

Санкт-Петербургский государственный университет

***ПИТЛЕВ Роман Андреевич***

**Выпускная квалификационная работа**

***Оценка загрязнения тяжёлыми металлами донных осадков оз. Суури  
(Ленинградская область)***

Уровень образования:

Направление *05.03.06 «Экология и природопользование»*

Основная образовательная программа *СВ.5024 «Экология и  
природопользование»*

Научный руководитель:

доцент кафедры геоэкологии,

кандидат геолого-минералогических наук,

Зеленковский Павел Сергеевич

Рецензент:

научный сотрудник федерального государственного бюджетного

учреждения «Национальный парк «Себежский»,

кандидат биологических наук,

Хохряков Владимир Рафаэлевич

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

Введение.....	3
1. Литературный обзор .....	4
2. Физико-географическое описание.....	8
3. Материалы и методы.....	12
3.1. Полевые исследования .....	12
3.2. Лабораторные исследования.....	16
3.3. Камеральная обработка .....	17
4. Результаты анализа проб донных отложений .....	20
4.1. Анализ статистических закономерностей распределения исследуемых элементов в пробах донных отложений.....	20
4.2. Анализ стратифицированных колонок донных отложений ....	25
4.3. Анализ пространственного распределения исследуемых элементов в донных отложениях.....	28
5. Выводы .....	33
Благодарности .....	34
Список литературы .....	35
Приложения.....	40

## **Введение**

Донные отложения являются важной депонирующей средой, в которой аккумулируются вещества, поступающие в водные объекты. Изучение донных отложений позволяет провести интегральную оценку степени антропогенного воздействия на водные объекты и их водосборную площадь за длительный период времени.

Тяжелые металлы являются репрезентативным индикатором антропогенного воздействия на территорию. Изучение их валового содержания в различных компонентах природной среды предоставляет возможность своевременно выявить наличие нагрузки на исследуемые объекты в результате деятельности человека (Коннонова, 2016; Подлипский, 2015).

Объектом исследования было выбрано оз. Суури в Приозерском районе Ленинградской области.

**Цель работы:** установить закономерности распределения тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури.

### **Задачи работы:**

- Изучить существующие исследования по данной теме;
- Разработать сеть пробоотбора. Провести отбор проб стратифицированных и нестратифицированных (поверхностных) донных отложений на оз. Суури;
- Осуществить пробоподготовку и проанализировать пробы донных отложений;
- Исследовать статистические закономерности распределения исследуемых тяжёлых металлов;
- Исследовать зависимость изменения содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной в донных осадках;
- Исследовать закономерности пространственного распределения исследуемых тяжёлых металлов;

**Научная новизна.** Проведение регулярного мониторинга состояния водных объектов позволяет как изучить актуальное состояние водоемов, так и следить за изменением их параметров со временем. Данная работа позволит обновить существующие данные о содержании некоторых тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури, а также создать актуальную базу данных для осуществления дальнейших исследований.

**Актуальность.** Озеро Суури, предположительно, подвержено антропогенному воздействию, вследствие близости расположения автодороги А-121 «Сортавала». Кроме этого, на исследуемом озере находится учебно-научная база Санкт-Петербургского государственного университета «Приладожская», на которой регулярно проводятся учебные практики.

## 1. Литературный обзор

Индустриализация и урбанизация увеличили антропогенный вклад тяжёлых металлов в биосферу. Тяжёлые металлы являются важным индикатором антропогенного воздействия на территорию, именно поэтому изучение их валового содержания в различных компонентах природной среды предоставляет возможность своевременно выявить наличие нагрузки на окружающую среду в результате деятельности человека (Коннонова и др., 2016, Подлипский, Зеленковский, 2015).

Термин "тяжёлый металл", хотя часто и не имеет строгого определения, обычно применяется к тем металлам, удельный вес которых превышает 5 г/см<sup>3</sup>. Существует около 40 элементов, которые попадают в эту категорию (Sharma, Agrawal, 2005). Данная группа элементов отличается относительно высокой токсичностью в достаточно низких концентрациях, а также способностью к биоаккумуляции (Казакова и др., 2020). С точки зрения техногенной нагрузки наиболее опасными загрязняющими веществами являются микроэлементы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As (Толкачев и др., 2022).

В данной работе проанализировано валовое содержание Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, и As. Выбор данных элементов обоснован тем, что они являются главными индикаторами антропогенного воздействия на среду (Алексеева и др., 2022). Более того, шведские учёные описывают данный набор тяжёлых металлов как «traffic-emitted metals» (Hjortenkrans и др., 2006), что можно перевести как «металлы, выбрасываемые дорожным движением». В автомобильных шинах содержится цинк и медь. Доля окиси цинка (ZnO) в автомобильных шинах составляет до 2% от её веса (Dore и др., 2008). Свинец в больших количествах содержится в этилированном бензине, однако он запрещён к производству и использованию в России и многих других странах. Никель и медь содержатся в сырой нефти и продуктах её переработки, таких как в автомобильное топливо, резина и битум. (Dore и др., 2008; Ларин, 2017). В дизельное топливо добавляются металлоорганические соединения на основе хрома (Ларин, 2017).

Крупнейшими источниками выброса хрома являются сжигание угля, производство чугуна и стали, а также производство химикатов на основе хрома. Основными источниками загрязнения медью являются добыча и производство этого металла, износ автомобильных шин и тормозов, сжигание горюче-смазочных материалов в промышленности и сжигание угля. Для выбросов никеля основными источниками являются сжигание битума и переработка нефти. До запрета этилированного бензина основным источником загрязнения свинцом был автотранспорт. Сейчас основными являются металлургия и прочие промышленные выбросы (Dore и др., 2008).

Цинк является одним из важных биогенных элементов, относящихся к группе тяжёлых металлов. Основными источниками загрязнения цинком являются атмотехногенные выбросы предприятий и автомобильного транспорта, а также селитебные зоны (Масленников и др., 2014).

Кларковые числа для вышеперечисленных элементов равны: As – 1,7 мг/кг, Cr – 83 мг/кг, Cu – 47 мг/кг, Ni – 58 мг/кг, Pb – 16 мг/кг, Zn – 83 мг/кг (Виноградов, 1962).

В РД 52.24.609-2013 «Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов» сказано, что донные отложения – это донные наносы и твёрдые частицы, образовавшиеся и осевшие на дно в результате внутриводоёмных физических, химических и биологических процессов, в которых участвуют вещества как естественного, так и антропогенного происхождения. (Зенин, Белоусова, 1988).

Донные отложения являются важнейшей составляющей водных объектов, в значительной степени определяющей их состояние. В донных отложениях происходит аккумуляция большей части органических и неорганических веществ, в том числе наиболее опасных и токсичных загрязняющих веществ, которые при определенных условиях (ветровое взмучивание, изменение pH, минерализации, водности, проведение дноуглубительных работ, дампинг и т.д.) могут переходить в водную толщу, вызывая ее вторичное загрязнение.

Загрязненные донные отложения могут влиять на видовой состав обитающей в них бентофауны, на бионакопление наиболее опасных веществ, нарушение цепи биоценоза. Поэтому при изучении экологического состояния водного объекта необходимо учитывать загрязнённость его донных отложений.

Процесс накопления и токсическое действие загрязняющих веществ в донных отложениях зависят от многих факторов: их природы и физико-химических свойств, типа донных отложений, температурного режима, окислительно-восстановительных условий, наличия взвешенных веществ и т.д. Последним принадлежит особая роль, поскольку на них сорбируется значительная часть поступающих в водный объект загрязняющих веществ. Небольшие глубины, особенности водосбора, характер поступления сточных вод, присутствие взвешенных веществ, характерные для большинства водотоков и водоемов, способствуют седиментации сорбированных взвешенными веществами загрязняющих веществ без существенного изменения их химического состава и интенсивному накоплению на дне, где процессы биохимического окисления протекают гораздо медленнее.

На этом основано использование донных отложений в качестве индикаторов при оценке состояния водных объектов, особенно при их хроническом загрязнении, идентификации источников загрязнения, характеристике биогенного или антропогенного происхождения их химического состава и т.д.

Оценку состояния донных отложений водных объектов обычно проводят на основании данных о содержании и химическом составе загрязняющих веществ в них. Результаты химического анализа позволяют выявить природу этих веществ, оценить характер, степень и источник загрязнения, на основании которых принимаются целенаправленные природоохранные мероприятия по охране водных объектов.

Другими авторами также показано, что донные отложения содержат значительное количество загрязнений, которые принимают активное участие в процессах формирования качества воды водоемов и оказывают неблагоприятное воздействие на течение процессов самоочищения воды (Искандарова и др., 2019). Химический состав донных отложений в большинстве случаев наиболее репрезентативен в контексте оценки загрязнённости водоёма и позволяет проследить локальные загрязнения в ретроспективе, в то время как исследования химического состава воды позволяют оценить только текущее состояние экосистемы, исключая осадённые формы микроэлементов (Билая и др., 2019). Поэтому изучение загрязнения донных отложений является важной частью экологических исследований.

Озеро Суури изучалось различными исследователями. Исследования состояния малых озёр карельского Приладожья, в том числе озера Суури, традиционно выполняются с конца 1980-х гг. ежегодно в рамках производственных практик студентов геоэкологов, гидрологов и научных исследований по грантам (Дмитриев, 2014).

Последние крупные исследования валового содержания исследуемых в данной работе тяжёлых металлов и металлоидов датируются 1980 годом. В работе Тарновского А.А. показаны данные геохимических исследований донных отложений озёр Карельского перешейка, отражающие собой некоторые результаты полевых исследований автора, проводимых им с 1963 года. На 1980 год, средние уровни валового содержания исследуемых элементов составили: Ni – 32 мг/кг, Cr – 42 мг/кг, Pb – 28 мг/кг, Zn – 76 мг/кг, Cu – 36 мг/кг, Fe – 42000 мг/кг (Тарновский, 1980). Однако, стоит заметить, что на оз. Суури Тарновским А. А. было проанализировано только 2 разреза – один на южном берегу озера, а второй на северном.

На оз. Суури также проводится значительное количество геоэкологических исследований. Велись наблюдения за химическим и биологическим составом и физическими свойствами воды, оценивалось влияние факторов среды на формирование

первичной продукции в озере, оценивались трофическое состояние, качество воды, самоочищение озера (Дмитриев, 2014).

В 2022 году в процессе проведения учебной экологической практики по зимней лимнологии было первично изучено валовое содержание исследуемых в данной работе тяжёлых металлов и металлоидов в некоторых участках озера Суури (Богданов, Питлев, 2022). Текущая работа продолжает вышеуказанное исследование, значительно расширяя сеть пробоотбора и, как следствие, размер выборки.

Методики данного исследования широко отработаны на других объектах, таких как озёра Национального парка «Смоленское Поозерье» и Национального парка «Себежский». В исследовании закономерностей распространения тяжёлых металлов в донных отложениях озёр Ороно, Белое и Себежское (Псковская обл.) отбирались пробы как поверхностных донных отложений, так и стратифицированных колонок с ненарушенной структурой. Авторы пришли к выводу, что повышенные концентрации тяжёлых металлов наблюдались вдоль проходящих рядом с берегами этих озёр автомобильных дорог и селитебных зон. Кроме этого, по полученным данным отчётливо видно, что наибольшие значения Zn и Pb видны в верхней части колонки (Белая и др., 2022). В 2015, 2020 и 2022 годах проводились исследования трёх озёр на территории Национального парка «Смоленское Поозерье» – Баклановское, Букино и Лошамье. Озеро Баклановское расположено в хозяйственной функциональной зоне Национального парка, озеро Букино – в рекреационной, а озеро Лошамье – в заповедной зоне. В данном исследовании так же проводился отбор поверхностных донных отложений и стратифицированных колонок с ненарушенной структурой. В своём исследовании авторы показывают, что накопление Zn в донных отложениях озёр Лошамье и Букино приурочено к наиболее глубоким частям озера. Для озера Баклановское прослеживается закономерность уменьшения содержания всех тяжёлых металлов с глубиной колонки, в т.ч. цинка (Алексеева и др., 2022).

## 2. Физико-географическое описание

Озеро Суури расположено в северо-восточной части Карельского перешейка в одном километре от берега Ладожского озера, в 150 км к северу от Санкт-Петербурга, в 3,5 км от железнодорожной станции Кузнечное Приозерского района. На берегу оз. Суури расположена учебно-научная база «Приладожская» Санкт-Петербургского государственного университета, на базе которого и проводился отбор проб донных отложений.



Рис. 1. Карта-схема места проведения исследования

Объект исследования занимает территорию на южной границе Балтийского щита, где на поверхность выходит кристаллический фундамент. Район исследования относится к плоскогорье-ложбинному с преобладанием каменистых маломощных почв лёгкого механического состава. Геохимические свойства почв тесно связаны с близко залегающими кристаллическими породами Балтийского щита. Характерны выходы кислых и среднекислых кристаллических пород, главным образом гранитогнейсов. (Дмитриев и др., 1996)

Озеро Суури расположено в межсельговом понижении. Основную роль в формировании района играют древние архейские и залегающие поверх них с глубоким размывом молодые четвертичные комплексы пород. Для нее характерен грядово-

холмистый рельеф с небольшими высотами, сформированный под влиянием экзогенных и эндогенных процессов. Эндогенные процессы данного региона включали в себя тектонические движения, которые и привели к образованию долин рек и котловин озер. Ледниковая эрозия, относящаяся к доминирующим в данном регионе экзогенным процессам, привела к преобладанию эрозионных и аккумулятивных ледниковых форм рельефа, таких как сельги, повсеместные выходы горных пород, моренные гряды, озерно-ледниковые песчаные равнины, зандровые равнины и озово-камовые комплексы (Румянцев, 2015). Озёрные отложения водных бассейнов, различных по возрасту и бассейну, сформировались в послеледниковый период и были найдены на территории учебно-научной базы в виде горизонтально-слоистых глин, мелко- и среднезернистых песков и супесей. Озеро Суури относится к лагунно-лиманному типу озёр, отшнуровавшихся от Ладожского озера (Тарновский, 1980).

Климат на территории исследования умеренно-континентальный, с продолжительной зимой и прохладным дождливым летом. Погода относительно неустойчива, со сменой атлантических циклонов и арктических воздушных масс. Зимой циклоны вызывают оттепели, а летом – осадки и понижение температуры. Зима – самый продолжительный сезон и длится в среднем 150 дней. Весна наступает примерно в середине апреля, с возможными заморозками в мае. Лето начинается в первую половину июня и составляет в среднем 120 дней. В среднем за год на этой территории выпадает 600-750 мм осадков, преимущественно летом и осенью. Ежегодно выпадает примерно 150-250 мм снега, который держится около 5,5 месяцев (Румянцев, 2015).

Режим увлажнения характеризуется довольно большим количеством выпадающих осадков (600-750 мм в год), относительно умеренными величинами испарения (около 350 мм в год), высокой влажностью воздуха и большой облачностью. Озеро Суури сточное, в течение года не пересыхает. Из оз. Суури берёт начало ручей Мянтюлампи (Галанина, 2012), который затем впадает в залив Лехмалахти Ладожского озера, протекающий в его западной части.

Карта-схема глубин оз. Суури, представленная на рис. 2, была отрисована в программе QGIS 3.20 по данным исследования Седовой С. А. и Дмитриева В. В. (Седова, Дмитриев, 2020).

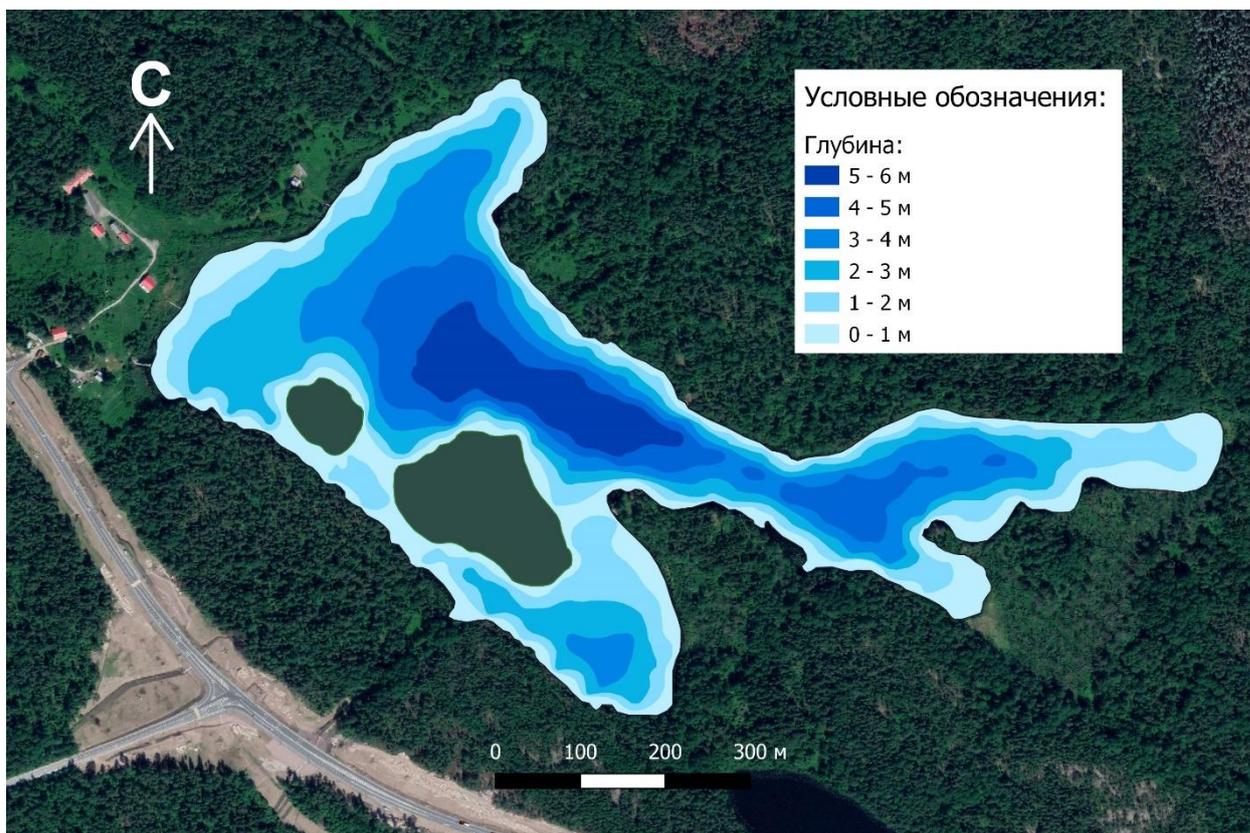


Рис. 2. Карта-схема глубин оз. Суури

Озеро Суури неглубокое, максимальная глубина его составляет 5-6 метров в центре озера (рис. 2). Средняя глубина озера составляет 3,3 метра. Площадь озера равна 0,397 км<sup>2</sup>. Трофический статус водоёма был оценён как мезотрофный (Дмитриев и др., 2016).

Восточный берег озера Суури низкий и пологий, торфяно-илистый; юго-восточный берег – низкий, заболоченный. Западный берег высокий, обрывистый, каменистый, местами наблюдаются выходы скальных пород. На приозерной террасе оз. Суури формируются дерново-подзолистоглеевые и глееватые почвы на озёрно-ледниковых ленточных глинах. В замкнутых участках и понижениях присутствуют торфяно-болотные почвы переходных болот (Дмитриев и др., 1996).

В районе озера Суури авторы выделяют 6 основных биотопов: редкий сосново-берёзовый лес на вершинах сельг; смешанный лес на скалах и склонах сельг; серо-ольшаники в понижениях между скал; луга в межсельговых понижениях; берега водоёмов, делящиеся на два типа, описанных выше (Мальчевский, Гагинская, 2016). Растительность на самом озере Суури представлена тростником и камышом и сосредоточена вдоль берега. В центре озера находятся два острова общей площадью менее 1 км<sup>2</sup>, растительность которых представлена в основном соснами и лишайниками, с берёзой, осинкой, ольхой в подросте.

Ближайший населённый пункт – посёлок Кузнечное в 2 км к западу от озера, также на расстоянии 2 км находятся два гранитных карьера – на юге и западе от озера. В 1 км к востоку от озера находится заброшенная каменоломня. В 1,5 км к северо-западу от озера находится погрузочный причал для гранита, добываемого на карьере. Кроме этого, в 3 км к югу от оз. Суури находится камнеобрабатывающий завод. Вдоль юго-западной границы озера, на расстоянии примерно от 100 до 200 метров, проходит автодорога А-121 «Сортавала», ведущая из г. Санкт-Петербурга в г. Сортавала, Республика Карелия. На западном берегу озера расположена учебно-научная база «Приладожская» Санкт-Петербургского государственного университета.

### 3. Материалы и методы

#### 3.1. Полевые исследования

Проведение отбора проб донных отложений проводилось в феврале 2023 года. Отбор стратифицированных колонок донных отложений с ненарушенной структурой проводился с помощью трубок-пробоотборников ГОИН 1,5 и ГОИН-1.



Рис 3. ГОИН-1,5 в работе. Фото автора

Этот прибор представляет собой стальную трубу длиной 1,5 метра у ГОИН-1,5 и 1 метр у ГОИН-1 (далее, по причине идентичного устройства пробоотборников, оба будут именоваться ГОИН), внутри которой располагается вкладыш, состоящий из двух половинок. Вкладыш удерживается в трубе наконечником, накрученным на нижний конец трубы. Наконечник имеет острую кромку для врезания в грунт. На верхний конец трубы навинчивается груз со стабилизатором, служащий для лучшего врезания трубки в грунт и придания ей вертикального положения при падении в воде. В верхней части груза находится клапан, который открывается давлением воды при опускании и закрывается при подъеме трубки. К грузу прикреплена скоба с крюком, служащая для крепления трубки к тросу. Трубка ГОИН свободно опускается на тросе и врезается в грунт под действием собственного веса. При погружении клапан трубки открывается силой сопротивления воды, после чего вода свободно проходит через трубку. В момент остановки после врезания трубки в грунт, клапан под действием силы инерции собственного веса плотно закрывает отверстие груза. При подъеме трубки сила сопротивления воды удерживает клапан закрытым, предохраняя взятую колонку донных отложений от вымывания и выпадения.

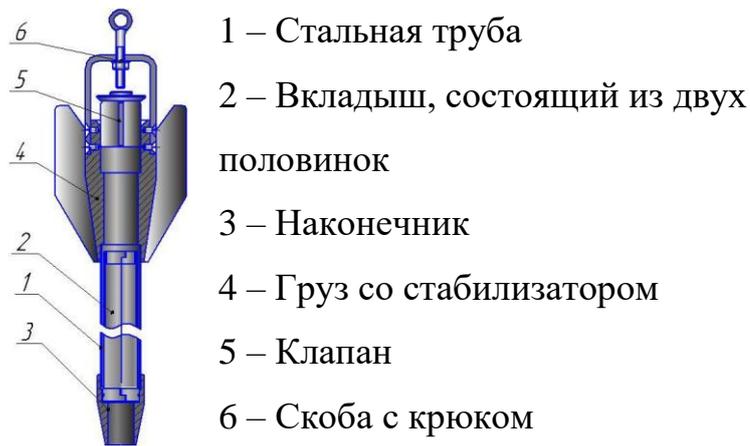


Рис. 4. Схема пробоотборника ГОИН-1,5

Для отбора стратифицированной колонки донных отложений с ненарушенной структурой с помощью пробоотборника ГОИН использовался определённый порядок действий. Сначала необходимо определить координаты заданной точки пробоотбора, затем на данной точке необходимо сделать прорубь и очистить её ото льда, который может помешать работе пробоотборника (попасть во вкладыш, забить собой и заклинить наконечник с клапаном). После этого предварительно промытая и привязанная к тросу трубка ГОИН запускается и втыкается в дно озера. Пробоотборник достаётся из проруби и укладывается на заранее подготовленное место, у ГОИНа отворачивается наконечник, достаётся вкладыш с пробой. Необходимо измерить длину полученной колонки с помощью рулетки. После этого проводится подробное описание колонки вниз по профилю. Отмечают влагонасыщенность, плотность, цвет, наличие органических остатков, литологический состав, запах, наличие разрывов и другие особенности разреза. Затем колонка делится на равные части по 10 см (или при выраженной смене слоёв) и распределяется по полиэтиленовым пакетам вместе с подписанной этикеткой.

Отбор проб поверхностных донных отложений проводился с помощью бентосного дночерпателя Ван-Вина.

Пробоотборник, представленный на рис. 5, состоит из внешнего и внутреннего ковшей, установленных на одной оси и подвижных относительно друг друга. Ковши подвешены на подвесе с помощью тросов и цепи. Перед опусканием пробоотборника в водоём необходимо зафиксировать карабин цепи пробоотборника в крюке-сбрасывателе. Это позволяет опускать пробоотборник на дно водоёма в открытом состоянии. В момент, когда пробоотборник касается дна, натяжение цепи между крюком-сбрасывателем и ковшами ослабевает и крюк-сбрасыватель под действием собственного веса размыкает фиксацию между подвесом и цепью. Подъём пробоотборника осуществляется на тросах. В момент натяжения тросов между ковшами и подвесом во время подъёма происходит

смыкание ковшей пробоотборника, что позволяет поднять пробоотборник со дна водоёма в закрытом состоянии вместе с отобранной пробой. Ковши пробоотборника имеют специальные отверстия, позволяющие удалять воздух во время погружения.



Рис. 5. Бентосный дночерпатель Ван-Вина в работе. Фото: Малкова Юлия

Для отбора проб поверхностных донных отложений с помощью бентосного дночерпателя Ван-Вина использовался определённый порядок действий. Так же, как и в случае с ГОИНОм необходимо определить координаты заданной точки пробоотбора, сделать прорубь необходимого размера и очистить её ото льда, который может заклинить подвижные части прибора. Предварительно промытый пробоотборник необходимо взвести в рабочее положение, плавно опустить его на дно водоёма и вздёрнуть верёвку, чтобы разблокировать ковш. Достать пробоотборник из проруби на заранее подготовленное место, раскрыть ковш, извлечь пробу. Провести описание полученной пробы. Отмечают влагонасыщенность, плотность, цвет, наличие органических остатков, литологический состав, запах и другие особенности пробы и отбирают пробу в полиэтиленовый пакет вместе с подписанной этикеткой.

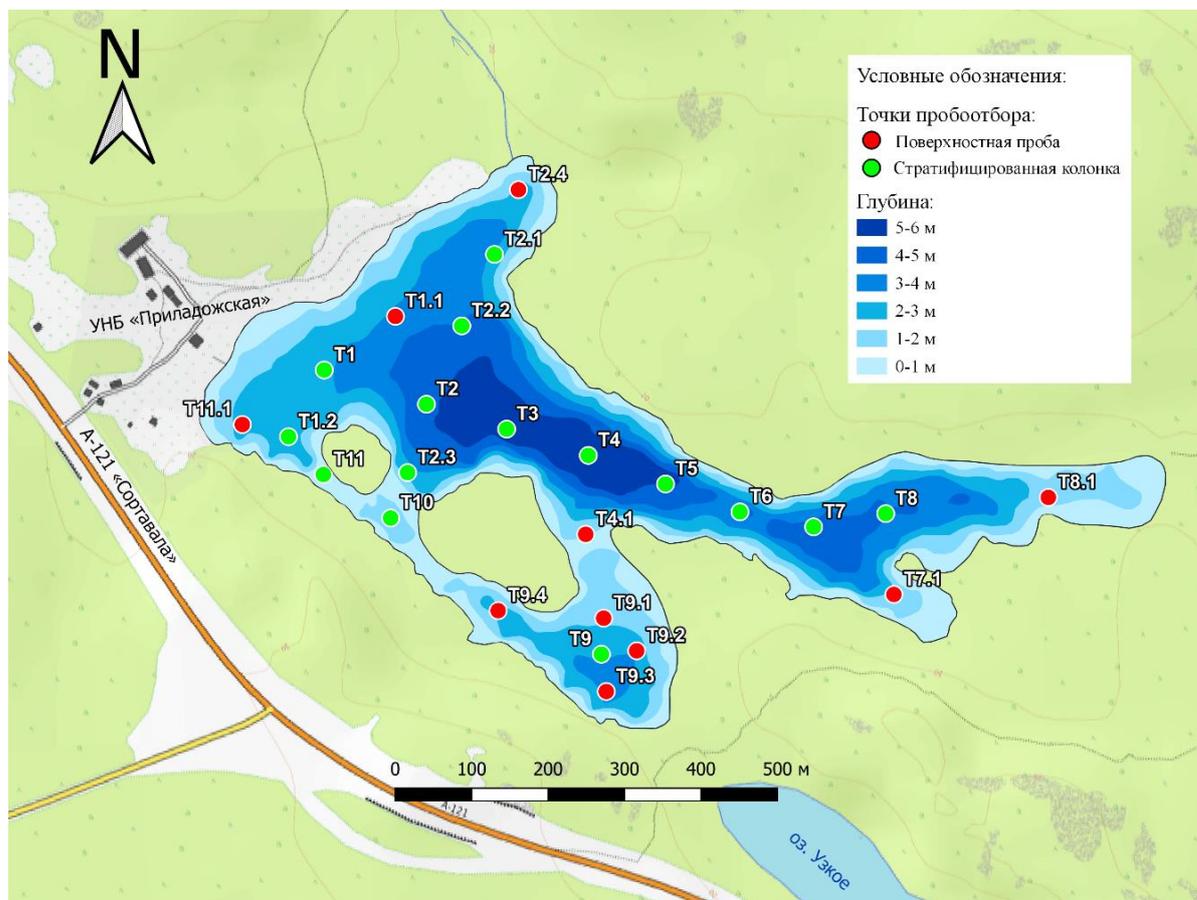


Рис. 6. Карта-схема точек пробоотбора на оз. Суури

Отбор проб поверхностных донных отложений и стратифицированных колонок донных отложений с ненарушенной структурой проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость». На оз. Суури было отобрано 158 проб донных отложений (15 стратифицированных колонок и 10 поверхностных проб донных отложений). Кроме этого, было отобрано 6 проб со стратифицированной колонки в 100 метрах от берега Ладожского оз. к северу от оз. Суури.

Сеть пробоотбора составлялась таким образом, чтобы покрыть предположительно менее и более загрязнённые части озера. Предположительно менее загрязнёнными частями озера являются: северная часть озера, стекающая в ручей Мянтюламп и наименее глубокие участки озера. Предположительно наиболее загрязнённой частью озера является самый глубокий участок в центре оз. Суури (рис. 6). В соответствии с вышесказанным, были установлены два профиля с северо-запада на юго-восток, один профиль с северо-востока на юго-запад. Поверхностные пробы донных отложений отбирались вокруг точек отбора стратифицированных колонок донных отложений, для увеличения площади покрытия сетью пробоотбора.

Также, в данной работы были использованы данные анализа проб семи стратифицированных колонок донных отложений с ненарушенной структурой, отобранных на оз. Суури в феврале 2022 года.

### 3.2. Лабораторные исследования

Пробоподготовка и анализ проб осуществлялся в лаборатории пробоподготовки и пробообработки отдела по направлениям география, геология, геоэкология и почвоведение Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета

В процессе пробоподготовки пробы были высушены в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния и измельчены с помощью планетарной мельницы Pulverisette 7 на скорости вращения 400 об./мин в течение одной минуты на пробу. Затем пробы были тщательно перетёрты в ступке до пылеватого, тонкозернистого состояния, так как рентгеновский анализатор, о котором будет сказано далее, работает с пробами, крупность зёрен которых составляет менее 3 мм.

Анализ обработанных проб донных отложений производили рентгенофлуоресцентным методом с помощью рентгеновского анализатора AP-104. Анализатор предназначен для экспрессного одновременного определения массовой доли четырёх химических элементов с атомными массами от 22 до 42 и от 73 до 83 в измельчённых пробах, с крупностью зёрен до 3 мм (Грабовский, 1991).

Анализатор состоит из трех блоков: блока возбуждения и детектирования, анализатора импульсов и блока питания (Грабовский, 1991).

Блок возбуждения и детектирования (БВД) предназначен для генерации рентгеновского излучения, возбуждения в исследуемой пробе характеристических излучений химических элементов и регистрации по рентгенооптической схеме Йоганссона тех длин волн рентгеновского излучения, которые соответствуют выбранным химическим элементам. Анализатор импульсов предназначен для амплитудного анализа импульсов по каждому из пяти каналов, накопления и отображения накопленной информации. Каждый измерительный канал в анализаторе импульсов содержит свой основной усилитель, систему автоматической подстройки усиления и амплитудный селектор (Грабовский, 1991).

Суть проведения эксперимента заключалась в следующих действиях: через 20 минут после технической проверки и включения анализатора были выполнены измерения 2-х контрольных проб (шифры Z и Q). Проба Q – «нулевая» (измельченный горный хрусталь). Проба Z - с надежно установленными содержаниями определяемых элементов поочередно засыпались ранее измельченные пробы (отситовка до 1 мм) и устанавливались в каретку-прободержатель пробоподающего устройства (Грабовский, 1991).

Пробоподающее устройство предназначено для установки исследуемой или контрольной пробы в зону облучения. Оно представляет собой каретку с двумя гнездами для установки контейнеров с пробами и имеющую возможность перемещения по направляющей. Каретка имеет вращающееся гнездо для исследуемой пробы, которое при возвратно-поступательном ее перемещении поочередно устанавливается в зону облучения (Грабовский, 1991).

Перемещение исследуемой и контрольной пробы в зоны измерения осуществлялось вручную. При этом каретка с помещенной в ней исследуемой пробой досылают до упора для вращения гнезда. С помощью клавиатуры анализатора импульсов нажимают клавишу «С», то есть старт. По окончании времени накопления информации (80 секунд) вращение исследуемой пробы прекращают. Переводят каретку в правое крайнее положение и вынимают пробы. В сопроводительном журнале записывают номер пробы и результаты измерений (Грабовский, 1991).

После каждой 10-ой пробы выполняли измерения контрольных проб Z и Q. При этом результаты измерений контрольных проб по всем четырем измерительным каналам не должны отличаться от предыдущих более чем на 10%. Далее последовательность действий повторяли. Контрольные пробы одновременно выполняли роль градуировочных для расчета содержаний (Грабовский, 1991). В результате получена информация о валовом содержании проб донных отложений по следующим элементам: железо (Fe), свинец (Pb), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr) и мышьяк (As). Содержание мышьяка во всех точках пробоотбора оказалось ниже порога обнаружения прибора (5 мг/кг), вследствие чего в настоящей работе данный элемент не рассматривается. Железо является макроэлементом, и повышение его концентраций в некоторых точках с наибольшей вероятностью не будет связано с антропогенным воздействием. По этой причине железо в данной работе также не рассматривается.

### 3.3. Камеральная обработка

Статистическая обработка полученных в ходе лабораторного этапа материалов проводилась с помощью программы Microsoft Excel.

В настоящее время не установлены предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в донных осадках. Данный факт сильно сокращает возможности аргументированной оценки качества донных осадков и/или их влияния на экологическое состояние водного объекта. В последнее время отечественными исследователями широко применяется суммарный индекс загрязнения донных осадков:

$$Z_c = \left( \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i\Phi}} \right) - (n - 1),$$

где  $C_i$  – фактическое содержание  $i$ -го загрязняющего вещества в донных осадках;  $C_{i\Phi}$  – фоновое содержание  $i$ -го загрязняющего вещества в донных осадках;  $n$  – количество веществ (в расчёт включаются только вещества, содержание которых превышает фоновые значения). По сути, это аналог суммарного индекса загрязнения почв, а в окончательной интерпретации используется та же шкала экологического состояния донных осадков, что и для почв (Опекунов, Ганул, 2014):

Таблица 1. Шкала оценки степени химического загрязнения почвы в соответствии с СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы»

Суммарный показатель загрязнения $Z_c$	Категории загрязнения
< 16	Допустимая
16-32	Умеренно опасная
32-128	Опасная
>128	Чрезвычайно опасная

Для расчета погрешности измерения содержания изучаемых элементов (Ni, Cr, Zn, Pb, Cu) рентгенофлуоресцентным методом использовалась следующая формула среднестатистической погрешности:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - x_{i2})^2}{(n-1)}},$$

где  $x_{i1}$  – первичное измерение концентрации тяжелого металла в пробе,  $x_{i2}$  – повторное измерение концентрации тяжелого металла в пробе,  $n$  – количество повторных измерений.

Порог обнаружения элемента рассчитывается по формуле:

$$\alpha = 3 \times \sigma,$$

где  $\sigma$  – рассчитанная среднеквадратическая погрешность для данного химического элемента. Достоверность полученных значений равняется 99%.

Таблица 2. Результаты расчёта среднестатистической погрешности и порога обнаружения для данных тяжёлых металлов

Элемент	Ni мг/кг	Cr мг/кг	Pb мг/кг	Zn мг/кг	Cu мг/кг
Среднестатистическая погрешность	± 6	± 8	± 3	± 13	± 6
Порог обнаружения элемента	18	24	9	39	18

Для проверки на нормальность или логнормальность распределения полученных данных был выполнен тест Харке-Бера. Этот тест асимптотический, или же тест на большой выборке, проверяющий гипотезу посредством сверки асимметрии и эксцесса с моментами нормального распределения (Gujarati, Porter, 2008). Тест Харке-Бера выглядит следующим образом:

$$JB = n \left( \frac{S^2}{6} + \frac{(K - 3)^2}{24} \right),$$

где  $n$  – количество значений,  $S$  – коэффициент асимметрии,  $K$  – коэффициент эксцесса. Если полученное значение меньше некоторого уровня значимости, то мы можем отклонить гипотезу о том, что данные распределены нормально (Jarque, Bera, 1987).

Для создания графических и картографических материалов использовалось следующее программное обеспечение: Microsoft Excel, QGIS 3.20, Surfer 25, SAS.Планета 20.

#### 4. Результаты анализа проб донных отложений

##### 4.1. Анализ статистических закономерностей распределения исследуемых элементов в пробах донных отложений

За два полевых сезона всего было отобрано 232 пробы. Они были проанализированы на валовое содержание никеля, хрома, свинца, цинка и меди.

Оценим полученные результаты с точки зрения статистических закономерностей.

Таблица 3. Различные данные по валовому содержанию исследуемых тяжёлых металлов (мг/кг)

Элемент	Ni	Cr	Pb	Zn	Cu
Рассчитанное фоновое содержание	78	104	35	167	67
Среднее арифметическое содержание	81	105	38	167	67
Медианное содержание в глинах на Ладожском озере	72	108	29	113	54
Средний уровень валового содержания в донных отложениях оз. Суури по Тарновскому, 1980 г.	32	42	28	76	36
Максимальное значение в пробах	130	157	76	243	158
Минимальное значение в пробах	43	67	20	92	27
Кларк по Виноградову, 1962	58	83	16	83	47

Самые высокие значения содержания в проанализированных пробах были обнаружены у цинка, хрома и меди – 243 мг/кг, 157 мг/кг и 158 мг/кг соответственно. Меньше всего в пробах оказалось содержание свинца и никеля – максимальные значения этих элементов равны 76 мг/кг и 130 мг/кг соответственно.

Полученные средние арифметические содержания исследуемых тяжёлых металлов в оз. Суури превышают кларковое число не более чем в 2 раза.

Значения валового содержания исследуемых тяжёлых металлов по Тарновскому А. А. за 1980 год не соответствуют современному фону оз. Суури и являются устаревшими, однако стоит принять их во внимание при дальнейшем обсуждении результатов исследования. Стоит заметить, что, во-первых, выборка в исследованиях Тарновского А. А. ограничивается только двумя разрезами, вдобавок к этому их мощность была гораздо больше (6,4 м и 3,2 м), чем мощность разрезов в текущем исследовании (80-120 см). Последний факт означает, что, по сути, данные Тарновского А. А. указывают на концентрации исследуемых тяжёлых металлов в материнской породе, никак не затронутые антропогенным воздействием. По данным среднего уровня валового содержания исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури за 1980 год можно сделать

вывод о том, что средний уровень валового содержания свинца в материнской породе превышает кларковое число, средний уровень цинка примерно равен своему кларковому числу, а средние уровни никеля, меди и хрома меньше своих кларковых значений.

Также были получены данные валового содержания исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях на точке Л2, расположенной на Ладожском озере:

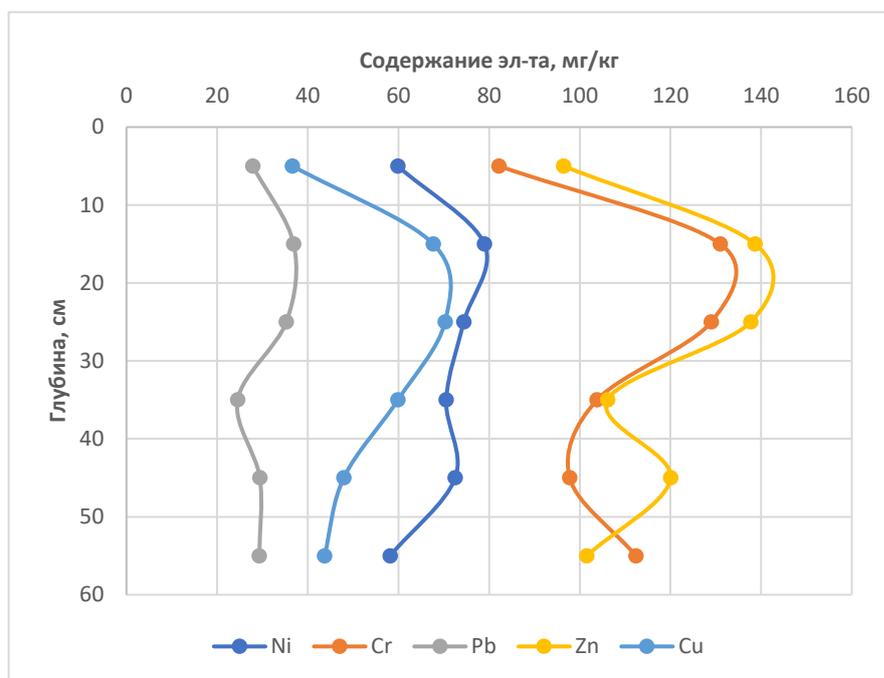


Рис. 7. График изменения содержания тяжёлых металлов с глубиной колонки на точке Л2 (Ладожское озеро)

Верхние 3-4 см разреза занимал песок, с резким переходом в серо-голубую глину, являющуюся подстилающей породой как для донных отложений оз. Суури, так и для данного участка Ладожского оз. Поэтому медианные значения содержания исследуемых тяжёлых металлов в глинах Ладожского оз. можно считать примерными природными концентрациями этих элементов в подстилающей породе.

Для оценки и выяснения наличия или отсутствия загрязнения необходимо установить фоновое содержание каждого исследуемого элемента. На данный момент существуют различные подходы к установлению фоновых концентраций химических элементов. Это значение может рассчитываться как среднее арифметическое, среднее геометрическое или медианное. Известно, что параметрическое среднее значение достоверно отражает распределение только с известными границами ряда. Однако распределение тяжёлых металлов в донных отложениях, приуроченное к различным природным и антропогенным процессам, не отвечает такому условию. Поэтому целесообразно подсчитывать непараметрическое среднее – чаще всего эту роль выполняет медиана (Терехова и др., 2017). Ещё в 60-х годах XX в. американские геохимики

рекомендовали при незакономерном статистическом распределении принять за фоновое содержание тяжёлых металлов медиану (Hawkes, Webb, 1963). Доказано, что если распределение отлично от нормального, то выборочная медиана значительно устойчивей среднего. Поэтому при несимметричном распределении независимых результатов измерений в качестве оценки параметра положения принимают медиану (Ваганов и др., 2008). Кроме этого, при установлении фонового значения исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури были рассмотрены различные данные, представленные в Таблице 3.

Если сравнить рассчитанные фоновые содержания исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури с данными Тарновского А. А. за 1980 год по средним уровням валового содержания этих элементов, то выясняется, что концентрации этих элементов различаются следующим образом: содержание никеля выше в 2,4 раза, хрома – в 2,5 раза, цинка – в 2,2 раза, меди – в 1,9 раз, а свинца – только в 1,25 раз. Также, по данным, представленным в Таблице 3 можно заметить, что рассчитанные фоновые концентрации никеля, хрома, свинца и меди в донных отложениях оз. Суури примерно сходятся с медианными концентрациями этих тяжёлых металлов в глинах Ладожского оз. Но, данные по концентрациям цинка расходятся примерно на 50 мг/кг, для выяснения причин чего далее необходимо рассмотреть закономерности распределения значений этих элементов.

Для оценки встречаемости разных концентраций и проверки на соответствие нормальному или логнормальному закону распределения были проанализированы данные выборки из 232 полученных значений содержания каждого исследуемого элемента в пробах и построены гистограммы распределения значений исследуемых тяжёлых металлов.

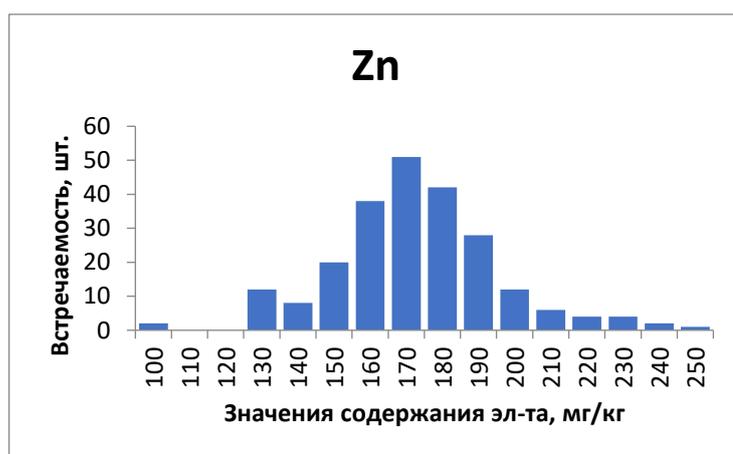


Рис. 8. Гистограмма распределения значений цинка

Распределение значений содержания цинка не соответствует ни нормальному, ни логнормальному законам распределения, что свидетельствует о неоднородности выборки, скорее всего указывающего на антропогенное влияние на повышенные концентрации цинка

в донных отложениях оз. Суури (Рогова и др., 2019). Фоновая (медианная) концентрация цинка равна 167 мг/кг. 43% значений цинка превышают рассчитанную фоновую концентрацию. Содержание цинка в донных отложениях оз. Суури с 1980 года изменилась в 2,2 раза. На данной гистограмме можно отметить, что различные значения на ней приурочены к различным условиям осадконакопления в озере (гранулометрический состав донных осадков, глубина озера и т.д.). Минимальные концентрации цинка соответствуют медианному содержанию цинка в глинах на точке Л2 (Ладожское оз.).

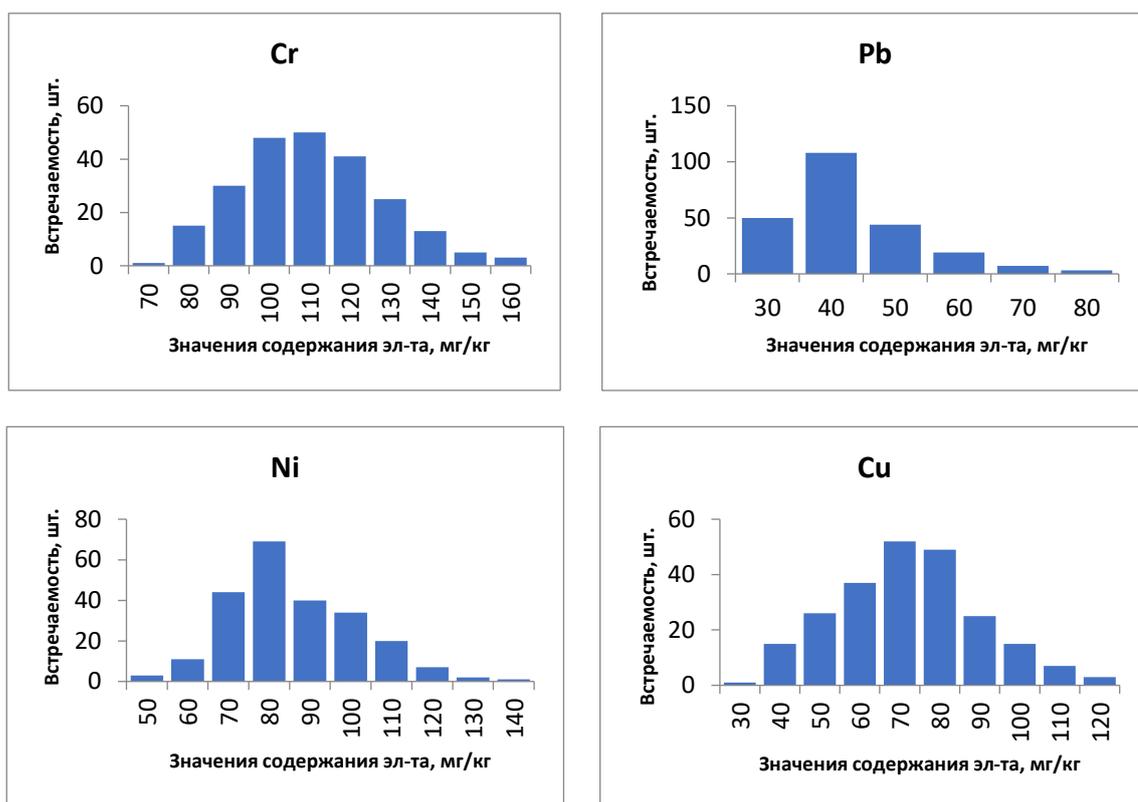


Рис 9. Гистограммы распределения значений хрома, никеля, свинца и меди

Распределение значений содержания хрома соответствует логнормальному закону. Фоновое (медианное) значение равно 104 мг/кг. На гистограмме распределения значений хрома можно отметить, что на выборку, скорее всего, влияет два фактора: природное распределение значений содержания хрома при различных условиях осадконакопления в озере и антропогенное привнесение хрома, приуроченное к более высоким, превышающим рассчитанный фон значениям содержания никеля на гистограмме. Эти два фактора, как видно на рис. 9, накладываются друг на друга, по причине того, что антропогенное влияние на содержание исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях озера хоть и присутствует, но оно невелико. При высоком уровне антропогенного воздействия на гистограмме распределения присутствуют пиковые значения (выбросы). Однако, в данном случае подобных закономерностей не наблюдается.

Распределение значений содержания никеля соответствует логнормальному закону. Фоновое (медианное) значение равно 78 мг/кг. На гистограмме распределения значений никеля заметны те же два фактора, описанные для распределения значений хрома: природный и антропогенный, но заметно чуть более значительное влияние антропогенного привнесения – чаще, чем у хрома, встречаются значения, превышающие фоновое. 45% значений никеля превышают рассчитанный фон, тогда как у хрома – 38%. Это подтверждается сравнением с данными Тарновского А.А. – содержание хрома в донных отложениях оз. Суури с 1980 года выросла в 2,5 раза, тогда как у никеля это содержание выросло только в 2,4 раза.

Распределение значений содержания свинца соответствует логнормальному закону. Фоновое (медианное) значение равно 35 мг/кг. 32% значений свинца превышают рассчитанный фон. Так же, как и для других элементов на рис. 9, прослеживаются два описанных ранее фактора, влияющих на выборку значений свинца. Что примечательно, содержание свинца в донных отложениях озера с 1980 года увеличилось только на четверть, что является наименьшим повышением содержания элемента среди всех исследуемых тяжёлых металлов.

Распределение значений содержания меди также соответствует логнормальному закону. Фоновая (медианная) концентрация меди равна 67 мг/кг. 43% значений меди превышают рассчитанный фон. На представленной гистограмме так же, как и в случае с никелем, хромом и свинцом прослеживаются два фактора, влияющие на выборку: природное распределение и антропогенное привнесение. С 1980 года рассчитанная фоновая концентрация выросла в 1,9 раза.

По полученным данным можно установить, что распределение значений всех исследуемых элементов, кроме цинка, подчиняется логнормальному закону распределения, что может говорить об отсутствии направленного однофакторного антропогенного воздействия на содержание этих элементов в донных отложениях оз. Суури.

Также, по аналогии с суммарным индексом загрязнения почв, был рассчитан суммарный индекс загрязнения донных осадков для каждой точки. На всех точках значение индекса  $Z_c$  не превышало 2, что, в соответствии со шкалой оценки степени химического загрязнения, представленной в Таблице 1, является допустимым уровнем загрязнения. Все значения индекса  $Z_c$  составляли от 0 до 2, что говорит о том, что суммарно содержания колебались на уровне или чуть выше рассчитанного фонового значения.

Установив, что донные отложения оз. Суури слабо загрязнены, далее будет изучаться поведение исследуемых тяжёлых металлов, наличие антропогенного воздействия и закономерности распределения исследуемых элементов в донных отложениях озера.

## 4.2. Анализ стратифицированных колонок донных отложений

Для каждой отобранной стратифицированной колонки донных отложений были построены графики изменения содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки.

Среди всех стратифицированных колонок наблюдается две закономерности. В большинстве отобранных колонок значения содержания исследуемых тяжёлых металлов в пределах погрешности выбранной методики значительно не изменялись с глубиной колонки, например, на точке Т1.2.

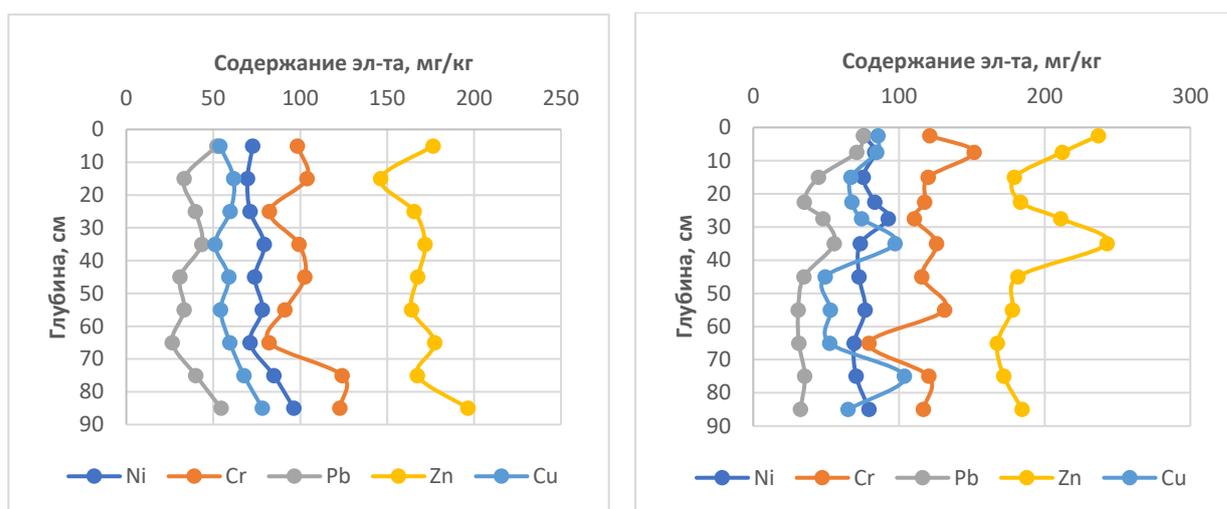


Рис 10. Графики изменения значений содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки на точках Т1.2 (слева) и Т4 (справа)

На точке Т4 также не прослеживается тренд на снижение или повышение значений содержания исследуемых тяжёлых металлов от подошвы к кровле разреза, а наблюдаемое на данном графике резкое увеличение концентраций свинца, меди и цинка обусловлено тем, что в колонке, отобранной с этой точки, на глубине 30-40 см ил переходит в глину. Кроме того, в верхней части разреза донные осадки сильно обводнены, что ведёт к накоплению элементов.

На некоторых точках, таких как Т1 и Т10 наблюдается тренд на увеличение концентраций цинка к кровле разреза. Кроме этого, на точке Т1 наблюдается аналогичное по происхождению с точкой Т4 резкое изменение содержания цинка в тех участках колонки, где осадок сильно обводнён либо переходит из ила в глину.

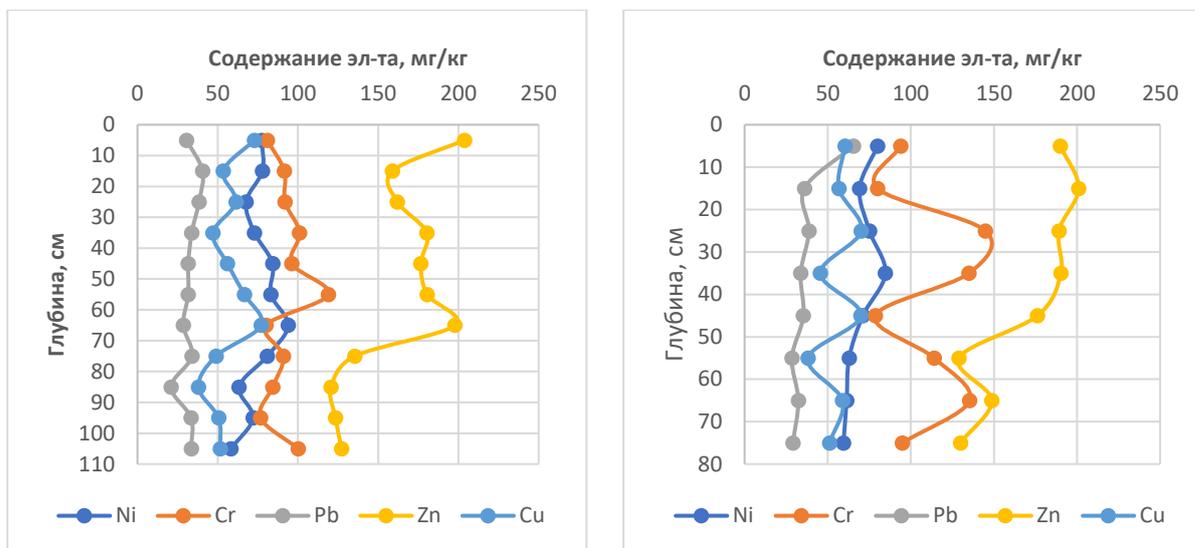


Рис. 11. Графики изменения значений содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки на точках Т1 (слева) и Т10 (справа)

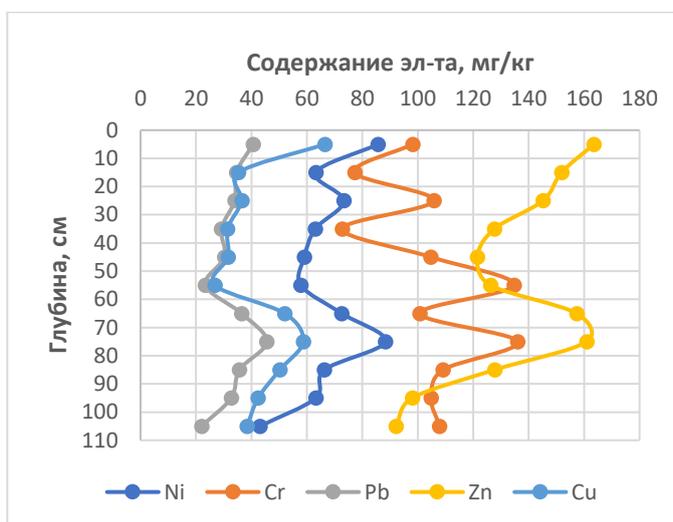


Рис. 12. График изменения значений содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки на точке Т2.2.

На точке Т2.2 на глубине разреза примерно 90 см начинается слой глин, аналогичных глинам, отобранным на точке Л2 на Ладожском оз. Значения содержания исследуемых тяжёлых металлов в этих глинах практически совпадают с медианными концентрациями в глинах залива Лехмалахти Ладожского озера и, соответственно, с рассчитанными фоновыми концентрациями, представленными в Таблице 3, что ещё раз подтверждает достоверность выбранной методики расчёта фоновых значений содержания исследуемых тяжёлых металлов в донных отложениях оз. Суури.

Остальные графики изменения значений содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки представлены в Приложении 2.

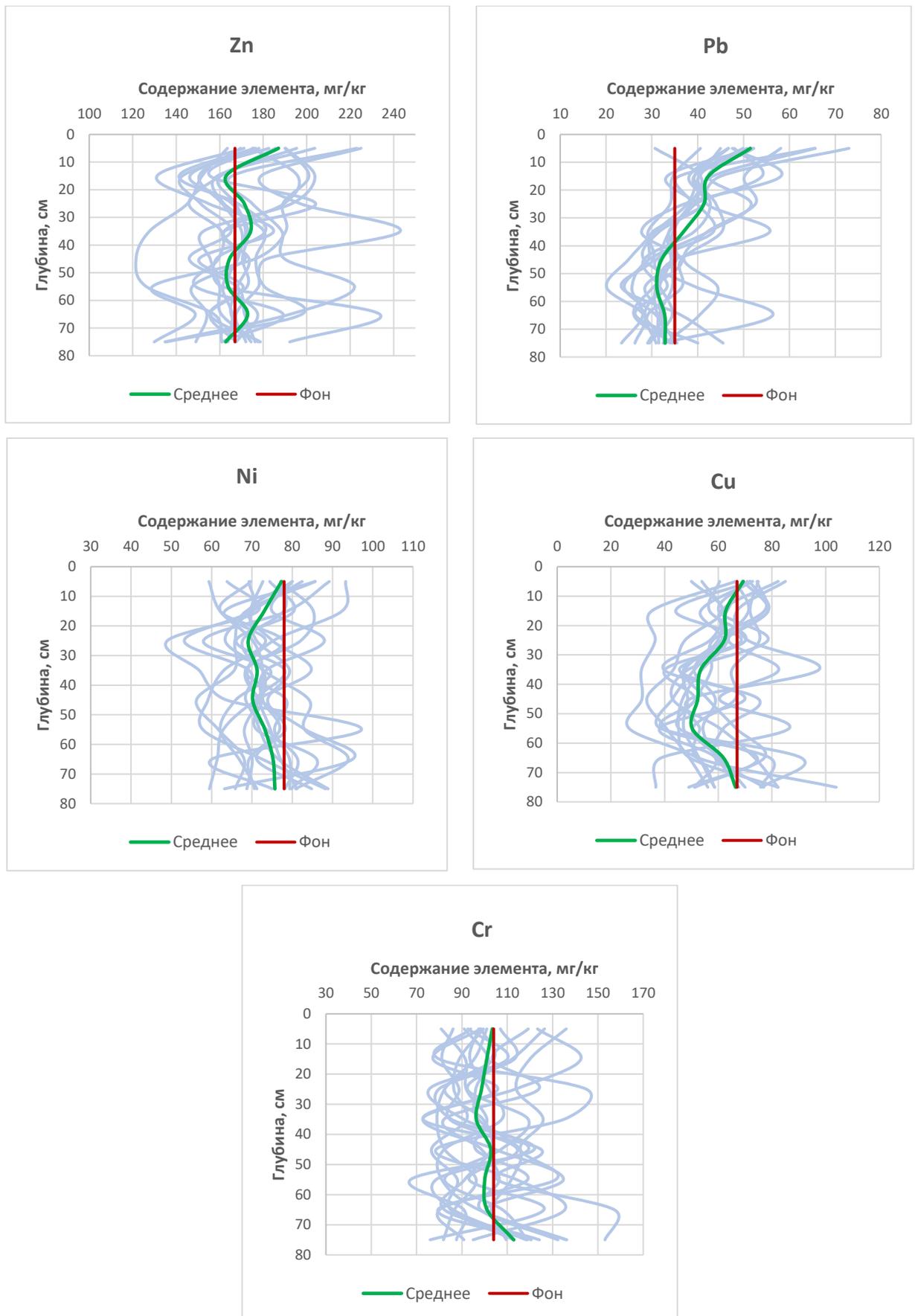


Рис. 13. Графики изменения средних значений исследуемых тяжёлых металлов с глубиной. Серыми кривыми на графике выделены значения каждого из проанализированных разрезов

Для того, чтобы проанализировать тренды изменения концентраций исследуемых тяжёлых металлов с глубиной были построены графики изменения средних значений этих элементов (рис. 13).

Для цинка, как и для никеля, хрома и меди, характерно отсутствие тренда на снижение или повышение средних концентраций с глубиной разрезов. Тогда как у свинца явно прослеживается тренд на повышение средних концентраций к кровле разрезов.

Средние содержания цинка по большей части находятся примерно около рассчитанного фонового значения, увеличиваясь примерно на 20 мг/кг выше фонового значения к поверхностному слою донных отложений. Средние содержания свинца начинают превышать фоновое значение с середины разреза, практически доходя до превышения фона в 1,5 раза на поверхности дна озера. Средние содержания никеля и меди в основном находятся ниже рассчитанного фонового значения. Средние содержания хрома по всей мощности разреза примерно соответствуют фоновым, однако на большей части разреза они немного ниже своей фоновой концентрации.

Данные факты, предположительно, позволяют выделить значения содержания цинка и свинца как наиболее подверженные антропогенному влиянию.

#### 4.3. Анализ пространственного распределения исследуемых элементов в донных отложениях

Для анализа площадного распространения исследуемых тяжёлых металлов в поверхностном слое донных отложений оз. Суури и наглядного представления факторов, влияющих на закономерности распределения тяжёлых металлов в донных отложениях озера, с помощью программы Surfer 25 были построены карты-схемы распределения концентраций исследуемых тяжёлых металлов в поверхностном слое донных отложений оз. Суури.

В качестве метода интерполяции был выбран метод локального многочлена – сглаживающего интерполятора. Используемый метод присваивает значения ячейкам, используя взвешенный многочлен наименьших квадратов, вписывающийся в эллипс ячейки. Выбранный метод наиболее применим к наборам данных, которые являются плавными, т.е. относительно плавными поверхностями в пределах района поиска. При использовании метода локального многочлена размер набора данных существенно не влияет на скорость вычислений и плавность интерполяции.

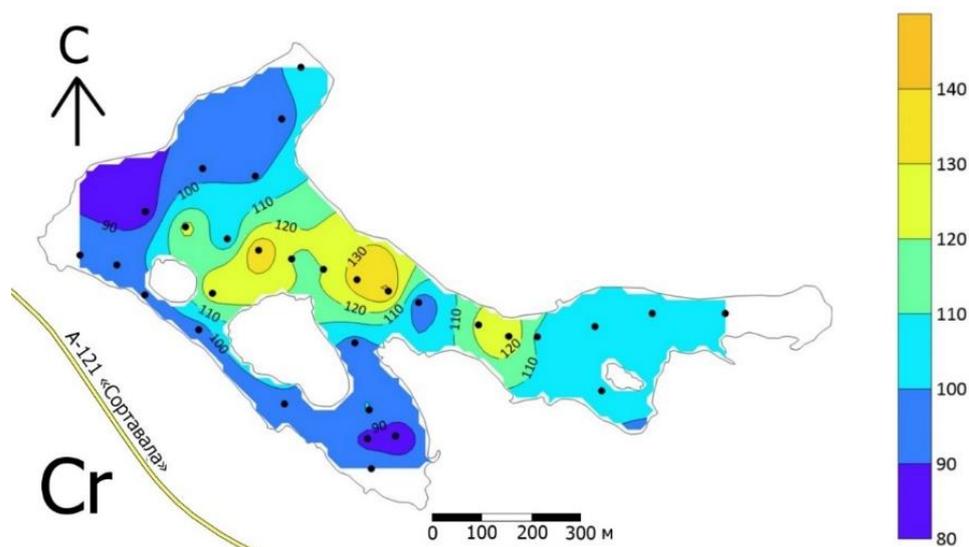


Рис. 14. Карта-схема распределения концентраций хрома в поверхностном слое донных отложений оз. Суури (мг/кг)

На карте-схеме пространственного распределения содержания хрома в поверхностном слое донных отложений оз. Суури наблюдается закономерное увеличение содержания данного элемента по мере увеличения глубины водоёма. Концентрация хрома в поверхностном слое донных отложений достигает своего максимального значения в 142 мг/кг (в 1,4 раза выше рассчитанной фоновой концентрации) в самой глубокой точке озера. Такая же закономерность площадного распространения актуальна для меди и никеля, карты-схемы распределения концентраций которых в поверхностном слое донных отложений озера представлены в Приложении 4. Важно заметить, что разница между максимальными и минимальными значениями концентраций хрома, меди и никеля в поверхностном слое небольшая в сравнении с цинком и, особенно, свинцом, крайние значения которого различаются в 2,5 раза.

Для наглядности в сравнении карт-схем распределения концентраций исследуемых тяжёлых металлов в поверхностном слое донных отложений оз. Суури, на рис. 15 представлена карта-схема глубин озера:

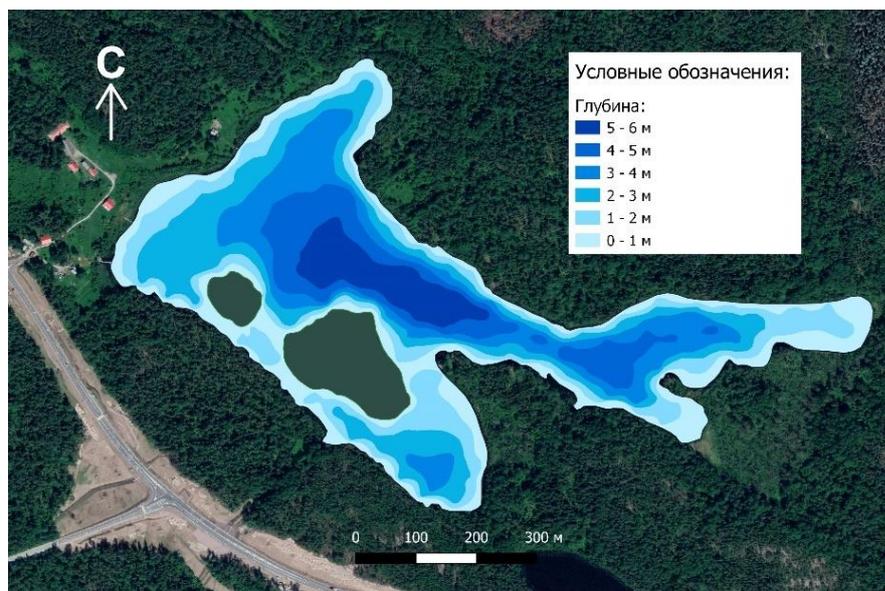


Рис. 15. Карта-схема глубин оз. Суури

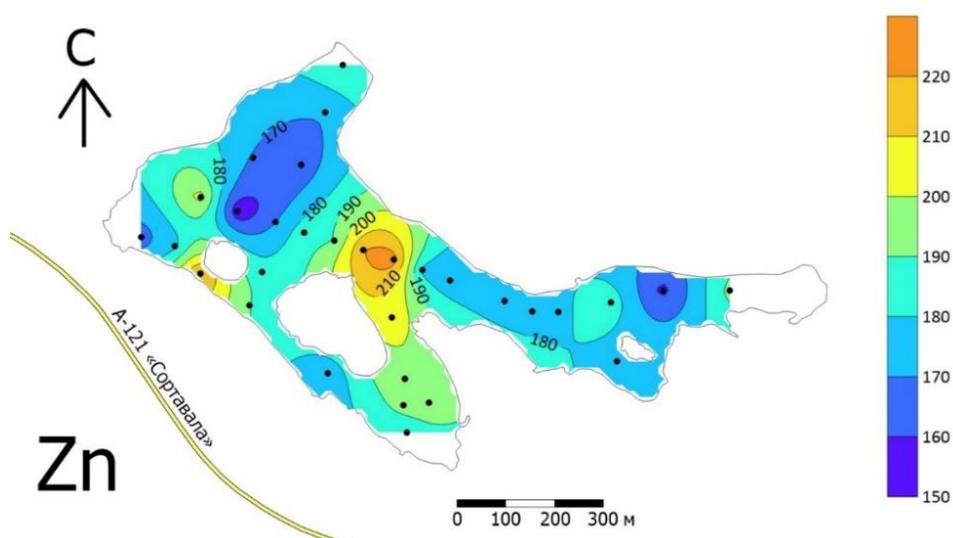


Рис. 16. Карта-схема распределения концентраций цинка в поверхностном слое донных отложений оз. Суури (мг/кг)

На карте-схеме пространственного распределения содержания цинка в поверхностном слое донных отложений оз. Суури наблюдается два фактора, влияющих на накопление исследуемых тяжёлых металлов. Во-первых, как и для меди, никеля и хрома, концентрация цинка увеличивается с глубиной озера, достигая своего максимального для поверхностного слоя донных отложений значения в 225 мг/кг, что в 1,3 раза выше рассчитанной фоновой концентрации. Однако, наблюдается также и увеличение содержания цинка в юго-западной части озера, вдоль берега которой проходит автодорога А-121 «Сортавала». Кроме этого, относительно повышенные концентрации цинка приурочены к прилегающему к территории учебно-научной базы «Приладожская» участку озера.

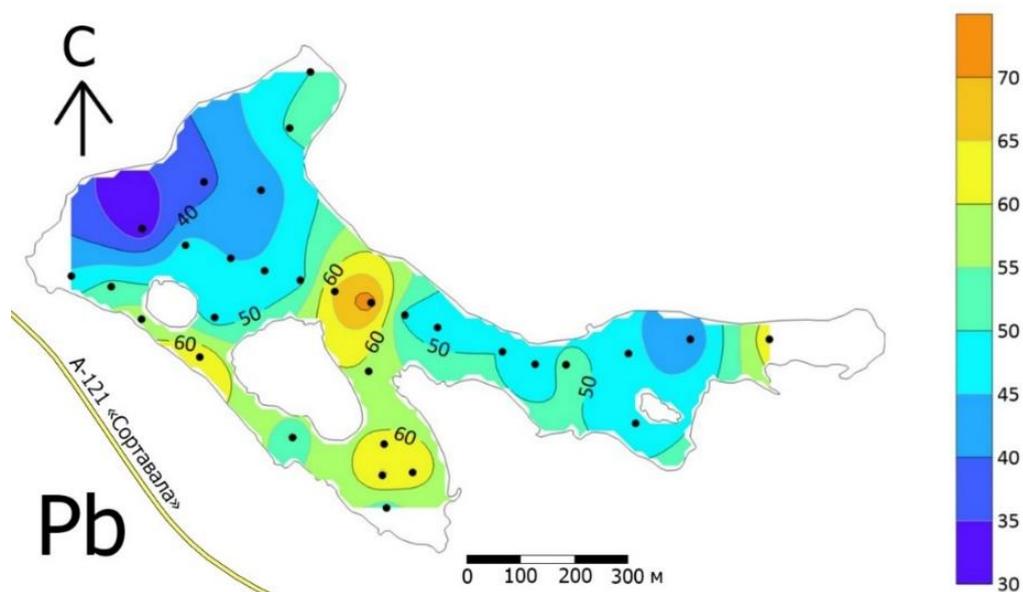


Рис 17. Карта-схема распределения концентраций свинца в поверхностном слое донных отложений оз. Суури (мг/кг)

На карте-схеме распределения содержания свинца в поверхностном слое донных отложений озера также наблюдается два вышеперечисленных фактора накопления этого элемента: увеличение концентрации к самой глубокой части озера, где концентрация достигает 73 мг/кг (в 2 раза больше рассчитанной фоновой концентрации); увеличение концентрации в юго-западной части озера, вдоль автодороги А-121 «Сортавала». Кроме этого, на картах-схемах распределения содержания цинка и свинца наблюдаются относительно пониженные концентрации этих двух элементов в точке, находящейся напротив устья ручья, впадающего в оз. Суури со стороны автомобильной дороги (рис. 18).

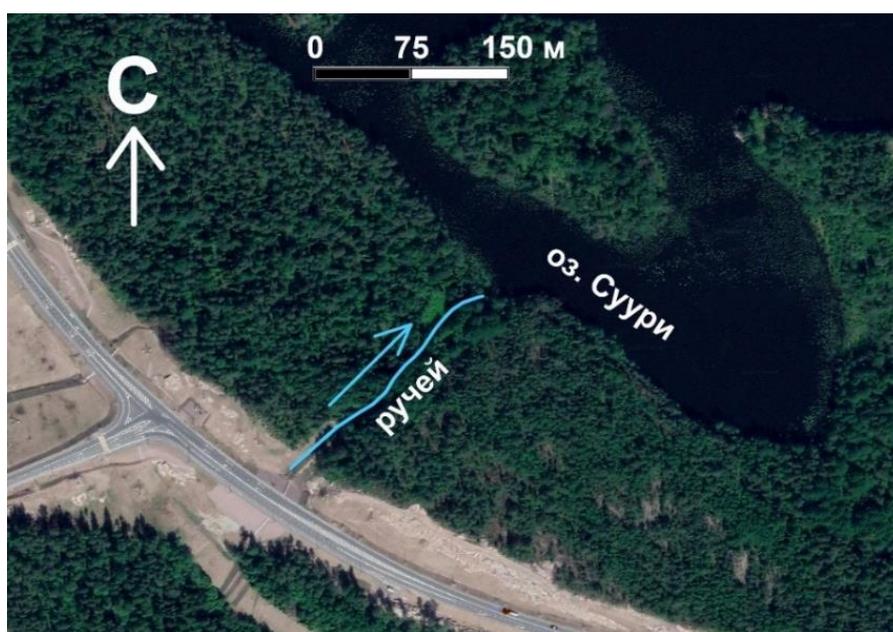


Рис. 18. Карта-схема расположения ручья, впадающего в оз. Суури

Это говорит о том, что один из основных путей поступления цинка и свинца в озеро – поверхностный сток с автодороги А-121 «Сортавала».

Одним из основных антропогенных источников поступления цинка и свинца в окружающую среду является автомобильный транспорт (Касимов и др., 2014; Джувеликян и др., 2009). Как было упомянуто в Главе 1, основными источниками загрязнения цинком являются селитебные зоны и автомобильный транспорт, а именно выбросы от износа автомобильных шин, содержащих цинк. В автомобильных шинах также содержится медь. В автомобильном топливе содержатся никель, медь и хром, кроме этого, никель и медь содержатся в битуме и, как следствие, асфальте.

Основным путём поступления исследуемых тяжёлых металлов в оз. Суури является поверхностный сток с территорий, прилегающих к озеру со стороны автомобильной дороги. Кроме этого, цинк поступает путём поверхностного стока с территории учебно-научной базы.

Отдельно стоит выделить одну важную особенность поступления свинца в донные отложения оз. Суури. Главный источник этого поступления – тетраэтилсвинец, бывшая наиболее распространённой антидетонационная присадка к бензину. Это бесцветная жидкость, тяжелее воды, отличающаяся высокой токсичностью и нерастворимостью в воде. Однако, 22 марта 2003 года вступил в силу Федеральный закон от 22.03.2003 г. № 34-ФЗ «О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации». В Великобритании в 2006 году на автомобильный транспорт приходилось всего 2% от общего объёма выбросов свинца, тогда как в 1990 году этот показатель составлял 74% (Dore и др., 2008). Данные факты говорят о том, что современное поступление свинца резко уменьшилось после вышеуказанного запрета, что также подтверждается данными, о которых упоминалось ранее – содержание свинца в донных отложениях оз. Суури с 1980 года выросло только на четверть, что сильно меньше роста концентраций других исследуемых тяжёлых металлов.

## 5. Выводы

В ходе исследования были отобраны и проанализированы на содержание никеля, хрома, меди, свинца и цинка 232 пробы стратифицированных и нестратифицированных (поверхностных) донных отложений озера Суури.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. В формировании геохимической обстановки в донных отложениях оз. Суури участвуют два фактора: природный (рельеф дна озера, состав материнских горных пород и т.д.) и антропогенный;

2. Для всех исследуемых тяжёлых металлов за исключением свинца характерно постоянство их содержания от подошвы к кровле разреза, что в целом говорит об отсутствии высокого уровня воздействия на данный водный объект. Однако наблюдается тренд на увеличение содержания свинца к верхней части колонки и повышение концентраций цинка в поверхностном слое донных отложений озера. Данные факты говорят об увеличенной интенсивности антропогенного воздействия, связанного с поступлением данных тяжёлых металлов в окружающую среду – выбросов от движения автомобильного транспорта и воздействия человеческой деятельности на учебно-научной базе. Это позволяет предположить, что наибольший антропогенный вклад в экологическое состояние донных отложений оз. Суури вносят цинк и свинец;

3. Согласно полученным результатам пространственного распределения исследуемых тяжёлых металлов, для рассматриваемых элементов характерно их накопление в центральной, наиболее глубокой части озера. Накопление цинка и свинца, помимо наиболее глубоких частей озера, происходит вдоль его юго-западного берега, приуроченной к проходящей вдоль него автодороге А-121 «Сортавала». Кроме того, относительно повышенные значения цинка (индикатора в т.ч. селитенной зоны) обнаружены в западной части озера, на берегу которой расположена учебно-научная база «Приладожская» Санкт-Петербургского государственного университета;

4. Основным путём поступления исследуемых тяжёлых металлов в оз. Суури является поверхностный сток с территорий, прилегающих к озеру со стороны автомобильной дороги и учебно-научной базы.

5. В целом, донные отложения озера Суури характеризуются низким уровнем загрязнения, что подтверждается также рассчитанным суммарным показателем загрязнения, который во всех точках наблюдения не превышал 2. Превышения фоновых значений носят лишь локальный характер.

## **Благодарности**

Автор выражает свою искреннюю благодарность за оказанную помощь в написании данной работы:

- Зеленковскому Павлу Сергеевичу, кандидату геолого-минералогических наук, доценту кафедры геоэкологии СПбГУ, за научное руководство;
- Сафарову Александру Ризаевичу, ведущему инженеру лаборатории пробоподготовки и пробообработки ЦТСОП ГГГиП, за помощь в работе с рентгеновским анализатором;
- Студентам кафедры геоэкологии 2-го курса за помощь в отборе проб и пробоподготовке.

## Список литературы

1. Терехова А. В. Определение фоновых содержаний тяжелых металлов в почвах и донных осадках центральной части национального парка "Смоленское Поозерье" [Текст] / А. В. Терехова, И. И. Подлипский, П. С. Зеленковский, В. Р. Хохряков // Экологические проблемы недропользования : Материалы семнадцатой международной молодежной научной конференции, Санкт-Петербург, 29–30 мая 2017 года – СПб.: С-Петерб. гос. ун-т, 2017. – С. 67-74;
2. Алексеева И. Е. Сравнительный анализ содержания тяжёлых металлов в донных осадках некоторых озёр Национального парка «Смоленское Поозерье» [Текст] / И. Е. Алексеева, А. М. Бессонова, Ю. Л. Малкова, Е. С. Павлова // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии : Труды XXXIII молодёжной научной конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, Апатиты, 03–07 октября 2022 года / Печатается по решению Ученого совета Геологического института КНЦ РАН. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2022. – С. 8-11;
3. Белая Н. А. Закономерности распространения тяжёлых металлов в донных отложениях Национального парка «Себежский» [Текст] / Н. А. Белая, Т. В. Богданов, А. В. Горбунова, Т. В. Пономарчук // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии : Труды XXXIII молодёжной научной конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, Апатиты, 03–07 октября 2022 года / Печатается по решению Ученого совета Геологического института КНЦ РАН. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2022. – С. 18-21;
4. Богданов Т. В. Закономерности распределения тяжёлых металлов в донных отложениях озера Суури / Т. В. Богданов, Р. А. Питлев // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии : Труды XXXIII молодёжной научной конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, Апатиты, 03–07 октября 2022 года / Печатается по решению Ученого совета Геологического института КНЦ РАН. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2022. – С. 25-28;
5. Ваганов П. А. Математические методы в экологической геологии [Текст] / П. А. Ваганов, В. В. Куриленко, И. М. Хайкович. – СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2008. – 304 с. – С. 126;

6. Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры [Текст] / А. П. Виноградов // Геохимия. — 1962. — Вып. 7. — С. 555—571;
7. Галанина О. В. Вехи и перспективы российской геоботаники [Текст] / О. В. Галанина, А. А. Федотова // Историко-биологические исследования. - 2012. - Т. 4, № 1. - С. 127-129;
8. ГОСТ 17.1.5.01-80. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 6 с.;
9. Грабовский А. В. Анализатор рентгеновский АР-104. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Текст] / А. В. Грабовский – Особое конструкторское бюро НПО «Рудгеофизика». – Ленинград, Малое Государственное предприятие «Гея», 1991;
10. Джувеликян Х. А. Загрязнение почв тяжёлыми металлами. Способы контроля и нормирования загрязнённых почв: учеб. пособие [Текст] / Х. А. Джувеликян, Д. И. Щеглов, Н. С. Горбунова. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2009. – 21 с.;
11. Дмитриев В. В. Оценка экологического состояния малых озер Карельского Приладожья [Текст] / В. В. Дмитриев, С. Н. Бурцев, О. Н. Мандрыка [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 8-4. – С. 647-655;
12. Дмитриев В. В. Современное экологическое состояние водных объектов карельского Приладожья и его сравнение с ретроспективными данными [Текст] / В. В. Дмитриев // Научно-теоретический журнал Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – №. 33. – С. 102-118;
13. Дмитриев В. В. Диагностика состояния водоемов, наземной растительности и почвенного покрова геосистем карельского Приладожья. II. Диагностика состояния почвенного и растительного покрова, устойчивость геосистем к антропогенному воздействию и др. [Текст] / В. В. Дмитриев, В. Ю. Васильев, А. Н. Огурцов, М. Г. Опекунова, Т. М. Потапова // Известия Русского географического общества. – 1996. – Т. 128. – №. 2. – С. 49-54;
14. Зенин А. А. Гидрохимический словарь. [Текст] / А. А. Зенин, Н. В. Белоусова – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 238 с.;

15. Искандарова, Ш. Т. Влияние донных отложений на качество воды малых рек [Текст] / Ш. Т. Искандарова, И. А. Усманов, М. И. Хасанова // Экология и строительство. – 2019. – № 1. – С. 19-24;
16. Казакова Н. А. Исследование почв территорий промышленных предприятий на предмет наличия тяжелых металлов [Текст] / Н. А. Казакова, Л. Р. Садретдинова, А. А. Мухаметшин // Евразийский Союз Ученых — публикация научных статей в ежемесячном научном журнале. Биологические науки, 2020. – С. 9-13;
17. Касимов Н. С. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Н. С. Касимов, В. Р. Битюкова, С. М. Малхазова [и др.] – Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Русское географическое общество. – Москва: ИП Филимонов М. В., 2014. – 560 с.;
18. Коннонова Л. А. Расчёт коэффициента суммарного загрязнения в почвах и донных отложениях рекреационной зоны национального парка "Смоленское Поозерье" [Текст] / Л. А. Коннонова, И. И. Подлипский, П. С. Зеленковский, В. Р. Хохряков // В сборнике: Экологические проблемы недропользования. Материалы Шестнадцатой международной молодежной научной конференции. Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета; Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. 2016. – С. 260-262.;
19. Ларин, С. В. Загрязнение атмосферы Московского региона автотранспортом [Текст] / С. В. Ларин // Наука на благо человечества - 2017 : сборник научных статей преподавателей и аспирантов по итогам Международной научной конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Наука на благо человечества - 2017», Москва, 17–28 апреля 2017 года – Москва: Московский государственный областной университет, 2017. – С. 38-43;
20. Мальчевский А. С. Птицы северо-западного Приладожья [Текст] / А. С. Мальчевский, Е. Р. Гагинская // Русский орнитологический журнал. – 2016. – Т. 25. – №. 1300. – С. 2205-2251;
21. Масленников П. В. Аккумуляция цинка в растениях урбоэкосистем Калининграда [Текст] / П. В. Масленников, Г. Н. Чупахина, В. П. Дедков [и др.] // Растительные ресурсы. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 587-602;
22. Опекунов А. Ю. Теория и практика экологического нормирования в России: учеб. пособие. / А. Ю. Опекунов, А. Г. Ганул – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. – 332 с. – С. 97;

23. Подлипский И. И. Методика проведения эколого-геологической оценки состояния донных отложений озера Сапшо (национальный парк "Смоленское Поозерье") [Текст] / И. И. Подлипский, П. С. Зеленковский // В сборнике: Школа экологической геологии и рационального недропользования - 2015. Материалы пятнадцатой межвузовской молодежной научной конференции. 2015. – С. 52-57;
24. РД 52.24.609-2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов [Текст]. – Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – Ростов-на-Дону, 2013. – 43 с.;
25. Рогова, Н. С. Определение и анализ природного и антропогенного геохимического фона для метода мхов-биомониторов [Текст] / Н. С. Рогова, Н. К. Рыжакова, А. Л. Борисенко // Экология и промышленность России. – 2019. – 23(6). – С. 58–63;
26. Румянцев В. А. Озера Европейской части России [Текст] / В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова, А. В. Измайлова – Федер. агентство науч. орг., Федер. гос. бюджет. учреждение науки Ин-т озероведения Рос. акад. наук. - С-Пб.: Лема, 2015. - 389 с.;
27. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – Введ. 2003-06-15. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 16 с.;
28. Седова, С. А. Разработка методики интегральной оценки экологического статуса водоемов на примере малых озер северо-западного Приладожья [Текст] / С. А. Седова, В. В. Дмитриев // European Journal of Natural History. – 2020. – № 1. – С. 37-44;
29. Снежко, С. И. Источники поступления тяжелых металлов в атмосферу [Текст] / С. И. Снежко, О. Г. Шевченко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 18. – С. 35-37;
30. Тарновский А. А. Геохимия донных отложений современных озёр (на материале озёр Карельского перешейка) / А. А. Тарновский. (под ред. М. Д. Скарлыгиной-Уфимцевой) – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 172 с.;
31. Толкачев, Г. Ю. Сравнительная характеристика форм существования тяжёлых металлов в донных отложениях Иваньковского водохранилища в 2001-2002 и 2021 годах [Текст] / Г. Ю. Толкачев, Б. И. Корженевский, Н. В. Коломийцев // Экологические системы и приборы. – 2022. – № 11. – С. 3-12;
32. Российская Федерация. Законы. О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации: Федер. закон № 34-ФЗ: принят

Государственной Думой 7 марта 2003 г.: одобрен Советом Федерации 12 марта 2003 г.: послед. ред. // КонсультантПлюс: сайт. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41429](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41429) (Дата обращения: 14.05.2023). Режим доступа: для зарегистр. пользователей.

Статьи на английском языке:

1. Dore C. J. UK emissions of air pollutants 1970 to 2006 [Текст] / C. J. Dore [и др.] // AEA Energy & Environment, Harwell, Oxfordshire. – 2008. – 194 с.;
2. Gujarati D. N. Basic econometrics. (5th edition) [Текст] / D. N. Gujarati, D. C. Porter – McGraw-Hill/Irwin – 2008 – С. 131;
3. Hawkes H. E. Geochemistry in mineral exploration [Текст] / H. E. Hawkes, J. S. Webb // Soil Science. – 1963. – Т. 95. – №. 4. – С. 283;
4. Hjortenkrans D. New metal emission patterns in road traffic environments [Текст] / D. Hjortenkrans, B. Bergbäck, A. Häggerud // Environmental Monitoring and Assessment. – 2006. – Т. 117. – С. 85-98;
5. Jarque C. M. A test for normality of observations and regression residuals [Текст] / C. M. Jarque, A. K. Bera // International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique. – 1987. – С. 163-172;
6. Järup L. Hazards of heavy metal contamination [Текст] / L. Järup // British medical bulletin. – 2003. – Т. 68. – №. 1. – С. 167-182;
7. Sharma R. K. Biological effects of heavy metals: an overview [Текст] / R. K. Sharma, M. Agrawal // Journal of environmental Biology. – 2005. – Т. 26. – №. 2. – С. 301-313.

### Приложение 1. Данные анализа проб донных отложений.

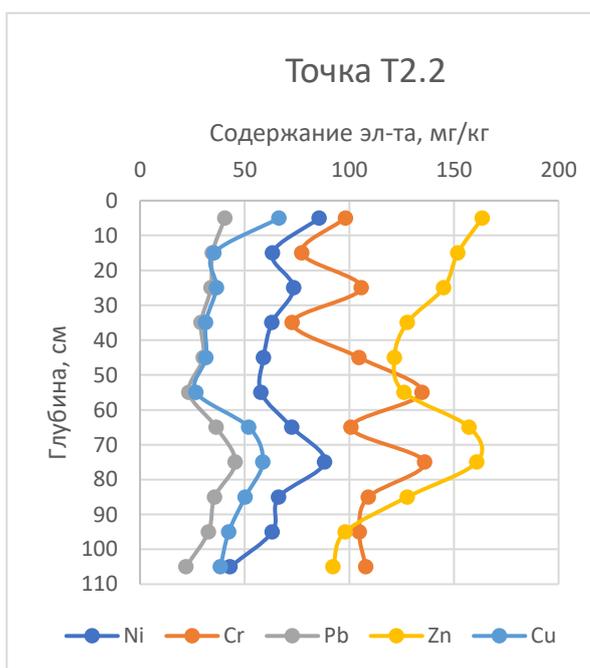
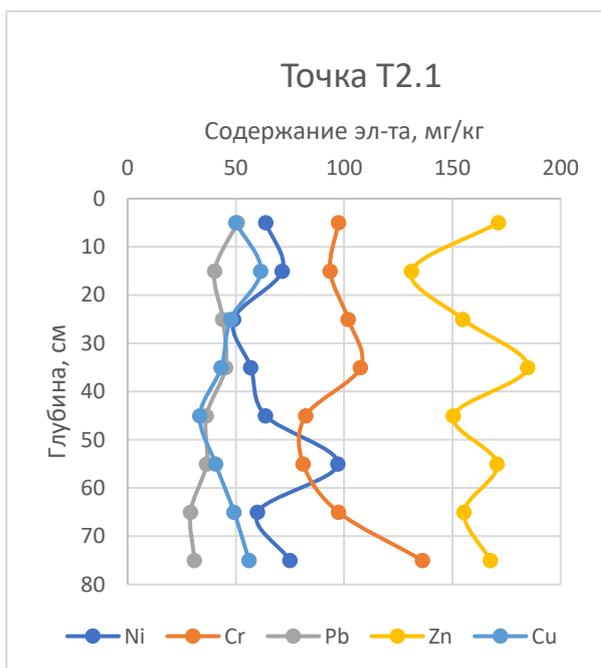
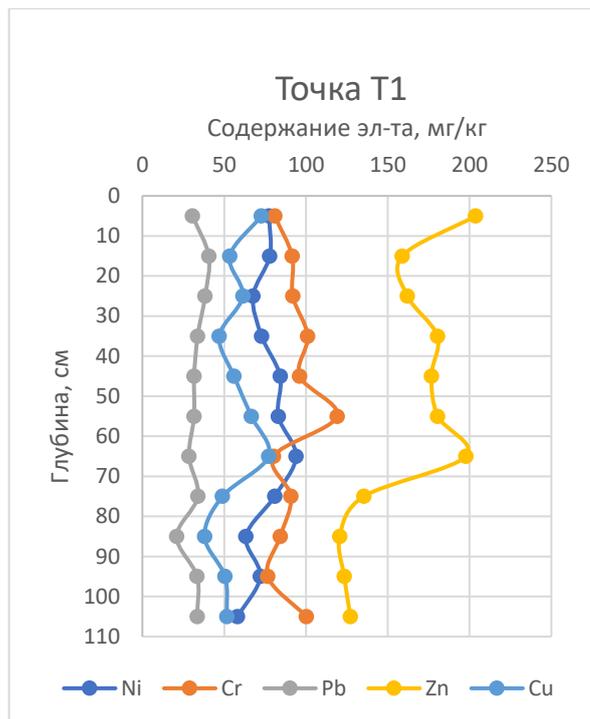
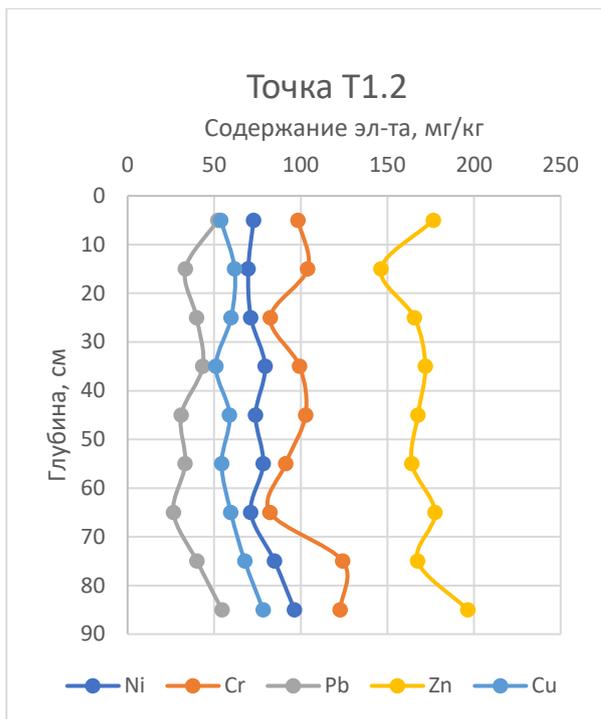
Проба	Ni ppm	Cr ppm	Pb ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm
τ1.1	81	94	39	169	68	77247
τ1.2 0-10	73	98	52	177	54	77520
τ1.2 10-20	70	104	33	146	62	70531
τ1.2 20-30	71	82	40	166	60	56367
τ1.2 30-40	79	99	43	172	51	74569
τ1.2 40-50	74	103	31	168	59	76155
τ1.2 50-60	78	91	33	164	54	75215
τ1.2 60-70	71	82	26	177	60	74305
τ1.2 70-80	85	124	40	167	68	79190
τ1.2 80-90	96	123	55	196	78	83612
τ1 0-10	77	81	31	204	73	84555
τ1 10-20	78	92	41	159	53	72979
τ1 20-30	68	92	38	162	61	70222
τ1 30-40	73	101	34	180	47	79136
τ1 40-50	84	96	32	177	56	79375
τ1 50-60	83	119	32	181	67	77294
τ1 60-70	94	80	28	198	77	84498
τ1 70-80	81	91	34	135	49	81645
τ1 80-90	63	84	21	121	38	77714
τ1 90-100	72	77	33	123	51	78984
τ1 100-110	58	100	34	127	52	76579
τ2.1 0-10	64	97	51	171	50	80453
τ2.1 10-20	71	94	40	131	62	66390
τ2.1 20-30	49	102	44	155	48	66958
τ2.1 30-40	57	108	45	185	43	74452
τ2.1 40-50	64	82	36	151	33	75470
τ2.1 50-60	97	81	36	171	41	75523
τ2.1 60-70	60	97	29	155	49	71600
τ2.1 70-80	75	136	31	168	56	73920
τ2.2 0-10	86	98	41	164	66	70571
τ2.2 10-20	63	77	35	152	35	70569
τ2.2 20-30	73	106	34	145	37	68555
τ2.2 30-40	63	73	29	128	31	68740
τ2.2 40-50	59	105	30	122	32	78175
τ2.2 50-60	58	135	23	126	27	82322
τ2.2 60-70	73	101	36	157	52	76338
τ2.2 70-80	88	136	46	161	59	81618
τ2.2 80-90	66	109	36	128	50	95985
τ2.2 90-100	63	105	33	98	42	78755
τ2.2 100-110	43	108	22	92	38	68800
τ2.2 110-120	50	105	20	215	30	64009
τ2.3 0-10	69	126	47	183	72	78017
τ2.3 10-20	70	112	38	143	44	69910
τ2.3 20-30	53	92	41	151	69	74811

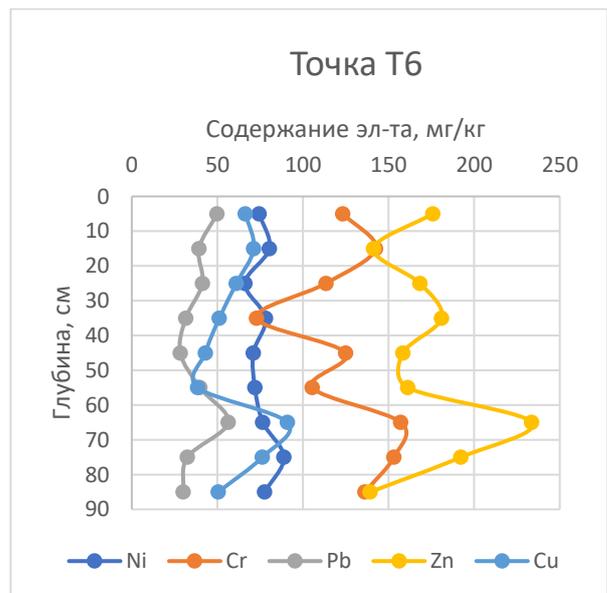
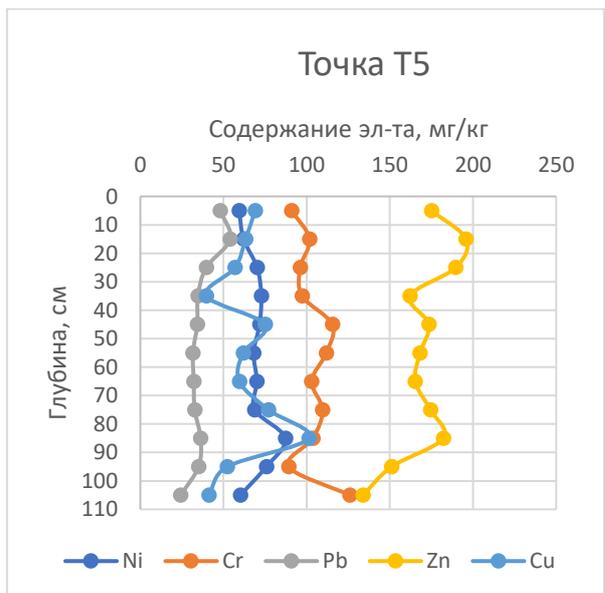
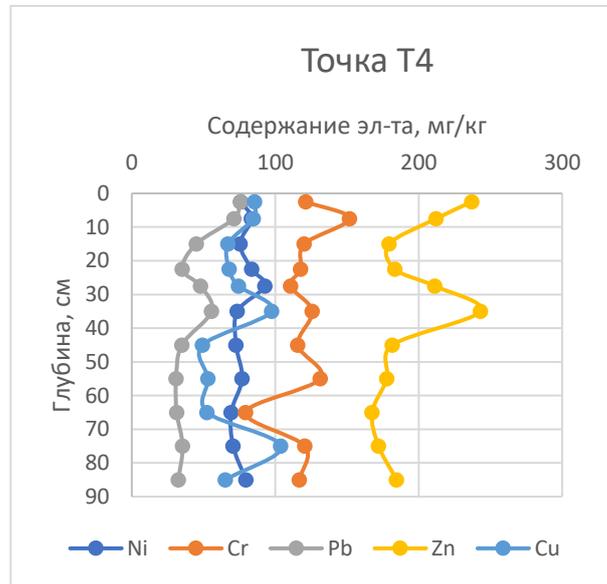
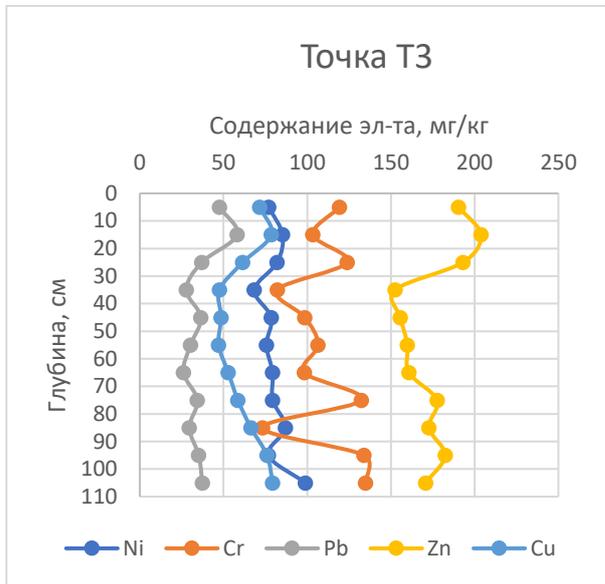
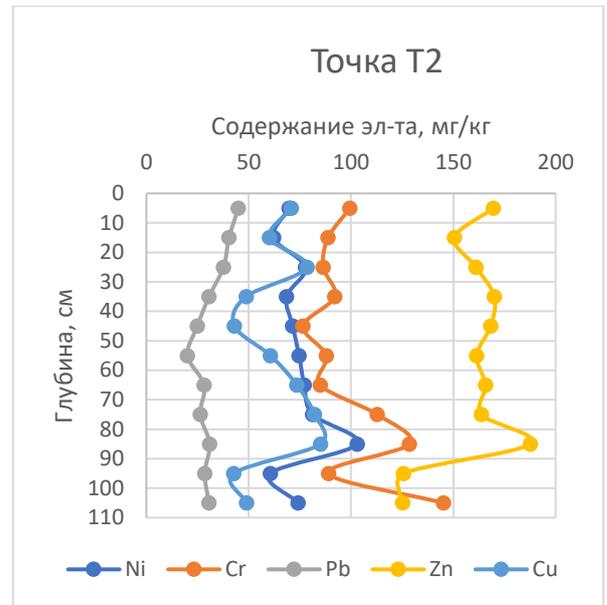
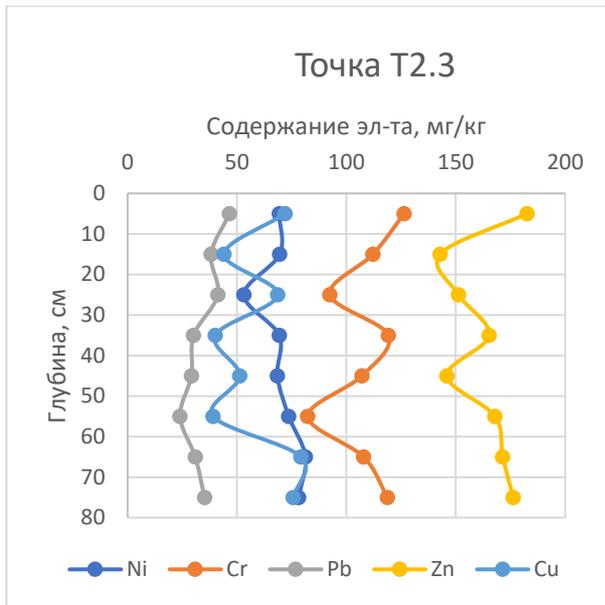
τ2.3 30-40	69	119	30	165	40	71944
τ2.3 40-50	68	107	29	146	51	70942
τ2.3 50-60	74	82	24	168	39	74982
τ2.3 60-70	81	108	31	171	79	75709
τ2.3 70-80	78	119	35	176	76	76917
τ2.4	70	103	50	190	57	77684
τ2 0-10	70	99	45	170	71	77636
τ2 10-20	62	89	40	151	60	62862
τ2 20-30	78	86	38	161	78	70167
τ2 30-40	68	92	31	170	49	70235
τ2 40-50	71	77	25	168	43	74667
τ2 50-60	75	88	20	161	61	73750
τ2 60-70	77	85	28	166	74	77287
τ2 70-80	81	113	26	164	82	76520
τ2 80-90	103	129	31	188	85	90267
τ2 90-100	61	89	29	126	43	79981
τ2 100-110	74	145	31	125	49	82832
τ3 0-10	77	119	48	190	72	84730
τ3 10-20	85	103	58	204	79	80664
τ3 20-30	82	124	37	193	62	84083
τ3 30-40	68	82	28	152	48	75174
τ3 40-50	79	99	37	156	49	81721
τ3 50-60	76	106	30	160	47	79120
τ3 60-70	79	98	26	161	53	81364
τ3 70-80	79	132	34	178	59	80002
τ3 80-90	87	73	30	173	66	81260
τ3 90-100	77	134	35	182	76	77340
τ3 100-110	99	135	37	171	79	93659
τ4.1	76	95	59	207	62	74126
τ4 0-5	76	121	76	237	86	106595
τ4 5-10	83	152	71	212	85	96290
τ4 10-20	75	120	45	179	67	81893
τ4 20-25	84	118	35	183	68	82251
τ4 25-30	93	111	48	211	75	76941
τ4 30-40	74	126	56	243	98	73789
τ4 40-50	73	116	35	182	49	81647
τ4 50-60	77	131	31	178	53	81092
τ4 60-70	69	79	31	168	53	79686
τ4 70-80	71	121	35	172	104	81436
τ4 80-90	80	117	32	185	65	81637
τ5 0-10	59	91	48	175	69	77458
τ5 10-20	62	102	54	196	63	74842
τ5 20-30	70	96	40	190	57	75897
τ5 30-40	73	97	35	162	40	78922
τ5 40-50	72	115	34	173	75	73450
τ5 50-60	68	112	32	168	62	75733
τ5 60-70	70	103	32	165	60	75816
τ5 70-80	69	110	33	174	77	76767

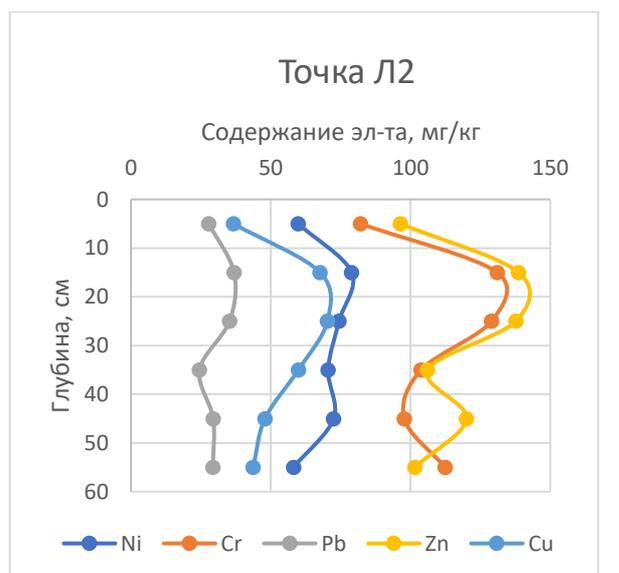
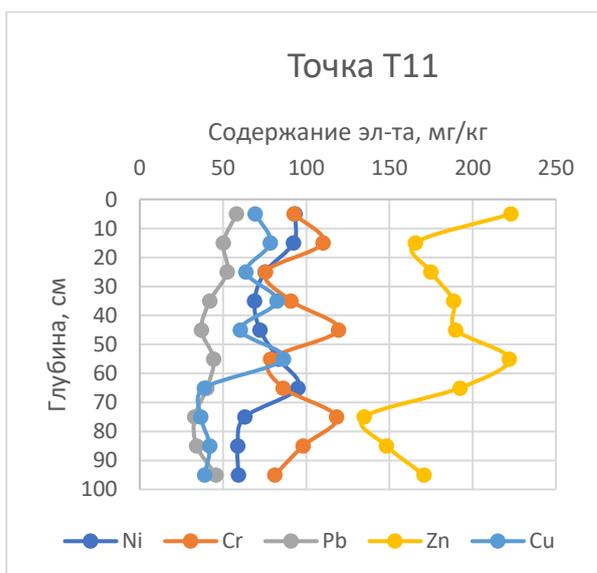
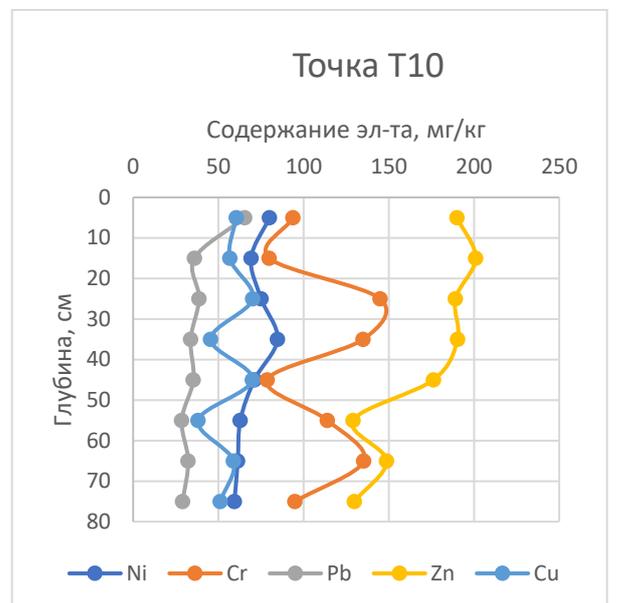
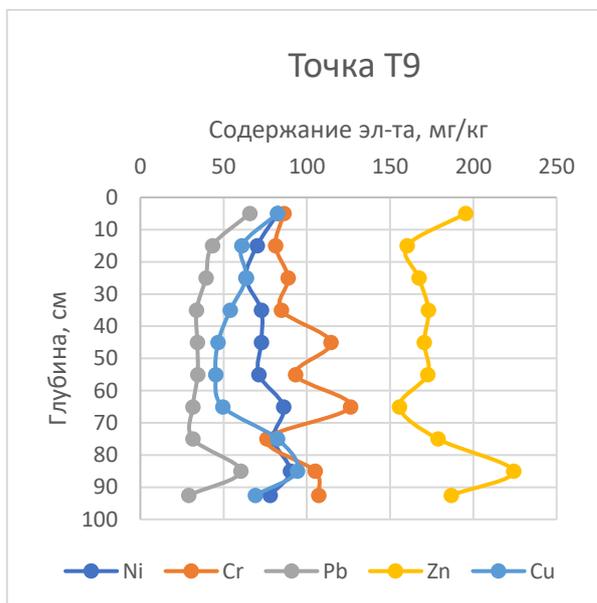
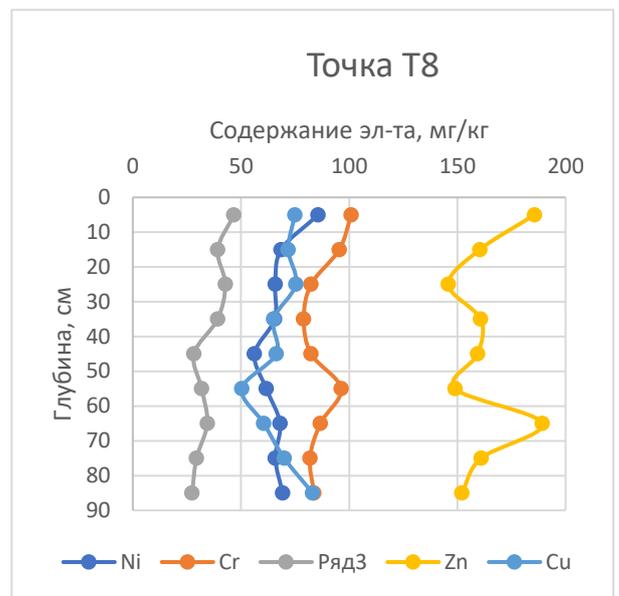
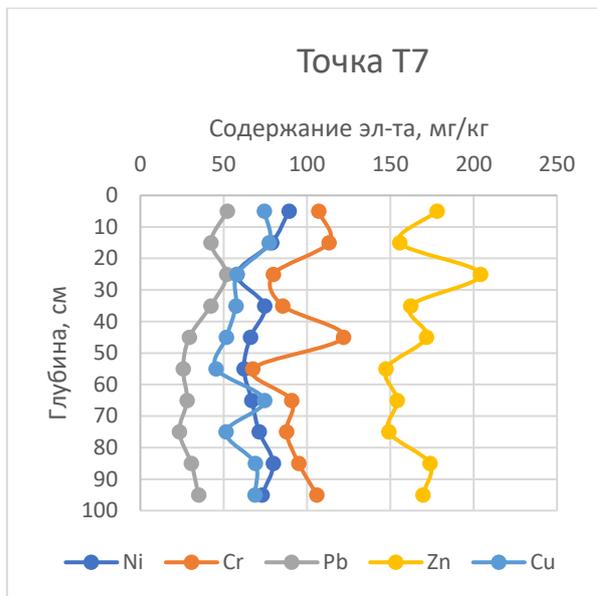
τ5 80-90	87	104	36	182	101	81232
τ5 90-100	76	89	35	151	52	84010
τ5 100-110	60	126	24	134	41	77223
τ6 0-10	74	123	50	176	66	77497
τ6 10-20	80	142	39	141	71	70640
τ6 20-30	66	113	41	168	61	61228
τ6 30-40	78	73	32	181	51	73434
τ6 40-50	71	125	28	158	43	69475
τ6 50-60	72	106	40	161	39	72439
τ6 60-70	77	157	56	234	91	73718
τ6 70-80	89	153	32	192	76	73819
τ6 80-90	78	136	30	139	51	72551
τ7.1	72	101	48	177	74	66464
τ7 0-10	89	107	52	178	74	85914
τ7 10-20	79	113	42	156	77	75590
τ7 20-30	58	80	52	204	58	60493
τ7 30-40	75	85	42	162	57	71413
τ7 40-50	66	122	29	172	52	75042
τ7 50-60	62	67	26	147	45	75456
τ7 60-70	67	91	28	154	75	72959
τ7 70-80	71	88	23	149	51	73305
τ7 80-90	80	95	31	174	69	77119
τ7 90-100	73	106	35	169	69	77513
τ8.1	94	100	64	193	86	82814
τ8 0-10	86	101	47	186	75	96175
τ8 10-20	69	95	39	160	72	77071
τ8 20-30	66	82	43	146	75	67482
τ8 30-40	66	79	39	161	65	70114
τ8 40-50	56	82	28	159	66	68114
τ8 50-60	62	96	32	149	50	70880
τ8 60-70	68	87	34	189	61	76051
τ8 70-80	66	82	29	161	70	75942
τ8 80-90	69	84	27	152	83	76138
τ9.1	90	101	61	199	73	77628
τ9.2	77	85	63	199	73	68349
τ9.3	70	99	52	180	79	79592
τ9.4	77	99	53	173	70	73092
τ9 0-10	82	86	66	195	82	76844
τ9 10-20	70	81	43	160	61	57060
τ9 20-30	63	89	39	167	64	56548
τ9 30-40	73	85	34	173	54	68890
τ9 40-50	73	114	34	170	47	72835
τ9 50-60	71	93	34	173	45	73383
τ9 60-70	86	126	32	156	49	74899
τ9 70-80	80	76	32	179	82	76572
τ9 80-90	90	105	60	224	94	80594
τ9 90-95	78	107	29	187	69	81685
τ10 0-10	80	94	65	190	60	77531

τ10 10-20	69	80	36	403	57	67510
τ10 20-30	75	145	39	189	70	66905
τ10 30-40	85	135	34	190	46	69939
τ10 40-50	71	79	35	176	70	77495
τ10 50-60	63	114	28	129	38	75727
τ10 60-70	61	135	32	149	59	68238
τ10 70-80	59	95	29	130	51	75957
τ11.1	66	98	46	165	53	78733
τ11 0-10	93	93	58	223	69	80025
τ11 10-20	92	110	50	166	78	75758
τ11 20-30	75	76	53	175	64	69409
τ11 30-40	69	91	42	189	83	76845
τ11 40-50	72	119	37	190	60	77383
τ11 50-60	83	79	44	222	86	80844
τ11 60-70	95	86	40	192	39	81075
τ11 70-80	63	118	33	135	37	73516
τ11 80-90	59	98	34	148	42	73891
τ11 90-100	59	81	46	171	39	72765
λ2 0-10	60	82	28	96	37	73404
λ2 10-20	79	148	37	139	68	124826
λ2 20-30	74	141	35	138	70	109255
λ2 30-40	71	104	25	106	60	81693
λ2 40-50	73	98	29	120	48	86936
λ2 50-60	58	112	29	102	44	78663

## Приложение 2. Графики изменения содержания исследуемых тяжёлых металлов с глубиной колонки.







**Приложение 3. Данные анализа 2022 г. проб донных отложений оз.**

**Суури.**

Проба			Содержание исследуемого элемента, ppm					
			Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	As
1	1		51	201	75	85	120	5
1	2		55	154	86	103	90	5
1	3		42	165	69	82	95	5
1	4		37	174	63	121	117	5
1	5		33	170	65	98	129	5
1	6		39	183	92	105	119	5
1	7		30	184	94	101	128	5
1	8		33	152	75	103	107	5
1	9		30	146	58	73	130	5
1	10		35	136	60	78	105	5
2	4	1	47	152	83	97	125	5
2	4	2	48	158	85	121	97	5
2	4	3	37	172	67	83	123	5
2	4	4	40	166	87	95	99	5
2	4	5	31	152	66	77	125	5
2	4	6	26	163	70	97	95	5
2	4	7	33	157	70	91	103	5
2	4	8	31	161	98	88	109	5
2	4	9	27	146	81	102	82	5
3	1		46	186	85	85	142	5
3	2		42	203	77	101	104	5
3	3		44	185	102	78	101	5
3	4		37	165	86	92	92	5
3	5		33	172	76	77	105	5
3	6		32	153	78	92	99	5
3	7		32	177	87	80	116	5
3	8		34	166	85	85	99	5
3	9		29	173	111	89	102	5
3	10		39	161	117	105	105	5
3	11		28	126	62	87	111	5
4	1	1	66	220	99	115	120	5
4	1	2	71	213	101	109	102	5
4	1	3	50	175	103	105	104	5
4	1	4	45	147	80	91	115	5
4	1	5	36	154	74	96	76	5
4	1	6	37	148	62	80	108	5
4	1	7	34	180	58	118	97	5
4	1	8	25	139	61	98	114	5
4	1	9	38	130	63	91	97	5
5	1		48	177	89	101	142	5
5	2		44	151	80	94	103	5
5	3		44	188	105	86	99	5

5	4		37	174	75	104	112	5
5	5		23	160	63	85	115	5
5	6		30	159	57	93	102	5
5	7		29	150	63	87	115	5
5	8		37	167	81	98	115	5
5	9		26	167	92	91	94	5
5	10		37	166	96	102	129	5
5	11		29	163	105	130	112	5
6	1		46	178	94	104	131	5
6	2		42	154	94	104	114	5
6	3		54	172	89	96	107	5
6	4		34	163	75	91	102	5
6	5		35	167	63	98	137	5
6	6		33	163	63	107	116	5
6	7		24	152	79	103	103	5
6	8		31	145	75	89	114	5
6	9		25	157	76	116	95	5
6	10		37	153	93	117	128	5
6	11		22	161	100	102	113	5
6	12		28	157	93	101	134	5
7	1		40	157	86	118	110	5
7	2		46	158	78	86	94	5
7	3		44	158	97	111	104	5
7	4		37	178	77	109	120	5
7	5		28	167	62	84	118	5
7	6		22	146	63	96	112	5
7	7		31	144	69	84	108	5
7	8		30	145	77	99	121	5
7	9		25	157	86	93	128	5
7	10		32	167	70	90	103	5
7	11		37	183	117	114	116	5
7	12		26	148	78	98	114	5

Приложение 4. Карты-схемы распределения концентраций тяжёлых металлов на поверхности дна оз. Суури.

