

На правах рукописи

Слуковский Захар Иванович

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА)**

03.02.08 – экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
биологических наук

Петрозаводск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» на кафедре зоологии и экологии и в ФГБУН Институт геологии Карельского научного центра РАН в лаборатории геохимии и моделирования природных и техногенных процессов

Научный руководитель

доктор биологических наук, профессор
член-корреспондент РАН,
Ивантер Эрнест Викторович

Официальные оппоненты:

Даувальтер Владимир Андреевич
доктор географических наук, профессор,
ФГБУН Институт проблем промышленной
экологии Севера Кольского научного цен-
тра РАН, главный научный сотрудник лабора-
тории водных экосистем

Федорец Наталья Глебовна
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГБУН Институт леса Карельского научного
центра РАН, заведующая лабораторией лесно-
го почвоведения и микробиологии

Ведущее учреждение

ФГБУН Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН

Защита состоится "30 " апреля 2014 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д.212.190.01 при Петрозаводском государственном университете по адресу: 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, эколого-биологический факультет, ауд. 117 теоретического корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Петрозаводского государственного университета www.petrstu.ru, с авторефератом – на сайте <http://vak.ed.gov.ru> и www.petrstu.ru.

Автореферат разослан "....."..... 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. биол. наук



Дзюбук И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Стремительный рост городов сказывается на состоянии природных сред, затронутых процессом урбанизации. Город Петрозаводск, крупный промышленный центр северо-запада России с населением около 270 тыс. человек, не является исключением. Подтверждение этому тезису – результаты многочисленных исследований современного состояния атмосферного воздуха (Рыбаков, Слуковский, 2009; Крутских, Кричевцова, 2011), почвенного покрова (Федорец, Медведева, 2005; Казнина и др., 2009; Крутских, Лазарева, 2011; Сушук, Груздева, 2011) и водных объектов (Барышев и др., 2001; Комулайнен, Морозов, 2007; Крутских, Кричевцова, 2011б; Сластина, Клочкова, 2011; Рыжков и др., 2012) г. Петрозаводска.

Малые реки Лососинка и Неглинка, главные водотоки Петрозаводска, в своем нижнем течении протекают по центральной части города, являясь уязвимыми мишенями для различных загрязняющих веществ (в том числе и тяжелых металлов), поступающих с водосборной площади. Систематические исследования петрозаводских водотоков касаются лишь оценки качества воды (Рыжков и др., 2012), что позволяет судить только о краткосрочных (моментальных) антропогенных воздействиях на водный объект. Донные отложения, являющиеся индикаторами длительного загрязнения речных экосистем (Папина, 2011; Янин, 2013), для рек Лососинки и Неглинки ранее не изучались. Более того, на территории Карелии и сопредельных районах, расположенных на Фенноскандинавском кристаллическом щите, геоэкология донных отложений исследовалась в основном на примере озер указанного региона (Даувальтер и др., 2000, 2009, 2012; Белкина, Потапова, 2006; Белкина, 2011; Крутских, Кричевцова, 2011б). Работы, связанные с речными донными осадками, единичны (Шелехова, Крутских, 2013).

Актуальность работы обусловлена необходимостью всесторонне изучить русловые и пойменные донные отложения рек г. Петрозаводска, включая исследование связи между неотъемлемыми абиотическими и биотическими компонентами данной эколого-геологической формации на современной стадии ее развития.

Цель работы – провести комплексный анализ состояния донных отложений малых рек Лососинки и Неглинки, протекающих по территории города Петрозаводска, основываясь на геохимических и биологических данных.

Задачи исследования

1. Определить главные факторы, влияющие на формирование химического состава донных отложений малых рек урбанизированных территорий.
2. Установить основные элементы-загрязнители экосистем изучаемых городских водотоков.

3. Оценить уровень загрязненности донных отложений различных городских участков рек г. Петрозаводска.

4. Выявить связь между уровнем загрязненности донных отложений рек Лососинки и Неглинки и видовым разнообразием макрозообентоса.

5. Показать «потенциал» малощетинковых червей (*Oligochaeta sp. sp.*), доминирующих в донных отложениях эвтрофированных городских рек, в качестве биомониторов загрязненности изучаемых экосистем.

Основные положения, выносимые на защиту

Донные отложения рек г. Петрозаводска за счет антропогенного воздействия на изучаемые городские водотоки обогащены тяжелыми металлами (Ni, Zn, Cu, Co, Sb, W, Pb и Mo). Геохимия Cd и Cr, известных своим токсическим воздействием на живые организмы, тесно связана с природным фактором формирования микроэлементного состава донных отложений.

Наиболее загрязненными (по суммарному показателю загрязненности донных отложений Z_c и индексу геоаккумуляции I_{geo}) являются русловые осадки городской части р. Неглинки и пойменно-русловые отложения искусственно зарегулированного участка р. Лососинка «Фонтан». Анализ содержания в донных отложениях рек г. Петрозаводска Pb, Zn, Cu, Cd, Sb, Ni и Co в подвижной форме позволяет говорить об одинаковом уровне и единых источниках поступления исследованных поллютантов в городские водотоки.

Концентрации тяжелых металлов (Ni, Zn, Cu, Co, Sb, W, Pb и Mo) в организмах олигохет рек г. Петрозаводска в среднем находятся ниже уровня валовых концентраций тех же элементов в донных отложениях, но выше концентраций подвижных форм металлов в речных осадках, что говорит о высоком уровне биодоступности поллютантов для донных животных.

Научная новизна. Впервые изучены закономерности накопления и распределения в донных отложениях рек г. Петрозаводска микроэлементов из группы тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Sb, Mo, W), являющихся одними из основных загрязнителей урбанизированной среды. Установлено, что литий-индикация является надежным инструментом определения техногенного статуса указанных элементов в донных отложениях загрязненных городских водотоков. Установлена связь между суммарным показателем загрязнения речных осадков Z_c и видовым разнообразием донных организмов, населяющих исследуемые водные объекты. Определен уровень накопления тяжелых металлов в телах беспозвоночных гидробионтов (на примере олигохет), что является пионерным подобным исследованием для водоемов Республики Карелии.

Теоретическая значимость. Впервые для изучения донных отложений рек Карелии (в природоохранном аспекте) применен комплекс новейших

прецизионных аналитических и статистических методов (с получением соответствующих результатов), что позволяет понять природу основных процессов, происходящих на границе лито-, гидро- и биосферной составляющих экосистемы городского водотока.

Практическая значимость. Полученные результаты расширяют представления о миграции и аккумуляции гео- и техногенных химических элементов в пределах урбанизированных территорий. Настоящие исследования могут быть полезны специалистам, изучающим оз. Онежское, в которое впадают реки г. Петрозаводска, ученым-ихтиологам, дающим оценку возможного возрождения Лососинки в качестве лососевой реки, а также тем лицам, которые собираются проводить очистку петрозаводских водотоков от бытового мусора, дноуглубительные работы или любую другую деятельность, связанную с рылением донных отложений.

Личный вклад автора состоит в планировании работ на всех этапах исследований, в организации и проведении полевых работ, в подготовке образцов проб к аналитическим испытаниям и непосредственном участии в лабораторных анализах, в интерпретации, статистической и графической обработке полученных результатов и в подготовке к публикации материалов (статей, тезисов и др.) по итогам проведенных исследований.

Апробация работы. Материалы, которые лежат в основе диссертации, были представлены на следующих конференциях: XII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Геологи XXI века» (Саратов, 2011); Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН «Геология Карелии от архея до наших дней» (Петрозаводск, 2011); XXII конференции молодых ученых, посвященной памяти члена-корреспондента К.О. Кратца «Геология и геоэкология: исследования молодых» (Апатиты, 2011); молодежной научно-образовательной сессии и школе молодых ученых, посвященной 65-летию КарНЦ РАН «Фундаментальная и прикладная наука в Республике Карелия: современное состояние и перспективы развития» (Петрозаводск, 2011); 12-й международной конференции «Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века» (Минск, 2012); XXIII молодежной научной конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии» (Апатиты, 2012); 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Науки о земле: задачи молодых» (Петрозаводск, 2012); VIII Всероссийской научной школе «Математические исследования в естественных науках» (Апатиты, 2012); 13-й межвузовской молодежной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика

В.И. Вернадского «Школа экологической геологии и рационального недропользования» (Санкт-Петербург, 2013); VIII международной Биогеохимической Школе, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского «Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы» (Гродно, 2013); международной конференции «Геохимия и минералогия геосистем крупных городов» (Санкт-Петербург, 2013); III международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» (Воронеж, 2013).

Связь работы с научными программами. Результаты исследований проводились в соответствии с планом НИР ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), являясь частью плановых тем № 197 «Геозкологическая модель развития территории Республики Карелия: геохимические и климатические аспекты формирования экологических рисков» (ГР № 1200955825) и № 207 «Пространственно-временная динамика природного и техногенного преобразования окружающей среды, изменение климата и эволюция биоты в юго-восточной Фенноскандии» (ГР № 1201357011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 9 статей в материалах международных и всероссийских конференций, 1 в коллективной монографии и 1 в учебном пособии для студентов вузов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка литературы и 3 приложения. Она изложена на 142 страницах, включает 29 таблиц, 41 рисунок. Список литературы составляет 165 источников, среди которых 33 иностранных.

Благодарности. Автор выражает глубокую и искреннюю признательность научному руководителю профессору, д.б.н. Э.В. Ивантеру и постоянному научному консультанту профессору, д.г.-м.н. С.А. Светову. Кроме того, автор благодарен сотрудникам ИВПС КарНЦ РАН Т.Н. Поляковой за помощь в проведении гидробиологических исследований и д.б.н. Н.М. Калинкиной за постоянные научные консультации и советы, сотрудникам ИГ КарНЦ РАН Т.П. Бубновой и А.С. Медведеву за помощь в проведении гранулометрического анализа, к.г.н. Т.С. Шелеховой за бесценные научные консультации, М.А. Гоголеву за помощь в организации полевых работ и научные консультации, всем сотрудникам аналитической лаборатории и в частности А.С. Парамонову, В.Л. Утициной, Л.М. Демешинной, А.И. Полищук, С.В. Бурдиху, И.С. Ининой за консультации и поддержку, а также моим самым родным и близким людям. Работа посвящается памяти моего деда Служковского Захара Адамовича (1914–1987).

Работа выполнена при финансовой и организационной поддержке ФГБУН Институт геологии Карельского научного центра РАН, ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН и ФГБУН Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН.

Глава 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В данной главе рассмотрены вопросы, связанные с исследованиями негативного воздействия городской среды (на примере г. Петрозаводска) на природные объекты, расположенные в пределах урбанизированной территории (Федорец, Медведева, 2005; Казнина и др., 2009; Рыбаков, Слуковский, 2009; Крутских, Лазарева, 2011; Сушук, Груздева, 2011). На основе современных исследований (Барышев и др., 2001; Евсеева, Иешко, 2004; Комулайнен, Морозов, 2007; Тыркин и др., 2011; Рыжков и др., 2012) показано, что малые реки Лососинка и Неглинка, протекающие в нижнем течении по центральной части города, испытывают антропогенную нагрузку, что отражается на измерении и трансформации морфологии речных русел, химического состава и pH воды, а также видового состава живых организмов, населяющих, изучаемые водотоки. Дано определение донных отложений и показана их важная роль в процессе миграции биотических и абиотических компонентов на техногенно нарушенных территориях (Янин, 2009, 2013; Белкина, 2011; Папина, 2011; Даувальтер, 2012). Сделан вывод о необходимости комплексного эколого-геохимического изучения донных отложений рек г. Петрозаводска для оценки уровня «исторического» загрязнения, как самих водотоков, так и урбанизированной водосборной территории.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географическая характеристика района исследований

Территория г. Петрозаводска находится в южной части Карелии на юго-восточной окраине Фенноскандинавского кристаллического щита. Коренные породы района представлены древними докембрийскими образованиями, при этом на территории города отмечен лишь один выход пород на дневную поверхность. Большая часть района исследований покрыта четвертичными отложениями – горизонтами морен различных оледенений, а также водными осадочными последовательностями, которые накапливались в межледниковое время. Аллювиальные отложения Петрозаводска – это современные (го-

лоценовые) отложения, представляющие собой смесь «коренных» четвертичных пород и терригенного материала с водосборной площади. Современный рельеф столицы Карелии представляет собой аккумулятивную равнину с общим понижением в сторону Онежского озера.

Реки Карелии, чье происхождение связано с действием ледника, сошедшего 10–15 тыс. лет назад, в основном относятся к бассейнам Белого (57 % территории региона) и Балтийского (43 %) морей. Всего в регионе насчитывается более 27 тысяч рек с общей протяженностью около 83 тыс. км. Преобладают водотоки длиной до 10 км (95 % от общего числа). Однако, несмотря на развитую речную сеть, аллювиальные отложения на территории республики имеют слабое распространение, при этом в южной части региона, где расположен г. Петрозаводск, аллювий представлен более широко, чем в северной.

2.2. Объекты исследования

Лососинка и Неглинка – типичные малые реки Фенноскандинавского региона. Длина Лососинки составляет около 30 км, Неглинки – около 17 км. Главной особенностью обоих водотоков является то, что в своем нижнем течении они протекают по центральной территории самого крупного города республики Карелии (Петрозаводск), неся свои воды в Петрозаводскую губу Онежского озера. Донные отложения р. Лососинки в верхнем и среднем течении и в черте города представлены русловой фацией, исключениями являются три искусственно зарегулированных участка, где выделяется пойменная фация осадков. Речные отложения Неглинки – это преимущественно русловые донные отложения. Лишь в небольшом зарегулированном участке реки в центре города отмечено накопление пойменной фации аллювия. На пороговых участках водотоков донный грунт представлен валунно-галечным материалом.

2.3. Материалы и методы исследований

Полевые исследования проводились в 2011–2012 гг. преимущественно в летний период гидрологического режима рек Лососинки и Неглинки. Общие принятые методические рекомендации использованы при отборе проб для геохимических исследований и гидробиологического изучения. Пробы донных отложений отбирали дночерпателем Экмана-Берджи (площадь захвата 225 см²) и ручным поршневым буром с глубиной проникновения до 50 см. В случае использования пробы для бентосного анализа отобранный осадок промывался через сито № 23 (размер ячеек 0.333 мм) и фиксировался раскисленным 4 % формалином.

Лабораторные исследования в основном выполнялись на базе «Аналитического центра» Института геологии Карельского научного центра Российской

ской Академии наук (г. Петрозаводск) с применением комплекса современных аналитических методов.

Определение *гранулометрического состава* донных отложений проводилось при помощи многофункционального анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter). Определение фазового *состава минералов* после предварительного истирания проб до порошкообразного состояния выполнено на рентгеновском дифрактометре ARL X'tra (Thermo Scientific). Определение *основных петрохимических элементов* (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Na_2O , K_2O , CaO , MgO , MnO , TiO_2 , P_2O_5) проводилось как классическими методами мокрой химии, так и при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X (ThermoFisher Scientific). Подготовка проб донных отложений к РФА-анализу включала в себя плавление образца и флюса в золото-платиновых тиглях в электроплавильной печи. Потери при прокаливании определялись после нагревания проб при температуре 1000°C . *Содержание микроэлементов* осуществлялось масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Scientific). Контроль качества определения концентраций химических элементов проверялся по стандартному образцу ГСО 7126-94 – химический состав донного ила оз. Байкала (БИЛ-1).

Бентосный анализ донных отложений проводится под микроскопом МБС-9, гидробионты подразделялись на систематические группы, которые взвешивались на торсионных весах WAGATORSYJNA-WTC с точностью до 0.5 мг. Пересчет конечных результатов осуществлялся на квадратный метр площади дна. Видовая принадлежность определена для большинства основных групп макрозообентоса. При этом группы *Oligochaeta*, *Hydracarina* и некоторые другие гидробионты до вида не определялись. Работы выполнены на базе ФГБУН Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН главным биологом лаборатории гидробиологии Т.Н. Поляковой.

Статистическая обработка аналитических данных осуществлялась общепринятыми в экологии и геохимии методами. Расчеты производились при помощи программ Microsoft Excel 2007, PSPP 0.8.1 и Statgraphics plus 2.1. Для графической иллюстрации результатов использовались программы OriginPro 8.5.1, MapInfo Professional 9.0.2, Microsoft PowerPoint 2007 и Triplot 4.1.2. При описании гранулометрических фракций за основу принята классификация рыхлых осадочных пород Л.Б. Рухина.

Для оценки уровня загрязненности донных отложений тяжелыми металлами использовались суммарный показатель загрязненности Z_c и индекс геоаккумуляции I_{geo} (Даувальтер, 2012). При гидробиологических исследованиях использовались индекс выравненности видов (таксонов) I и индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера.

Глава 3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК Г. ПЕТРОЗАВОДСКА

3.1. Гранулометрический состав

Для большинства проб донных осадков петрозаводских рек Лососинки и Неглинки характерно преобладание песчаных фракций, а именно – фракций с размером зерен от 0.1 до 0.25 мм и от 0.25 до 0.5 мм. Содержание тонкозернистых песчаных, алевритовых и глинистых частиц (<0.1 мм) в речных осадках петрозаводских рек составляет 28.9 % (Лососинка) и 16.2 % (Неглинка). Отмечено, что наибольшее число проб донных отложений с преобладанием тонких фракций осадка относится к пойменным участкам городских водотоков, а также в районах, приуроченных к основным транспортным развязкам и сливам ливневых канализационных стоков, что подтверждает представления (Янин, 2013) о значительном влиянии антропогенной нагрузки на формирование гранулометрического состава речных донных отложений.

3.2. Минеральный состав и петрохимические особенности

Минеральный состав. В зоне интенсивного антропогенного воздействия на речные экосистемы происходит изменение донных отложений водотоков на минеральном и петрохимическом уровне. В минеральном составе речных осадках петрозаводских водотоков присутствуют кварц, альбит, микроклин, актинолит, мусковит, диопсид, авгит, хлорит, тремолит и ричтерит. Помимо породообразующих минералов установлено присутствие пирита, маргарита, корунда, монацита, циркона, целестина, англезита, титаномагнетита, нигрина (разновидность рутила) и сфена. Пробы донных отложений обеих петрозаводских рек на фоновых территориях имеют более бедный минеральный состав по сравнению с осадками городских частей водотоков. Данный факт связан прежде всего с тем, что на урбанизированной территории исходные («коренные») грунты, размытые рекой, обогащаются минеральным веществом посредством поверхностного стока с почвенного покрова города и благодаря постоянным эрозионным процессам.

Петрохимические особенности. По сравнению с химическим составом гравийно-песчаных отложений микулинского горизонта (глубина 2.5 м), вскрытого на территории г. Петрозаводска в районе устья Неглинки (Иконен, Екман, 2001), речные осадки Петрозаводска обогащены кремнеземом (на 8.2 %) и обеднены оксидами Ti (29.6), Al (16.2), Mg (48.6), Ca (8.7), Na (11.2), K (11.8) и P (5.5), что является следствием вторичных процессов выветривания под воздействием водного потока. При этом тонкую фракцию донных отложений петрозаводских рек можно охарактеризовать как более молодое образование по сравнению с грубой фракцией осадка, поскольку медианное значение петрохимического модуля зрелости осадочных пород в полтора

раза выше во фракции <2.0 мм. Модуль зрелости осадочных пород (области сноса) наоборот выше во фракции <0.1 мм, что указывает на обусловленность формирования химического состава именно тонкой фракции речных осадков процессами антропогенного характера на городской территории, в то время как состав грубой фракции несет на себе «след» природного происхождения отдельных элементов.

Анализ факторной модели петрохимического состава донных отложений рек Лососинки и Неглинки (в тонкой фракции) выявил, что главный фактор

Таблица 1. Факторная модель петрохимического состава донных отложений рек г. Петрозаводска

Показатели	Ф 1	Ф 2	Ф 3
SiO ₂	-0.97	-0.03	0.02
TiO ₂	0.02	0.96	0.06
Al ₂ O ₃	-0.13	0.25	0.93
Fe _{общ.}	0.90	0.35	-0.12
MnO	0.74	-0.32	-0.21
MgO	0.75	0.52	0.34
CaO	-0.24	0.94	0.00
Na ₂ O	-0.87	0.19	0.31
K ₂ O	-0.18	-0.15	0.95
P ₂ O ₅	0.96	-0.11	-0.15
п.п.п.	0.91	-0.21	-0.12
Вес фактора, %	50.0	22.6	18.9

(Ф 1) связан с антропогенным влиянием на формирование химического состава исследуемых осадков (табл. 1). Кроме того, содержание элементов, входящих в этот фактор, контролируется гранулометрическим составом донных отложений, что подтверждается высоким уровнем корреляции оксидов Si, Fe, Mn, Mg, P и п.п.п с содержанием тонкой фракции донных отложений. Во второй по значимости фактор (Ф2) также входят элементы (Ti, Ca), тяготеющие к тонким фракциям исследуемых отложений, но не имеющие техногенной составляющей в своем происхождении.

3.3. Актуальная кислотность и микроэлементный состав

Актуальная кислотность донных отложений. В черте города донные отложения рек Лососинки и Неглинки (тонкая фракция) по pH характеризуются как нейтральные и слабощелочные, что соответствует уровню актуальной кислотности почв г. Петрозаводска (Федорец, Медведева, 2005).

Установлено, что донные отложения пригородной зоны р. Лососинки слабо отличаются по значению pH от проб, отобранных в районе города. Статистически значимое различие по критерию Манна-Уитни отмечено лишь между выборками проб из городского участка реки «Мерецкова» и пригородной зоны водотока ($U_{\text{мп.}} < U_{\text{крит.}}$ при $p < 0.05$). При этом донные отложения р. Неглинки в пригородной зоне по значениям pH близки к фоновым почвам Карелии и характеризуются как кислые (Федорец, 2008). Манна-Уитни-тест установил значимое различие между выборками значений pH

городских и отобранных вне города проб донных отложений р. Неглинка ($U_{эмл.} \ll U_{крит.}$ при $p < 0.01$).

В районе резкого увеличения рН донных отложений реки на границе «город-пригород» от 5.2 до 7.2 отмечено плотное скопление ливневых канализационных стоков, что способствует подщелачиванию речной воды от кислого до нейтрального уровня (Комулайнен, Морозов, 2007) и, как следствие, увеличению рН донных отложений.

Микроэлементный состав донных отложений. Установлено, что концентрации редкоземельных и других литофильных микроэлементов в донных отложениях городских частей рек Петрозаводска, а также транзитных элементов-примесей, чей генезис может быть связан с антропогенной средой, превышают фоновые значения этих элементов в пригородных (фоновых) зонах изучаемых водотоков. При этом наиболее высоких значений достигают концентрации тяжелых металлов.

Факторный анализ методом главных компонент, проведенный по данным микроэлементного состава обеих петрозаводских рек (табл. 2), выявил три основных фактора, определяющих его формирование.

Таблица 2. Факторная модель микроэлементного состава тонкой фракции донных отложений рек г. Петрозаводска, N=82

№ фактора (вес, %)	Ассоциации микроэлементов (нагрузка на фактор)
1 (44.7)	Все лантаноиды (до 0.99), Y (0.99), U (0.97), Hf (0.84), Th (0.83), Zr (0.80), Cd (0.79), Ti (0.68), Cr (0.60)
2 (20.6)	Ni (0.96), Zn (0.91), Cu (0.90), Co (0.85), Cs (0.84), Sb (0.76), P (0.72), Li (0.70), W (0.68), Pb (0.64), Sn (0.55), Mo (0.54), Rb (0.54), Ba (0.45)
3 (12.0)	Ga (0.85), Sc (0.83), Sr (0.81), V (0.75), Mn (-0.61), Ti (0.59), Pr (-0.46), Sn (0.35)

Фактор 1 объединяет высокозарядные элементы-примеси (лантаноиды, Zr, Hf, U, Th, Y), которые обычно малоподвижны в геологических средах. Факторы 2 и 3 включают крупноионные литофильные элементы (Cs, Rb, Ba, Sr) и транзитные элементы-примеси, обладающие значительной подвижностью при геологических процессах (Перельман, 1989; Интерпретация..., 2001). Кроме того, второй фактор объединяет большинство типичных элементов-загрязнителей антропогенно нарушенной природной среды.

Глава 4. ТЕХНОГЕННЫЙ СТАТУС ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

4.1. Фазы-носители тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска. Литий-индикация типоморфных элементов урбогенеза

Основными фазами-носителями элементов-загрязнителей, согласно (Водяницкий, 2008; Даувальтер, 2012), могут служить карбонаты, оксиды Fe и Mn, а также органическое вещество. Кроме того, в речных донных отложениях все указанные носители основных загрязнителей водного объекта образуют целостную систему: тяжелые металлы сорбируются тонкими минеральными частичками, «обернутыми» органикой и гидратами оксидов Fe и Mn (Förstner, 1987). В целом ряды тесноты связи содержаний тяжелых металлов в донных отложениях рек Лососинки и Неглинки с фемическим (рис. 1) и органо-кремнистым модулями имеют схожий вид, что подтверждает указанный выше тезис.

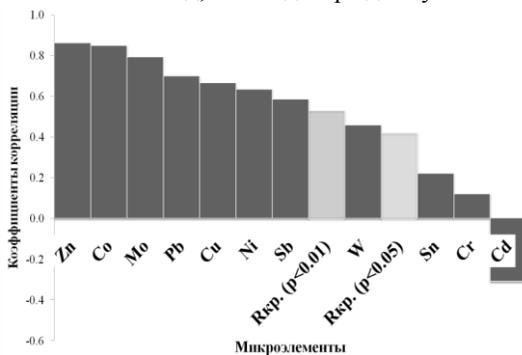


Рисунок 1. Корреляция между фемическим модулем и содержаниями тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска

Отмечается тесная корреляционная связь (при $p < 0.05$) концентраций тяжелых металлов (Ni, Zn, Co, Cu, Sb, Pb, W, Mo) с содержанием Li в донных отложениях рек Лососинки и Неглинки. Литий является надежным индикатором как загрязненности изучаемых донных осадков, так и гранулометрических особенностей изучаемых отложений (Loring, 1990).

Происхождение опасного с точки зрения живых организмов Cd в донных отложениях рек г. Петрозаводска предположительно связано с минералами самородного Cd, найденных в 90 км к северу от района исследований (Лавров, Кулешевич, 2013). Необычное для поллютант-сидерофила поведение в донных осадках петрозаводских рек Cr объясняется широкой распространенностью на территории Карелии хромсо-

держащих ультраосновных пород (Ивашенко, Ромашкин, 2012; Рыбникова, Светов, 2014). Поэтому для донных отложений рек г. Петрозаводска – это «родные» микроэлементы, чей генезис связан с экзарационной деятельностью ледника на северо-западном побережье Онежского озера.

4.2. Оценка уровня загрязненности тяжелыми металлами донных отложений рек г. Петрозаводска

Из таблицы 3 видно, что из всех городских участков рек г. Петрозаводска наименьшие медианные значения концентраций тяжелых металлов отмечены в русловых донных осадках р. Лососинки. При этом донные отложения р. Неглинка, которые преимущественно представлены русловой фацией, наиболее обогащены такими металлами, как Ni, Cu, Mo и W. Наибольшие медианные значения концентраций Pb, Zn, Co и Sb отмечены в осадках зарегулированных участков р. Лососинки.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска, мг/кг

	Pb	Zn	Co	Ni	Cu	Sb	Mo	W
р. Неглинка (городская часть), N=40								
Me	31.0	159.3	17.8	29.8	74.0	1.18	1.07	3.72
x _{Max}	101.4	296.1	28.1	43.2	178.2	3.78	5.25	20.75
x _{Min}	18.1	70.8	11.5	22.0	34.2	0.32	0.63	0.95
S _{Me}	10.0	63.2	4.3	4.8	28.2	0.53	0.28	1.76
р. Лососинка (участок «Фонтан»), N=20								
Me	37.9	160.3	16.9	27.8	54.5	1.37	1.04	2.49
x _{Max}	79.4	261.2	24.1	40.6	119.5	3.30	1.51	5.85
x _{Min}	20.1	66.2	11.2	17.3	21.9	0.38	0.49	0.85
S _{Me}	11.9	65.3	3.5	4.1	24.5	0.50	0.33	1.25
р. Лососинка (участок «Мерецкова»), N=18								
Me	18.3	117.3	19.0	27.0	31.5	0.44	0.81	1.05
x _{Max}	30.3	354.4	24.0	36.6	81.1	1.75	1.21	4.91
x _{Min}	14.2	60.3	9.7	17.9	19.1	0.17	0.36	0.33
S _{Me}	3.4	51.2	6.2	7.1	16.8	0.31	0.24	0.59
р. Лососинка (городская часть, русловая фация), N=17								
Me	14.8	67.7	10.5	16.9	19.6	0.29	0.29	0.32
x _{Max}	50.5	172.8	15.7	30.8	80.1	1.94	0.82	2.39
x _{Min}	10.6	43.2	7.5	13.3	12.4	0.07	0.00	0.07
S _{Me}	2.9	17.4	2.5	3.3	4.8	0.18	0.22	0.26

Примечание. Me – медиана, x_{Max} и x_{Min} – максимальное и минимальное значения выборки, S_{Me} – стандартное отклонение медианы, N – число вариант

Единый уровень накопления Co и Ni (по критерию Манна-Уитни) отмечен для русловых донных отложений городской части р. Неглинка и обочен зарегулированных участков р. Лососинки. Единый уровень содержания Pb, Zn, Sb и Mo отмечено только для городской части р. Неглинка и участка р. Лососинки «Фонтан».

Установлено, что медианные значения концентраций всех исследуемых тяжелых металлов в донных отложениях городской части р. Неглинка и обоих зарегулированных участков р. Лососинки превышают средние и медианные содержания этих элементов в речных осадках Шуи (Шелехова, Крутских, 2013). Наибольшие превышения установлены по Pb (до 1.9), Zn (до 2.0), Cu (до 4.4) и Sb (до 3.9).

Уровень загрязнения Pb, Zn, Co, Cu, Sb и W донных отложений рек г. Петрозаводска превышает загрязнение почвенного покрова города (Климатические..., 2013) (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты концентраций тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска относительно почв города

Река (участок)	Pb	Zn	Co	Cu	Sb	W
Лососинка («Фонтан»)	1.5	1.9	2.1	1.5	1.8	2.5
Неглинка (город)	1.2	1.9	2.2	2.0	1.6	3.8
Лососинка («Мерецкова»)	0.7	1.4	2.4	0.9	0.6	1.1

Значения суммарного показателя загрязнения донных отложений городской части р. Неглинка варьируют от 11 до 129 (медиана – 36). Наибольшие значения Z_c установлены для части р. Неглинка, протекающей по центру города, пересекая улицы, характеризующиеся значительным транспортным потоком. Кроме того, в этом районе отмечено самое большое значение показателя (129). Большинство мест обследования донных отложений р. Неглинка и участка р. Лососинки «Фонтан» характеризуется в целом высоким и средним уровнями загрязнения. Кроме того, согласно результатам Манна-Уитни-теста, донные отложения участка «Фонтан» и русловые осадки городской части р. Неглинка характеризуются единым уровнем загрязнения ($U_{эмп.} > U_{кр.}$ при $p < 0.01$).

Значения суммарного показателя загрязненности донных отложений другого зарегулированного участка р. Лососинки «Мерецкова» варьируют в пределах от 4 до 49 (медиана – 13). Большинство исследованных донных отложений характеризуется средним и низким уровнями загрязнения. Русловые донные отложения городской части р. Лососинки, ото-

бренные в районах лесопарковых зон города, характеризуются преимущественно низким уровнем техногенного загрязнения ($Z_c < 10$).

Наибольшими значениями индекса I_{geo} характеризуются донные отложения всех изучаемых городских участков рек г. Петрозаводска по Pb, Zn, Co, Ni и Cu (табл. 5). При этом загрязнение речных осадков Zn (все изучаемые участки водотоков) и Ni (только Неглинка) оцениваются как сильное ($I_{geo} > 3$).

Таблица 5. Медианные значения индексов геоаккумуляции I_{geo} для донных отложений городских участков рек г. Петрозаводска

Элемент	р. Неглинка, город	р. Лососинка, «Фонтан»	р. Лососинка, «Мерецкова»	р. Лососинка, город (русло)
Pb	2.74	2.82	2.51	2.41
Zn	3.90	3.90	3.77	3.53
Co	2.25	2.23	2.88	2.02
Ni	3.09	2.78	2.77	2.57
Cu	2.96	2.96	2.72	2.51

4.3. Подвижные формы тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска

Наибольшие превышения концентраций подвижных форм изучаемых тяжелых металлов над фоновыми значениями (от 1.6 до 27.9) установлены в донных отложениях городской части р. Неглинки в районе центра города и пойменных осадках зарегулированного участка р. Лососинки «Фонтан». Таким образом, концентрации исследуемых металлов в подвижной форме так же как и в валовой форме увеличиваются в донных отложениях петрозаводских рек ближе к устьевым и приустьевым зонам.

Отмечена тесная корреляционная связь ($p < 0.01$) между содержанием в исследуемых донных отложениях концентраций подвижных форм Ni и Cd (0.90), а также Pb и Cu (0.71). Средняя корреляционная зависимость выявлена между парами концентраций подвижных форм элементов Pb–Ni, Zn–Ni, Zn–Cu, Zn–Cd, Cu–Ni и Cu–Cd. Данное обстоятельство свидетельствует об одинаковом уровне поступления и единых источниках исследуемых поллютантов.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ЛОСОСИНКИ И НЕГЛИНКИ НА ВИДОВОЙ СОСТАВ БЕНТОФАУНЫ

5.1. Реакция бентосных беспозвоночных на антропогенное загрязнение донных отложений рек г. Петрозаводска

Любая антропогенная нагрузка вызывает количественные и качественные изменения в сообществах живых организмов. Обозначенный тезис подтверждается многочисленными исследованиями как в России и мире в целом, так и на территории северо-запада страны (Яковлев, 1988; Барышев и др., 2001; Балушкина, 2004; Комулайнен, Морозов, 2007; Валькова и др., 2012; Di Veroli et al., 2012).

На обследованных в 2011 и 2012 гг. городских и пригородных участках рек Неглинка и Лососинки донные беспозвоночные были представлены следующими группами: олигохетами, моллюсками, поденками, веснянками, ручейниками, жуками, клопами и личинками всевозможных двукрылых насекомых (хируномидами, мокрецами, мухами, оводами и т. п.). Большинство определенных видов принадлежит к семейству *Chironomidae*, гетеротопным беспозвоночным, большую часть жизни проводящим в водной среде. Среди гомотопных организмов наиболее многочисленны олигохеты, которые характеризовались 100%-ой встречаемостью по всем станциям отбора проб для р. Неглинка и 80 %-ой – для р. Лососинки.

Наибольшие значения численности и биомассы сообществ отмечены в черте города. В их составе доминируют наиболее толерантные организмы (тубифициды и личинки рода *Chironomus*), обуславливая anomalно высокие количественные характеристики группировок. Среднее значение индекса выравниваемости видов I по всем городским станциям составляет 37 %. Доминирование указанных организмов в водоемах, подверженных антропогенному воздействию, свидетельствует как о значительном содержании органики в грунтах вследствие эвтрофикации водотоков, что было отмечено ранее, так и устойчивостью олигохет к действию разного рода поллютантов.

Фоновые участки рек Лососинки и Неглинка характеризуются меньшими биомассами донных группировок, присутствием в их составе требовательных к качеству воды организмов – веснянок, поденок и ручейников. Сообщества более разнообразны (индексы Шеннона по р. Неглинке – 2.98, Лососинке – 3.72). Индекс выравниваемости I равен 72 % в среднем для обоих водотоков за чертой города.

Значение индекса Шеннона для станций в черте города по обоим водотокам варьирует от 0.14 до 2.81 (медиана – 1.56). Наименьшие значения индекса отмечены в 2012 году по р. Неглинке (в центре города и в районе «Перевалка») и р. Лососинке (под автомобильным мостом).

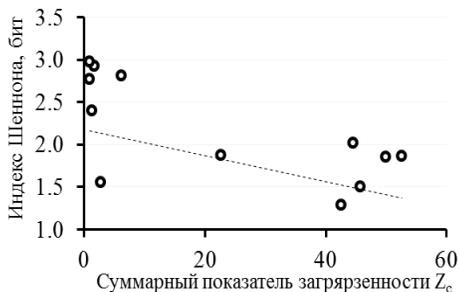


Рисунок 2. Связь видового состава макрозообентоса с загрязненностью донных отложений рек г. Петрозаводска

траций тяжелых металлов в донных отложениях рек Лососинки и Шуи и озера Четырехверстного (Петрозаводск)

5.2. Биоаккумуляция тяжелых металлов бентосными организмами рек г. Петрозаводска (на примере олигохет *Oligochaeta sp. sp.*)

Многие представители бентофауны питаются, пропуская через свои кишечники грунт водных осадков, поэтому различным химическим веществам (в том числе и тяжелым металлам) свойственно накапливаться в телах организмов. Все водные виды олигохет питаются грунтом. При этом отмечено, что черви, обитающие в песчаных донных осадках, в процессе питания выбирают наиболее мелкие частички отложений и органических остатков (Чекановская, 1962).

В результате проведенных исследований было установлено, что концентрации тяжелых металлов в организмах олигохет (табл. 6) в среднем находятся ниже уровня валовых концентраций тех же элементов в речных осадках, но выше концентраций подвижных форм металлов в донных отложениях изучаемых рек. Содержания Zn и Cu в олигохетах рек г. Петрозаводска значительно превышают концентрации этих же элементов в организмах олигохет Ивановского водохранилища (Попченко, Попченко, 1999). Данный факт свидетельствует о значительном

Установлено (рис. 2), что наименьшие значения индекса Шеннона соответствуют наиболее загрязненным участкам рек г. Петрозаводска. С другой стороны, максимальные значения индекса Шеннона соответствуют условно чистым участкам исследуемых водотоков. Схожие закономерности отмечены при исследовании видового разнообразия диатомовых водорослей и концен-

влиянии города на концентрации различных загрязняющих веществ в донных беспозвоночных.

Наибольшие значения коэффициентов концентрации (табл. 6) отмечены для таких жизненно важных для живых организмов микроэлементов как Zn и Cu, а также для Mo. В целом все изученные тяжелые металлы выстраиваются в следующий ряд (по убыванию коэффициентов концентрации): $Zn > Mo > Cu > Sb > Pb > W > Ni > Co$.

Таблица 6. Уровень накопления тяжелых металлов в организмах олигохет рек г. Петрозаводска

	Pb	Zn	Co	Cu	Ni	Mo	Sb	W
$C_{\text{олиг.}}$, мг/кг	14.86	253.1	4.52	47.92	9.74	0.89	0.60	1.07
K_c	0.58	1.9	0.28	0.84	0.35	0.98	0.60	0.46

Примечание. $C_{\text{олиг.}}$ – среднее значение концентрации металла в телах олигохет, K_c – коэффициент концентрации по отношению к среднему содержанию металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводска

Схожим образом данные элементы выстраиваются по убыванию значения тесноты связи с органическим веществом донных отложений петрозаводских рек в целом. Исключения составляют Co и Ni, первичной фазой-носителем которых вследствие их химических особенностей являются оксиды Fe. При этом оба металла имеют одинаково высокие коэффициенты корреляции как со значениями фемического, так и органо-кремнистого петрохимических модулей донных отложений рек г. Петрозаводска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тенденции современного развития общества свидетельствуют о том, что процесс урбанизации во всем мире необратим, и хотя на сегодняшний день все больше крупных городов выводит промышленность, с которой связана основная антропогенная нагрузка на окружающую среду, за пределы густонаселенных районов, такие депонирующие среды, как почвенный покров и донные отложения водных объектов, могут долго хранить память о ее неблагоприятном воздействии в прошлом. Подобная ситуация сложилась в г. Петрозаводске, где до недавнего времени в центральном районе города функционировало несколько крупных промышленных предприятий.

Кроме того, в г. Петрозаводске, как и во многих городах, в последние десятилетия возросла доля выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта. В г. Петрозаводске велико влияние железнодорожного транспорта, так как исторически сложилось, что вокзал

станции «Петрозаводск» располагается в центральной части города. Оценке влияния суммарного накопления тяжелых металлов, поступающих от различных стационарных и мобильных источников выбросов, на две малые реки, протекающие по территории г. Петрозаводска, посвящены настоящие исследования.

Результаты исследований показали, что мощнейшим фактором, влияющим на обогащение донных отложений городских водотоков различными минеральными компонентами и органическим веществом, является поверхностный сток с техногенно нарушенной территории, являющейся водосборной площадью изучаемых рек. Накопление в речных осадках высоких концентраций тяжелых металлов контролируется, прежде всего, содержанием в донных отложениях тонких (тонкопесчаных, алевритовых и глинистых) фракций, оксидов Fe, как продуктов химического выветривания первичных минералов, и органического вещества, изобилующего в городских водных объектах вследствие эвтрофикации. Кроме того, хорошим индикатором техногенности исследуемых тяжелых металлов в донных отложениях рек Лососинки и Неглилки является активно мигрирующий в геологических средах Li. Аналогичными свойствами обладают также Rb и Cs.

В главную экологически потенциально опасную ассоциацию элементов-загрязнителей речных отложений вошли Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sb, Mo и W. На основе концентраций указанных металлов был рассчитан суммарный показатель загрязненности донных осадков, что позволило установить наиболее загрязненные городские участки рек г. Петрозаводска.

Кроме того, в работе удалось связать рассчитанный уровень загрязненности донных отложений петрозаводских водотоков (абиотический компонент) с видовым разнообразием макрозообентоса, обитающего в исследованных биогеоценозах (биотический компонент), так как именно эта характеристика сообщества живых организмов является надежным маркером экологического состояния водного объекта. Анализ содержания тяжелых металлов в организмах олигохет, являющих доминирующей группой гидробионтов в донных отложениях рек г. Петрозаводска, позволил оценить уровень биодоступности поллютантов для бентосных беспозвоночных, чьей непосредственной средой обитания являются загрязненные речные осадки.

ВЫВОДЫ

1. Обогащение донных отложений городских участков рек г. Петрозаводска различными микроэлементами как природного, так и техногенного генезиса происходит благодаря интенсивному непрекращающемуся поверхностному стоку с урбанизированной водосборной территории изучаемых водотоков.

2. Типоморфными элементами антропогенного воздействия на экосистемы рек г. Петрозаводска являются такие тяжелые металлы как Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sb, Mo и W, а также биогенный элемент – P и металлы-индикаторы – Li, Rb и Cs.

3. Происхождение Cd и Cr в донных отложениях рек Лососинки и Неглилки имеет геогенную природу и связано с экзарационной деятельностью ледника на северо-западном побережье Онежского озера.

4. Единый уровень обогащения речных отложений Co отмечен для всех исследованных городских участков петрозаводских водотоков, единый уровень обогащения Zn, Pb, Ni, Sb и Mo – только для городской части р. Неглилки и зарегулированного участка р. Лососинки «Фонтан», которые, при этом, являются наиболее загрязненными участками (по суммарному показателю загрязненности донных отложений Z_c).

5. Донные отложения городских участков рек г. Петрозаводска более загрязнены тяжелыми металлами по сравнению с русловыми осадками загородной р. Шуи и почвенным покровом территории водосборной площади изучаемых водотоков.

6. Высокие значения индекса геоаккумуляции $I_{geo} > 2-3$ по Pb, Zn, Co, Ni и Cu позволяют классифицировать донные отложения городских участков рек г. Петрозаводска как умеренно и сильно загрязненные.

7. Тесная корреляционная связь концентраций подвижных форм Pb, Zn, Ni, Cu и Cd и схожесть рядов тяжелых металлов по убыванию значений отношений концентраций элемента в подвижной форме к валовому содержанию для рек Лососинки и Неглилки и оз. Четырехверстного говорят об одинаковом уровне и единых источниках поступления исследованных поллютантов с территории города.

8. Комплексное воздействие тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sb, Mo и W) в донных отложениях рек г. Петрозаводска негативно сказывается на сообществах макрозообентоса, населяющего изучаемые речные осадки, что подтверждается отрицательной корреляцией между показателем загрязненности Z_c и индексом видового разнообразия Шеннона H.

9. Малощетинковые черви (*Oligochaeta sp. sp.*) рек г. Петрозаводска являются хорошими биомониторами загрязненности тяжелыми металлами донных отложений городских водотоков, служащих их непосредственной средой обитания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Рыбаков Д.С., Слукковский З.И. Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 4. 2012. С. 67–73.
2. Слукковский З.И., Бубнова Т.П. Химический состав фракции <0,1 мм отложений реки Неглинка – индикатор загрязнения городского водотока // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 4. 2013. С. 50–56.

В других периодических изданиях:

1. Слукковский З.И., Рыбаков Д.С., Бубнова Т.П. Гранулометрический состав донных отложений городской части малой реки Неглинка (Петрозаводск) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 15. Петрозаводск, 2012. С. 168–172.
2. Слукковский З.И. Происхождение кадмия в донных отложениях рек города Петрозаводска: техногенез или природа? // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 16. Петрозаводск. 2013. С. 132–136.

В материалах конференций:

1. Рыбаков Д.С., Крутских Н.В., Лазарева О.В., Слукковский З.И., Кричевцова М.В. Оценка состояния природно-техногенных геосистем в пределах города Петрозаводска и прилегающих территорий // Геология Карелии от архая до наших дней. Материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 24–26 мая 2011 года. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011. – С. 213–218.
1. Слукковский З.И. Исследование донных отложений городской реки Лососинка (Петрозаводск) как важный элемент в эколого-геохимическом мониторинге урбанизированных территорий // Геология и геоэкология: исследования молодых. Материалы XXII конференции молодых ученых, посвященной памяти члена-корр. К.О. Кратца. 8–10 ноября 2011 г. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2011. – С. 182–184.
2. Слукковский З.И., Рыбаков Д.С., Гоголев М.А., Найко Т.И., Мистохудинова С.Л. Гранулометрический состав и геохимические особенности донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска) // Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века: материалы 12-й международной конф., 17–18 мая 2012 г., г. Минск, Республика Беларусь / под ред. С. П. Кундаса, С. С. Позняка. – Минск: МГЭУ им. А.Д.Сахарова, 2012. – С. 350.
3. Слукковский З.И., Полякова Т.Н. Макрозообентос реки Неглинка и его связь с химическим составом донных отложений водоема // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIII молодежной научной конфе-

ренции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца. Петрозаводск.: КарНЦ, 2012. С. 89-91.

4. **Слуковский З.И.** Свинец, кадмий, цинк в донных отложениях р. Неглинки // Науки о земле: задачи молодых. Материалы 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 64-69.

5. **Слуковский З.И.**, Бубнова Т.П., Рыбаков Д.С. Графическое представление результатов гранулометрического анализа глинисто-алеврито-песчаных отложений малой городской реки // Математические исследования в естественных науках. Труды VIII Всероссийской научной школы. Апатиты, Геологический институт Кольского НЦ РАН, Кольское отделение РМО, 15-16 октября 2012 г. / Ред. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты: Изд-во К & М, 2012. – С. 31-34.

6. **Слуковский З.И.** Подвижные формы Pb, Cd и Hg в донных отложениях рек города Петрозаводска (Карелия) // Школа экологической геологии и рационального недропользования. Материалы тринадцатой межвузовской молодежной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет. 2013. С. 166–169.

7. **Слуковский З.И.**, Полякова Т.Н. Биоаккумуляция химических элементов бентосными беспозвоночными малых городских водотоков (на примере олигохет рек г. Петрозаводска) // Геохимия и минералогия геозосистем крупных городов. Материалы международной конференции. СПб.: Изд-во ВВМ. 2013. С. 76–79.

8. **Слуковский З.И.** О применимости Li-нормирования при эколого-геохимических исследованиях малых водных объектов Республики Карелии // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы: Материалы VIII международной Биогеохимической Школы, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского. Гродненский государственный университет, 11-14 сентября 2013 г./Отв. Ред. В.В. Ермаков. – М: ГЕОХИ РАН, 2013. 413–416.

9. **Слуковский З.И.**, Медведев А.С. Применение рентгенофлуоресцентного анализа при для геоэкологических исследований малых рек урбанизированных территорий // Экологическая геология: теория, практика, региональные проблемы: Материалы третьей международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 20-22 ноября 2013 г. – Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия», 2013. – С. 204–207.

В монографиях и учебных пособиях:

1. Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия / Рыбаков Д.С., Крутских Н.В., Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б., **Слуковский З.И.**, Лазарева О.В., Кричевцова М.В. СПб.: Изд-во ООО «ЭлекСис». 2013. 130 с.

2. Шелехова Т.С., **Слуковский З.И.** Оценка состояния водных экосистем в условиях урбанизации по диатомовым комплексам и концентрации химических элементов в донных осадках // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А.В. Литвиненко, Т.И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2013. С. 61–69.