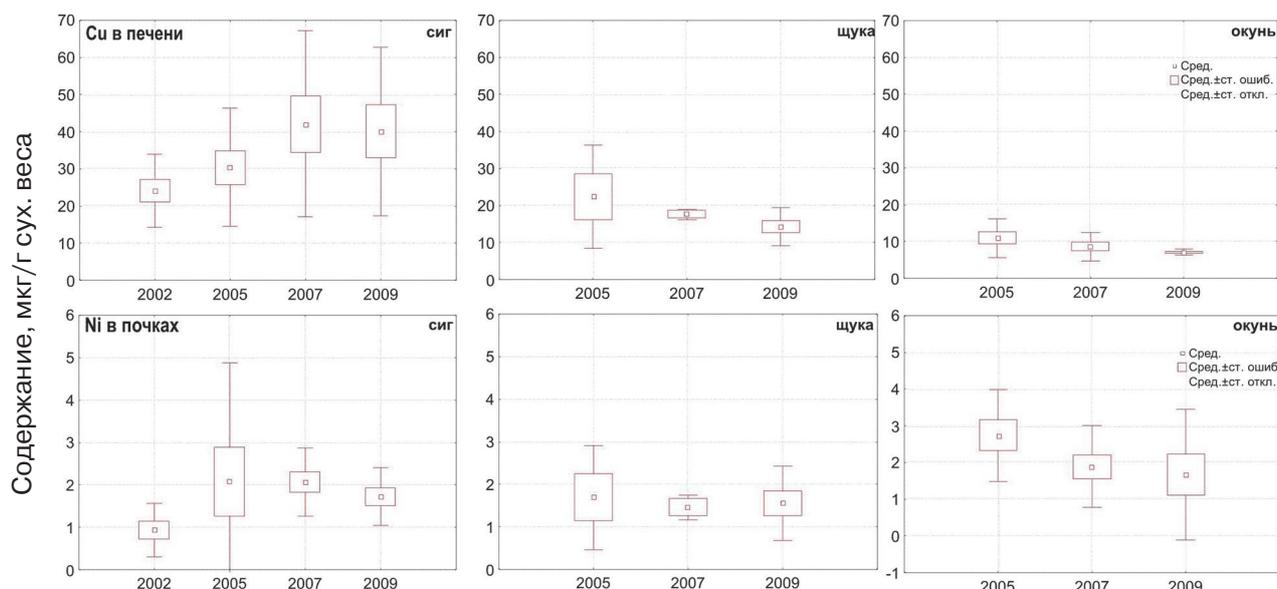


Рис. 5. Содержание меди и никеля в рыбах оз. Кочеяур за различные периоды исследований (в мкг/г сухого веса)

Fig. 5. Cu and Ni concentration in fishes of Lake Kochejaur (in ppm dry weight)

Концентрация Zn в органах сига, окуня и щуки оз. Виртуовошъяур на протяжении последнего десятилетия остается на прежнем уровне. Наиболее высокие показатели содержания данного металла отмечались в почках и жабрах рыб. У сига концентрация Zn в почках достигала 677, в жабрах – более 1000 мкг/г, а у щуки – до 1832 мкг/г (почки) и 762 мкг/г (жабры) (табл. 3).

В оз. Кочеяур за исследованный период выявлено незначительное снижение показателей содержания Cu в печени у щуки и окуня,

в то время как для сига отмечена обратная закономерность (рис. 5). В данном водоеме Cu также наиболее интенсивно накапливается в организме сига, имеющего бентосный тип питания. Различия в уровнях накопления Cu в печени сигом и остальными видами статистически подтверждаются ($t = 3,33-4,60$; $p < 0,001$). Среднее содержание меди в печени рыб варьировало от 34 мкг/г у сига до 8,9 мкг/г у щуки и 17,3 мкг/г сух. веса у окуня (табл. 4). Средняя величина концентрации Ni в почках возрастает

Таблица 4. Содержание Cu, Ni и Zn в органах рыб оз. Кочегур и оз. Ковдор

Table 4. Concentration of Cu, Ni and Zn in fish organs of Lakes Kochejaur and Kovdor

	Показатель Index	жабры gills	мышцы muscle	печень liver	почки kidneys
сиг, оз. Кочегур whitefish, Lake Kochejaur					
Cu	mean ± SD	2,10 ± 0,83	0,79 ± 0,16	34,19 ± 19,78	17,34 ± 8,97
	min-max	0,51-4,41	0,46-1,21	8,38-99,36	6,02-40,40
Ni	mean ± SD	1,45 ± 0,90	0,81 ± 0,29	0,83 ± 0,31	1,77 ± 1,59
	min-max	0,29-4,52	0,28-1,61	0,22-1,44	0,34-10,87
Zn	mean ± SD	205,94 ± 72,17	18,85 ± 4,46	333,81 ± 183,61	213,94 ± 132,67
	min-max	91,08-413,04	11,51-31,42	119,57-1072,54	57,60-696,63
окунь, оз. Кочегур perch, Lake Kochejaur					
Cu	mean ± SD	1,93 ± 0,44	0,77 ± 0,17	8,87 ± 3,95	4,77 ± 1,38
	min-max	1,27-3,31	0,54-1,30	5,05-23,27	1,42-21,11
Ni	mean ± SD	2,19 ± 1,30	0,70 ± 0,29	0,90 ± 0,34	2,07 ± 1,41
	min-max	1,18-8,97	0,38-1,72	0,34-2,41	0,42-6,68
Zn	mean ± SD	78,83 ± 6,65	19,47 ± 2,32	102,16 ± 13,29	140,41 ± 48,01
	min-max	59,46-92,73	16,20-25,83	74,30-128,56	47,23-872,36
щука, оз. Кочегур pike, Lake Kochejaur					
Cu	mean ± SD	2,20 ± 0,38	1,01 ± 0,48	17,26 ± 8,63	7,07 ± 2,14
	min-max	1,73-3,34	0,54-2,02	6,64-38,21	5,27-11,89
Ni	mean ± SD	3,66 ± 0,87	0,71 ± 0,15	0,80 ± 0,24	1,59 ± 0,88
	min-max	2,10-5,67	0,51-1,05	0,39-1,42	0,83-3,86
Zn	mean ± SD	342,08 ± 46,36	20,28 ± 3,35	154,44 ± 42,07	464,76 ± 199,13
	min-max	283,53-472,09	15,12-26,88	75,74-650,42	253,48-1094,27
сиг, оз. Ковдор whitefish, Lake Kovdor					
Cu	mean ± SD	2,07 ± 0,49	1,19 ± 0,26	12,25 ± 3,29	9,05 ± 2,96
	min-max	1,35-3,26	0,76-1,73	8,13-19,46	3,77-74,78
Ni	mean ± SD	1,51 ± 0,78	0,68 ± 0,18	1,11 ± 0,39	1,47 ± 1,11
	min-max	0,62-4,80	0,43-1,01	0,60-2,09	0,22-5,48
Zn	mean ± SD	234,29 ± 110,11	24,03 ± 5,78	163,35 ± 37,69	217,34 ± 62,35
	min-max	104,68-527,69	16,65-39,71	109,39-213,61	141,80-406,63
ряпушка, оз. Ковдор vendace, Lake Kovdor					
Cu	mean ± SD	1,78 ± 0,46	1,15 ± 0,52	24,10 ± 8,73	5,04 ± 1,92
	min-max	1,28-3,04	0,71-2,88	8,46-72,32	1,85-8,20
Ni	mean ± SD	1,18 ± 0,65	0,60 ± 0,24	1,12 ± 0,71	2,64 ± 1,48
	min-max	0,32-2,60	0,17-1,25	0,33-3,33	0,54-5,36
Zn	mean ± SD	112,90 ± 11,80	22,19 ± 5,10	263,64 ± 104,48	193,51 ± 43,92
	min-max	84,87-130,69	15,75-33,35	119,28-612,06	144,41-296,44

в ряду: щука (1,6 мкг/г) > сиг (1,8 мкг/г) > окунь (2,1 мкг/г сух. веса). Анализ долговременных особенностей накопления Ni в почках хищных рыб и бентофагов позволяет предположить, что его нагрузка на водоем в течение рассматриваемого десятилетия не снижается. Достоверные отличия в содержании ТМ между всеми исследованными видами отмечены в показателях накопления меди в печени ($t = 8,87-34,19$; $p < 0,001$). Концентрация Zn достигает наибо-

лее высоких значений в печени, почках и жабрах сига и щуки. У отдельных особей концентрация цинка в органах превышала 1000 мкг/г (табл. 4). Видовая специфичность в накоплении Zn у сига, щуки и окуня статистически подтверждена: печень ($t = 2,74-5,18$; $p < 0,001$), почки ($t = 2,32-7,18$; $p < 0,05$).

Тяжелые металлы не являются приоритетными загрязняющими веществами предприятия Ковдорский ГОК, прямому воздействию

Удаленность водоема от источника загрязнения

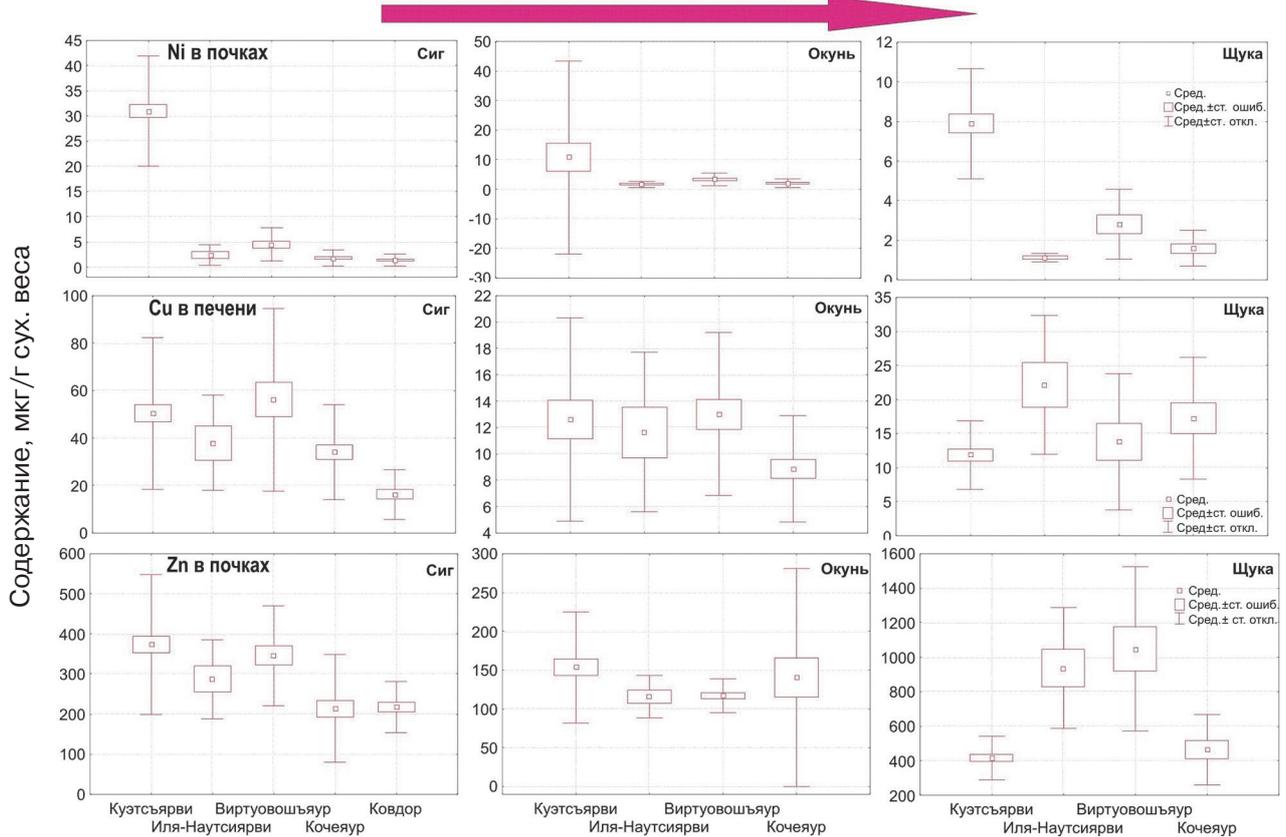


Рис. 6. Содержание тяжелых металлов в рыбах исследованных озер, расположенных на различном удалении от источника воздушного загрязнения (в мкг/г сухого веса)

Fig. 6. Heavy metals concentration in fishes of the studied lakes located at different distances from the air pollution source (in ppm dry weight)

которого подвержено оз. Ковдор. Содержание меди в печени сига в среднем достигало 12,3, а у ряпушки – 24,1 мкг/г сух. веса (табл. 4). Концентрация Ni в органах ряпушки характеризовалась наиболее высокими средними величинами (до 2,6 мкг/г сух. веса). Отличия накопления Cu и Ni в печени и почках между сигом и ряпушкой были статистически достоверными ($t = 2,07$ и $3,28$; $p < 0,05$). Максимальные показатели содержания Zn отмечены в печени сига (612 мкг/г сух. веса).

Закономерности градиентного накопления ТМ в организмах рыб и ДО, связанного с влиянием Кольской ГМК, были отмечены ранее для водохранилищ бассейна р. Пасвик [Amundsen et al., 2011; Dauvalter et al., 2011; Kashulin et al., 2011; Rognerud et al., 2013]. Территория в районе комбината характеризуется преобладанием ветров южного и юго-западного направления [Архив..., 2019]. Принято считать, что загрязнения от действующих производств и зон захоронения вредных веществ распространяются в зависимости от «розы ветров», доминирующей в данном регионе [Хохлов, 2004]. В то же время

было показано, что на территории региональной фоновой зоны (свыше 30 км от источника воздушного загрязнения) выпадение загрязняющих веществ (Cu и Ni) определяется вымывающей способностью атмосферных осадков и в меньшей степени зависит от интенсивности и направления ветра [Раткин, 2006]. Таким образом, антропогенная нагрузка на водные экосистемы при воздушном загрязнении может определяться их удаленностью от локального источника эмиссии, величиной площади водосбора, проточностью водоема, накоплением загрязняющих веществ в ДО. Исследуемая область, несмотря на природоохранный статус ряда ООПТ федерального и регионального значения, расположенных в пределах ЗПФ, подвержена воздействию промышленных выбросов Кольской ГМК. Анализ пространственных особенностей аккумуляции ТМ у рыб исследованных водоемов показал, что в целом для водоемов характерно градиентное накопление Cu, Ni и Zn в органах сига и окуня, которое может быть обусловлено деятельностью предприятия медно-никелевого производства (рис. 6). В отношении

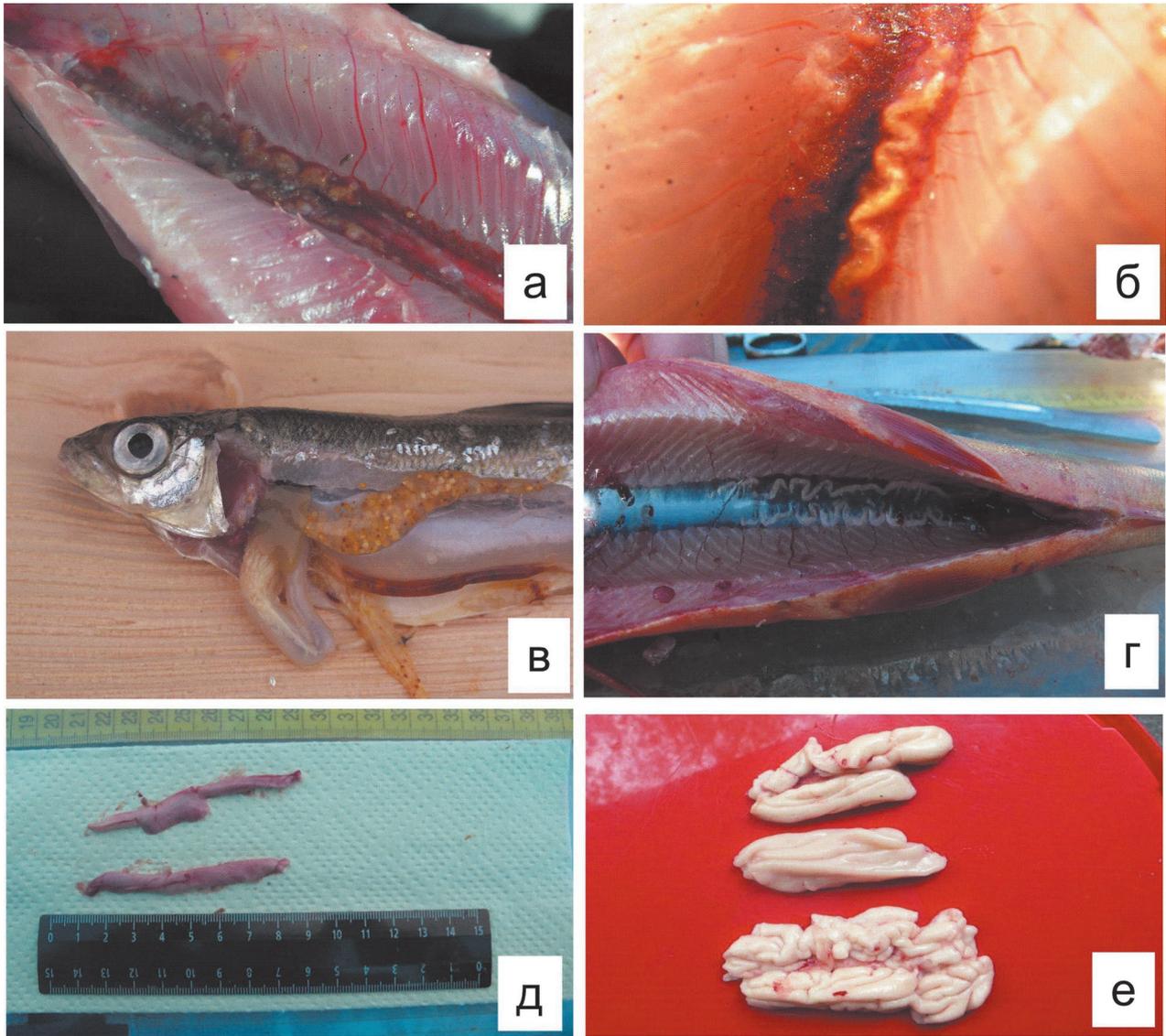


Рис. 7. Патологии рыб водоемов Зеленого пояса Фенноскандии:

а – почечнокаменная болезнь; б, г – соединительнотканые перерождения почек; в – патологические изменения внутренних органов; д, е – соединительнотканые перетяжки гонад сига и окуня

Fig. 7. Fish pathologies in the lakes of the Green Belt of Fennoscandia:

а – nephrocalcitosis; б, г – connective tissue degeneration in kidneys; в – strong pathology changes of internal organs; д, е – connective tissue degeneration in gonads of whitefish and perch

Си и Zn для щуки подобной закономерности не отмечено. Вероятно, интенсивность аккумуляции Си у хищного вида ниже по сравнению с сигом. Содержание Zn в тканях рыб, помимо влияния локальных источников, может определяться глобальным характером его распространения в атмосфере [Kashulin et al., 2011; Даувальтер и др., 2012].

Малые размеры озер при атмосферном типе их питания и значительных площадях водосборной поверхности обуславливают более интенсивное поступление загрязняющих веществ и аккумуляцию их в гидробионтах и донных отложениях. При этом чем больше площадь

водосборной поверхности, тем выше токсический потенциал накопленных на ее площади загрязняющих веществ, в конечном итоге поступающих в водоем. В то же время если водосбор озера невелик (озера Виртуовошъяур и Кочьяур) (табл. 1), поступление ТМ в водоем и накопление их в гидробионтах происходит значительно быстрее. Очевидно, этим объясняется более высокое содержание рассматриваемых ТМ в рыбах оз. Виртуовошъяур (рис. 6).

Известно, что на организменном уровне в качестве ответов на стресс у рыб развиваются патологические изменения органов и тканей, развитие новообразований, отдельные

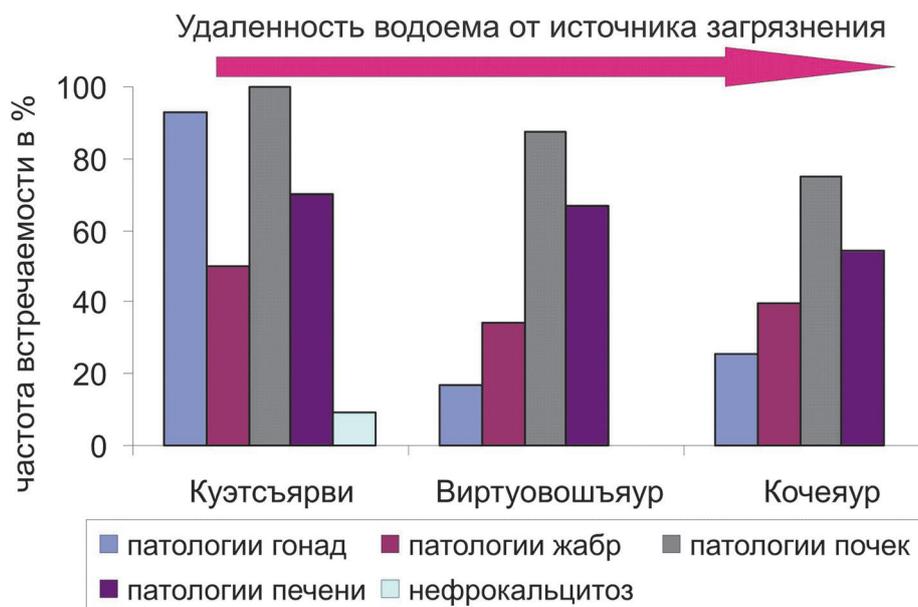


Рис. 8. Частота встречаемости патологических изменений внутренних органов сига исследованных водоемов, расположенных на различном удалении от источника воздушного загрязнения

Fig. 8. The frequency of internal organs pathologies of whitefish in the studied lakes located at different distances from the air pollution source

из которых являются специфическими на воздействие тяжелых металлов [Кашулин и др., 1999; Моисеенко, 2002; Triebleskorn et al., 2002; Weber et al., 2008]. Анализ встречаемости и интенсивности развития патологических изменений рыб исследованного района показал, что наиболее серьезные трансформации в организме отмечены у представителей ихтиофауны наиболее интенсивно загрязняемого водоема – оз. Куэтсьярви – и затрагивают практически все органы и ткани (рис. 7). Количество рыб с патологиями печени и почек в данном водоеме в отдельные годы достигало 100 % от общего количества исследованных особей. Здесь также регистрируются специфические патологии почек, выражающиеся в развитии почечнокаменной болезни (нефрокальцитоз) в ответ на токсическое влияние никеля. Частота встречаемости и интенсивность патологий печени и почек сига в водоеме в настоящее время остается на уровне 75–86 % от общего количества анализируемых рыб. Для арктического гольца оз. Шуонияур часто встречаемой патологией является образование соединительной ткани в заднем отделе почек (рис. 7). Интенсивность развития указанных изменений сохраняется на высоком уровне (у 89 % особей). У сига оз. Иля-Наутсиярви отмечались начальные стадии изменений печени (около 46 % особей). В озерах Кочеяур и Виртуовошъяур, несмотря на удаленность от источников аз-

ротехногенного загрязнения, также отмечен высокий процент особей с начальными проявлениями поражений почек, печени и жабр. Так, у сига оз. Виртуовошъяур выявлена наибольшая частота встречаемости нарушений в почках (до 88 % от общего количества особей в выборке), печени (до 67 %) и жабрах (34 %). Патологии печени сига оз. Кочеяур отмечены у 68 % особей от общего количества в выборке, почек – 38 % и репродуктивных органов – до 30 %. Трансформации внутренних органов рыб исследованных озер сходны по своим проявлениям с таковыми в интенсивно загрязняемом водоеме – оз. Куэтсьярви. Вероятно, развитие патологий обусловлено продолжительным сублетальным влиянием тяжелых металлов. Достаточно высокая частота встречаемости трансформаций печени и почек сига озер Виртуовошъяур и Кочеяур, значительно удаленных от источника загрязнения (рис. 8), может быть обусловлена малыми размерами площади водосбора (табл. 1), при которых ТМ за короткий срок поступают в водоем, оказывая патогенное воздействие на организм. Полученные результаты показывают, что пресноводные экосистемы рассматриваемого района подвержены отрицательному воздействию азротехногенного загрязнения ТМ. В то же время долговременное влияние предприятия цветной металлургии, начиная с 1940-х гг. прошлого столетия, привело к кардинальным преобра-

зованиям структуры сообществ гидробионтов и снижению биологического разнообразия главным образом малых водоемов, расположенных в пределах 10-км зоны от комбината. Как было показано ранее, в современных условиях опасность критического сокращения численности и биологического разнообразия рыб, трансформаций структуры планктонных, перифитонных и бентосных сообществ, снижающих ресурсный потенциал водоемов Севера, включая территорию ЗПФ, связана с комбинированным эффектом сохраняющегося антропогенного загрязнения и изменений климата. Усиление связанных с климатическими флуктуациями процессов антропогенного эвтрофирования и продукционных процессов в водоемах, отмечаемых в последнее десятилетие, приводит к интенсивному развитию, стремительным перестройкам структуры рыбной части сообществ в направлении смены доминирующих видов лососевых и сиговых представителями окуневых [Терентьев, Кашулин, 2012; Yiköörkkö et al., 2015].

Заключение

Анализ пространственно-временных особенностей накопления ТМ в организмах рыб показал, что сокращение объемов выбросов Никельской площадки Кольской ГМК (ранее «Печенганикель») за прошедшие десятилетия не привело к значительному уменьшению уровня антропогенной нагрузки на водоемы ЗПФ. Отмечается долговременная тенденция к увеличению содержания Си в органах сига, гольца, щуки и окуня всех исследованных озер и снижение уровня накопления никеля в рыбах водоемов локальной зоны (30 км) влияния медно-никелевого комбината.

Установлено, что отрицательные последствия аэротехногенного загрязнения Кольской ГМК на водоемы проявляются вне зависимости от доминирующих в течение года направлений ветра. У рыб исследованных озер отмечено градиентное накопление Си и Ni в органах-мишенях. Выявленная закономерность также согласуется с интенсивностью развития патологических трансформаций в организмах сига, поскольку изменения внутренних органов рыб удаленных водоемов сходны по характеру проявления с таковыми в интенсивно загрязняемом водоеме. При этом малые величины площади водосбора озер, по-видимому, обуславливают более высокую скорость поступления ТМ в водоем и последующее их накопление в организмах рыб. В конечном итоге концентрации загрязняющих веществ в рыбах удален-

ных от источника эмиссии водоемов могут быть сопоставимы с таковыми в озерах, расположенных в импактной зоне воздействия. В свою очередь, крупные водосборные бассейны являются своего рода «аккумуляторами» значительных объемов поллютантов, представляющих потенциальную опасность для гидробионтов на продолжительную перспективу и обуславливающих постоянное их поступление в водоемы.

Уровень накопления ТМ в органах сига практически во всех исследованных водоемах был выше в отличие от этого показателя у хищных видов (окунь и щука). Очевидно, в силу особенностей бентосного типа питания и обменных процессов сиг в большей степени подвержен негативному влиянию ТМ в сходных условиях обитания по сравнению со щукой и окунем. При оценке антропогенного влияния на пресноводные экосистемы этот вид является наиболее надежным тест-объектом, достоверно отражающим интенсивность нагрузки долговременного воздействия ТМ.

В современных условиях сохраняющейся антропогенной нагрузки ТМ на водоемы исследованной территории природные популяции рыб подвержены их токсическому влиянию, что на фоне процессов изменения климата может усиливать опасность снижения биологического разнообразия ихтиофауны в целом и сокращения численности ценных видов рыб. Отмечаемые эффекты необходимо учитывать при проектировании ООПТ ЗПФ и оценке состояния действующих охраняемых территорий.

Литература

Архив погоды в Никеле [Электронный ресурс]. URL: <https://world-Weather.ru/archive/russia/nikel/> (дата обращения: 04.04.2019).

Боровичев Е. А., Петрова О. В., Крышень А. М. О границах Зеленого пояса Фенноскандии в Мурманской области // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 8. С. 141–146. doi: 10.17076/bg770

Галкин Г. Г., Колюшев А. А., Покровский В. В. Ихтиофауна водохранилищ и озер Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Условия обитания, жизнь и промысел. Мурманск: ПИНРО, 1966. С. 177–193.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2012. № 2(9). С. 54–87.

Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амундсен П. А. Рыбы пресных вод субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 142 с.

Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Терентьев П. М., Денисов Д. Б. Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничные территории сопредельных стран. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с.

Моисеенко Т. И. Изменение физиологических показателей рыб как индикатор качества водной среды // Мониторинг природной среды Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1984. С. 51–57.

Моисеенко Т. И. Изменение стратегии жизненного цикла рыб под воздействием хронического загрязнения вод // Экология. 2002. № 1. С. 50–60.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Ликин А. А., Кудрявцева Л. П., Ильяшук Б. П., Ильяшук Е. А., Сандимиров С. С., Каган Л. Я., Вандыш О. И., Шаров А. Н., Шарова Ю. Н., Королева И. М. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 403 с.

Правдин И. Ф. Сиги водоемов Карело-Финской ССР. М.; Л.: Наука, 1954. 324 с.

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром-ть, 1966. 456 с.

Раткин Н. Е. Закономерности и уровни аэротехногенного загрязнения ландшафтов Мурманской области и Севера Скандинавии: Дис. ... докт. геогр. наук. Апатиты, 2006. 326 с.

Рыбы в заповедниках России. Пресноводные рыбы / Ред. Ю. С. Решетников. М.: КМК, 2010. Т. 1. 628 с.

Терентьев П. М., Кашулин Н. А. Трансформации рыбной части сообществ водоемов Мурманской области // Труды КНЦ РАН. 2012. № 2. С. 61–100.

Титов А. Ф., Буторин А. А., Громцев А. Н., Иешко Е. П., Крышень А. М., Савельев Ю. В. Зеленый пояс Фенноскандии: состояние и перспективы развития // Труды КарНЦ РАН. 2009. № 2. С. 3–11.

Хохлов Ю. В. Особенность распределения зон загрязнения от действующих производств и мест захоронения вредных веществ // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 4. С. 95–98.

Amundsen P.-A., Kashulin N. A., Terentjev P. M., Gjelland K., Koroleva I. M., Dauvalter V. A., Sandimi-

rov S. S., Kashulin A. N., Knudsen R. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse // Environ. Monitoring and Assessment. 2011. Vol. 182. P. 301–316.

Authman M. M. N., Zaki M. S., Khallaf E. A., Abbas H. H. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution // J. Aquac. Res. Development. 2015. Vol. 6. P. 328–341. doi: 10.4172/2155-9546.1000328

Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // J. Environ. Sci. Health. 2011. Part A. Vol. 46. P. 1020–1033.

Kashulin N. A., Terentjev P. M., Amundsen P.-A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N. Specific features of accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in two whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) morphs inhabiting the Inari – Pasvik lacustrine – riverine system // Inland Water Biol. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 383–392.

Rognerud S., Dauvalter V. A., Fjeld E., Skjelkvåle B. L., Christensen G., Kashulin N. A. Spatial trends of trace-element contamination in recently deposited lake sediment around the Ni – Cu smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic // AMBIO. 2013. Vol. 42, no. 6. P. 724–736.

Rose M., Fernandes A., Mortimer D., Baskaran C. Contamination of fish in UK fresh water systems: Risk assessment for human consumption // Chemosphere. 2015. Vol. 122. P. 183–189.

Triebleskorn R., Adam S., Casper H., Honnen W., Pawert M., Schramm M., Schwaiger J., Kohler H. Biomarkers as a diagnostic tools for evaluating effects of unknown Past Water quality conditions on stream organisms // Ecotoxicol. 2002. Vol. 11. P. 451–465.

Weber L. P., Dubé M. G., Rickwood C. J., Driedger K., Portt C., Breerton C., Janz D. M. Effects of multiple effluents on resident fish from Junction Creek, Sudbury, Ontario // Ecotoxicol. Environ. Safety. 2008. Vol. 70, no. 3. P. 433–445.

Ylikörkkö J., Christensen G., Kashulin N., Denisov D., Andersen H., Jelkänen E. Environmental challenges in the joint border area of Norway, Finland and Russia. Rovaniemi: centre for economic development, transport and the environment for Lapland, 2015. 169 p.

Поступила в редакцию 04.03.2019

References

Arkhir pogody v Nikel [Weather archives in Nikel]. URL: <https://world-weather.ru/archive/russia/nikel/> (accessed: 04.04.2019).

Borovich E. A., Petrova O. V., Kryshen' A. M. O granitsakh Zelenogo poyasa Fennoskandii v Murmanskoi oblasti [On the borders of the Green Belt of Fennoscandia in the Murmansk Region]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 8. P. 141–146. doi: 10.17076/bg770

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Tendentsii izmeneniya sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Severa Fennoskandii v poslednie stoletiya [Tendencies in the content change of heavy metals in lake sediments in Northern Fennoscandia over

the last centuries]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 9. P. 62–75. doi: 10.17076/lim40

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Sandimirov S. S. Tendentsii izmeneniya khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii presnovodnykh subarkticheskikh i arkticheskikh vodoemov pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov [Trends in the chemical composition of bottom sediments of freshwater Subarctic and Arctic water bodies under the influence of natural and anthropogenic factors]. *Trudy Kol'skogo nauch. tsentra RAN* [Proceed. Kola Sci. Center RAS]. 2012. No. 2(9). P. 54–87.

Galkin G. G., Kolyushev A. A., Pokrovskii V. V. Ikhtiofauna vodokhranilishch i ozer Murmanskoi oblasti [Fish fauna of reservoirs and lakes of the Murmansk Region].

Ryby Murmanskoi obl. Usloviya obitaniya, zhizn' i promysel' [Fish of the Murmansk Region. Environment, live, and fishery]. Murmansk: PINRO, 1966. P. 177–193.

Kashulin N. A., Lukin A. A., Amundsen P.-A. Ryby presnykh vod Subarktiki kak bioindikatory tekhnogenogo zagryazneniya [Fish of Subarctic freshwater systems as bioindicators of industrial pollution]. Apatity: KNTs RAS, 1999. 142 p.

Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S., Terent'ev P. M., Denisov D. B. Ekologicheskii katalog ozer Murmanskoi oblasti. Severo-zapadnaya chast' Murmanskoi oblasti i prigranichnye territorii sopredel'nykh stran [An ecological catalogue of lakes of the Murmansk Region. North-western part of the Murmansk Region and adjacent territories of neighbouring countries]. Apatity: KNTs RAS, 2009. 226 p.

Khokhlov Yu. V. Osobennost' raspredeleniya zon zagryazneniya ot deistvuyushchikh proizvodstv i mest zakhroneniya vrednykh veshchestv [A peculiarity of pollution zones distribution from existing industries and harmful substances disposal]. *Sovr. naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies]. 2004. No. 4. P. 95–98.

Moiseenko T. I. Izmenenie fiziologicheskikh pokazatelei ryb kak indikator kachestva vodnoi sredy [Changes in the physiological parameters of fish as an indicator of aquatic environment quality]. Apatity: KNTs RAS, 1984. P. 51–57.

Moiseenko T. I. Izmenenie strategii zhiznennogo tsikla ryb pod vozdeistviem khronicheskogo zagryazneniya vod [Changing the strategy of the fish life cycle under the influence of chronic water pollution]. *Ekol.* [Russ. J. Ecol.]. 2002. No. 1. P. 50–60.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Lukin A. A., Kudravtseva L. P., Ilyashuk B. P., Ilyashuk E. A., Sandimirov S. S., Kagan L. Y., Vandysh O. I., Sharov A. N., Sharova Y. N., Koroleva I. M. Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra [Man-induced modification of the ecosystem of Lake Imandra]. Moscow: Nauka, 2002. 403 p.

Pravdin I. F. Sigi vodoemov Karelo-Finskoi SSR [Whitefish of reservoirs of the Karelian-Finnish SSR]. Moscow; Leningrad: Nauka, 1954. 324 p.

Pravdin I. F. Rukovodstvo po izucheniyu ryb [Guidelines for fish study]. Moscow: Pishch. prom., 1966. 456 p.

Ratkin N. E. Zakonomernosti i urovni aerotekhnogenogo zagryazneniya landshaftov Murmanskoi oblasti i Severa Skandinavii [Patterns and levels of airborne pollution of landscapes of the Murmansk Region and the Scandinavia North]: DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Apatity, 2006. 326 p.

Ryby v zapovednikakh Rossii. Presnovodnye ryby [Fish in the reservoirs of Russia. Freshwater fish]. Moscow: KMK, 2010. 628 p.

Terent'ev P. M., Kashulin N. A. Transformatsii rybnoi chasti soobshchestv vodoemov Murmanskoi oblasti [The transformation of fish communities in the wa-

terbodies of the Murmansk Region]. *Trudy Kol'skogo nauch. tsentra RAN* [Proceed. Kola Sci. Center RAS]. 2012. Vol. 2. P. 61–100.

Titov A. F., Butorin A. A., Gromtsev A. N., Ieshko E. P., Kryshen' A. M., Savel'ev Yu. V. Zelenyi poyas Fennoskandii: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Green Belt of Fennoscandia: State and perspectives]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2009. No. 2. P. 3–11.

Amundsen P.-A., Kashulin N. A., Terent'ev P. M., Gjelland K., Koroleva I. M., Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N., Knudsen R. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. Vol. 182. P. 301–316.

Authman M. M. N., Zaki M. S., Khallaf E. A., Abbas H. H. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *J. Aquac. Res. Development*. 2015. Vol. 6. P. 328–341. doi: 10.4172/2155-9546.1000328

Dauval'ter V., Kashulin N., Sandimirov S., Terent'ev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *J. Environ. Sci. Health*. 2011. Part A. Vol. 46. P. 1020–1033.

Kashulin N. A., Terent'ev P. M., Amundsen P.-A., Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N. Specific features of accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in two whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) morphs inhabiting the Inari – Pasvik lacustrine – riverine system. *Inland Water Biol*. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 383–392.

Rognerud S., Dauval'ter V. A., Fjeld E., Skjelkvåle B. L., Christensen G., Kashulin N. A. Spatial trends of trace-element contamination in recently deposited lake sediment around the Ni–Cu smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic. *AMBIO*. 2013. Vol. 42, no. 6. P. 724–736.

Rose M., Fernandes A., Mortimer D., Baskaran C. Contamination of fish in UK fresh water systems: Risk assessment for human consumption. *Chemosphere*. 2015. Vol. 122. P. 183–189

Trieblskorn R., Adam S., Casper H., Honnen W., Pawert M., Schramm M., Schwaiger J., Kohler H. Biomarkers as a diagnostic tools for evaluating effects of unknown Past Water quality conditions on stream organisms. *Ecotoxicol*. 2002. Vol. 11. P. 451–465.

Weber L. P., Dubé M. G., Rickwood C. J., Driedger K., Portt C., Brereton C., Janz D. M. Effects of multiple effluents on resident fish from Junction Creek, Sudbury, Ontario. *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2008. Vol. 70, no. 3. P. 433–445.

Ylikörkkö J., Christensen G., Kashulin N., Denisov D., Andersen H., Jelkänen E. Environmental challenges in the joint border area of Norway, Finland and Russia. Rovaniemi: centre for economic development, transport and the environment for Lapland, 2015. 169 p.

Received March 04, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Терентьев Петр Михайлович

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия
эл. почта: p_terentjev@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79787

Зубова Елена Михайловна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия
эл. почта: zubova@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79787

Кашулин Николай Александрович

главный научный сотрудник, д. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия
эл. почта: nikolay@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79787

Королева Ирина Михайловна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия
эл. почта: koroleva@inep.ksc.ru
тел.: (81555) 79787

CONTRIBUTORS:

Terentjev, Pyotr

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: p_terentjev@inep.ksc.ru
tel.: (81555) 79787

Zubova, Elena

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: zubova@inep.ksc.ru
tel.: (81555) 79787

Kashulin, Nikolai

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru
tel.: (81555) 79787

Koroleva, Irina

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: koroleva@inep.ksc.ru
tel.: (81555) 79787