

Эколого-геохимические особенности современных отложений озера Рахкаламппи (город Суоярви, Карелия)

Слуковский З. И.^{1,2} 

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, slukovsky87@gmail.com*

² *Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск*

Аннотация. Малые озера городской среды подвергаются повышенному влиянию со стороны антропогенных факторов. Это может быть выражено в различных негативных явлениях, включая захламление берегов и дна бытовым мусором, повышение мутности воды, эвтрофирование, а также в поступлении и накоплении в водоемах загрязнителей, в том числе тяжелых металлов. В работе представлены исследования современных отложений малого озера Рахкаламппи, расположенного в черте города Суоярви (Республика Карелия). Анализ показал, что в верхних слоях донных отложений установлены повышенные уровни накопления литофильных элементов (Al, Ca, Mg, Ti, Li, Rb, Cs и редкоземельных металлов), а также загрязнителей из группы тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Zn и других). Это свидетельствует о значительных изменениях в естественной среде в результате городской застройки, развития инфраструктуры, транспорта, промышленности и других человеческих активностей. Анализ интегральных экологических индексов PLI и RI, основанных на данных о содержании редких элементов, показал, что в результате техногенного воздействия озеро претерпело изменения от естественного состояния с низким уровнем загрязнения и отсутствием риска для живых организмов (нижние слои отложений) до состояния с высоким уровнем загрязнения и значительным экологическим риском (верхние слои отложений). Следует с осторожностью использовать озеро Рахкаламппи в рекреационных целях, учитывая все риски для биоты и здоровья людей.

Ключевые слова: геохимические индикаторы, тяжелые металлы, редкоземельные элементы, донные отложения, городское озеро, Карелия.

Environmental and geochemical features of modern sediments of Lake Rakhkalampi (town of Suoyarvi, Karelia)

Slukovski Z. I.^{1,2} 

¹ *Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity, slukovsky87@gmail.com*

² *Institute of geology of Karelian research center of RAS, Petrozavodsk*

Abstract. Small urban lakes are subject to increased influence from anthropogenic factors. This can manifest in various negative phenomena, including the littering of shores and bottoms with household waste, increased water turbidity, eutrophication, and the inflow and accumulation of pollutants in water bodies, including heavy metals. This study presents research on the modern sediments of the small lake Rakhkalampi, located within the town of Suoyarvi (Republic of Karelia). The analysis revealed elevated levels of accumulation of lithophilic elements (Al, Ca, Mg, Ti, Li, Rb, Cs, and rare earth metals) in the upper layers of the sediments, as well as pollutants from the group of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, and others). This indicates significant changes in the natural environment as a result of urban development, infrastructure growth, transportation, industry, and other human activities. The analysis of the integral ecological indexes PLI and RI, based on data on the content of rare elements, showed that as a result of anthropogenic impact, the lake has evolved from a natural state with low pollution levels and no risk to living organisms (lower sediment layers) to a state with high pollution levels and significant ecological risk (upper sediment layers). Caution should be exercised when using Lake Rakhkalampi for recreational purposes, considering all the risks to biota and human health.

Keywords: geochemical indicators, heavy metals, rare earth elements, sediments, urban lake, Karelia.

Введение

Влияние городской среды затрагивает наземные и водные экосистемы. Отмечается (Naselli-Flores, 2008; Persson, 2012), что в пределах городов (даже небольших) в озерах происходят различные изменения, включающие в себя: интенсивное разрушение берегов, захламление берегов и дна бытовым мусором, повышение мутности воды, эвтрофирование и цветение воды, интенсивный рост

высшей водной растительности, поступление в воду и донные отложения органических и неорганических элементов и веществ, включая тяжелые металлы, нефтепродукты, поверхностно-активные вещества, хлориды, гербициды и т. д., бактериальное загрязнение, ухудшение запаха и вкуса воды.

Малые озера городов и их донные отложения и импактные зоны являются уязвимыми мишенями для химического загрязнения, особенно тяжелыми металлами (Lindström, 2001; Jumbe, Nandini, 2009). Так, небольшие пруды в центральных городских районах Шанхая оказались более обогащены Cd, Cu, Pb и Zn в верхних слоях отложений по сравнению с водоемами, удаленными от центра города с его промышленностью и транспортом, то есть в пригородных районах (Li et al., 2012). Аналогичные закономерности по накоплению тяжелых металлов были установлены на примере изучения отложений озер города Гуанжоу (тоже Китай) (Shang et al., 2017).

Известно, что вблизи урбанизированных территорий Республики Карелия формируются районы с существенным уровнем загрязнения водных объектов, включая озера, как большие, так и малые (Каталог..., 2001). Ранее автором с коллегами детально были изучены современные отложения малых озер в импактной зоне городов Петрозаводска и Медвежьегорска (Слуковский, 2020; Savosin, Slukovskii, 2025). В данной работе представляются данные по озеру Рахкаламп, расположенному в черте города Суоярви. Цель исследования – оценить эколого-геохимические особенности поверхностных отложений указанного малого озера, расположенного на урбанизированной территории Республики Карелии.

Объект и методы исследования

Озеро Рахкаламп – это небольшой ледниковый водоем, расположенный в черте небольшого города Суоярви, имеющего население ~ 6.8 тыс. человек (рис. 1). Ранее озеро упоминалось, как Кайпинское (местное название водоема) (Новицкий и др., 2017). Берега озера заболоченные. В двух местах на восточном берегу Рахкаламп имеются выходы коренных пород. Вокруг озера растет лес. Вблизи озера расположены котельная и автопарк.

Основные морфометрические параметры Рахкаламп: площадь – 0.091 км², средняя глубина – 1.8 м, максимальная – 2.2 м. Согласно батиметрической карте озера Рахкаламп водоем имеет простую блюдцеобразную котловину (рис. 2). Данные по глубинам получены в ходе полевых исследований в 2016 г. Измерения проводились при помощи эхолота-картплоттера GarminEchomapPlus 42cv.

Верхние слои отложений озера Рахкаламп представлены обводненными илами темно-бурого цвета. Для отбора колонки отложений водоема использовался пробоотборник Limnos (производство

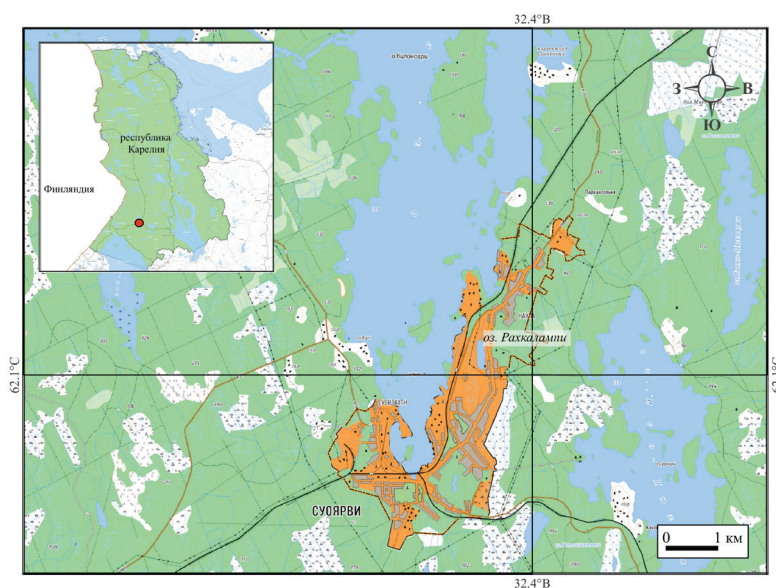


Рис. 1. Карта расположения озера Рахкаламп (автор Шестаков М.)
Fig. 1. Map of location of Lake Rakhkalampi (by Shestakov M.)

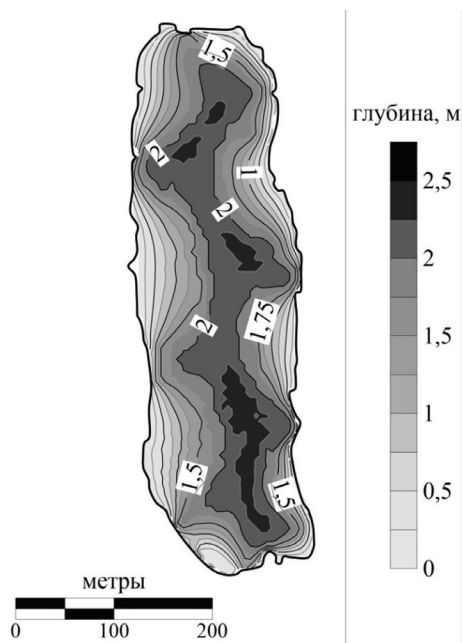


Рис. 2. Карта глубин озера Рахкаламппи (автор Сыроежко Е. В.)

Fig. 2. Map of depths of Lake Rakhkalampi (by Siroezhko E. V.)

Финляндия) (Шелехова и др., 2020). Была получена колонка длиной 30 см. Первые 26 см колонки были разделены на слои по 2 см, самый нижний слой – 4 см. В лаборатории каждая проба была разделена на две части: для гранулометрического (оставалась в естественном состоянии) и химического анализа (просушивалась при температуре 105 °С). Определение концентраций главных элементов донных отложений озера Рахкаламппи было осуществлено при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT’X. Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после прокаливании образцов до температуры 550 °С. Содержание редких элементов определялось при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой на приборе XSeries-2 ICP-MS. Подробное описание использованных методов представлено в этом издании (Шелехова и др., 2020).

Статистическая обработка выполнена при помощи программы Microsoft Office Excel. Для графической иллюстрации результатов использованы программы Easy Capture 1.2.0 и Inkscape 0.48.4. Для экологической интерпретации данных по содержанию тяжелых металлов в отложениях озера Рахкаламппи использованы интегральные индексы:

- Индекс потенциального экологического риска RI или PER (Potential Ecological Risk Index), разработанный шведскими учеными (Håkanson, 1980);
- Индекс антропогенной нагрузки PLI (Pollution Load Index) (Tomlinson et al., 1980).

Результаты и обсуждение

Анализ гранулометрического состава отложений озера Рахкаламппи показал, что в изученных осадках преобладают фракции размером 0.05–0.01 мм, 0.1–0.05 мм и 0.25–0.1 мм (рис. 3). Крупная фракция (2.0–0.5 мм) в пробах практически отсутствует. На графике также видно, что в верхних слоях отмечается увеличение доли фракции 0.25–0.1 мм по сравнению с нижними слоями и, наобо-

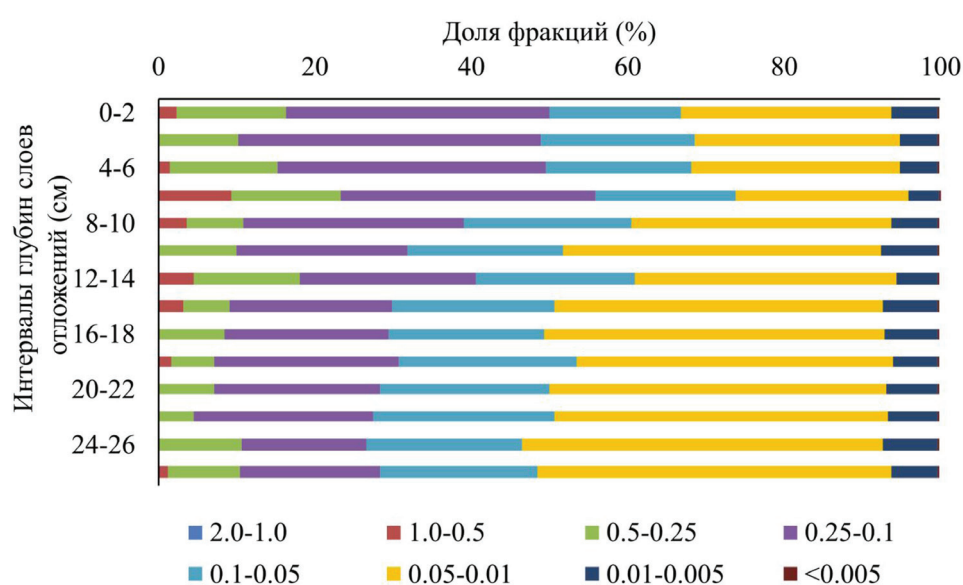


Рис. 3. Распределение гранулометрических фракций по колонке отложений озера Рахкаламппи

Fig. 3. Distribution of granulometric fractions in the sediment core of Lake Rakhkalampi

рот, уменьшение доли фракции 0.05–0.01 мм. Вероятно, это связано с какой-то сменой режима накопления отложений в озере в недавнем времени.

Среднее по колонке отложений озера Рахкаламппи содержание органического вещества составляет 43.4 %, что позволяет отнести эти отложения к сапропелям (Синькевич, Экман, 1995). Содержание кремнезема в отложениях чуть больше – 50.1 %. Остальные главные элементы имеют концентрации менее 2 %. В порядке убывания остальные элементы выстраиваются в такой ряд: Al_2O_3 (1.94) > $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ (1.75) > CaO (1.49) > MgO (0.29) > K_2O (0.22) > Na_2O (0.2) > P_2O_5 (0.16) > TiO (0.09) > S (0.04) > MnO (0.03).

Распределение в изученной колонке отложений озера концентраций главных элементов и органического вещества (по ППП) показывает, что на границе слоев 10–12 и 8–10 см происходит смена темпов накопления веществ (рис. 4). Например, в верхних (более современных) слоях отложений меньше концентрация SiO_2 по сравнению с нижними (более старыми). В тоже время, в поверхностных слоях по сравнению с более глубокими увеличиваются концентрации окислов Al, Fe, Na, Ca, K, Mg, MnO, Ti, P, а также S и органического вещества. Это согласуется с данными распределения гранулометрических фракций, показанных выше. В более современное время (активное развитие урбанизированной территории) в озеро стало больше поступать терригенного материала, состоящего из частичек разрушенных пород береговой линии озера, почвенного покрова и городской

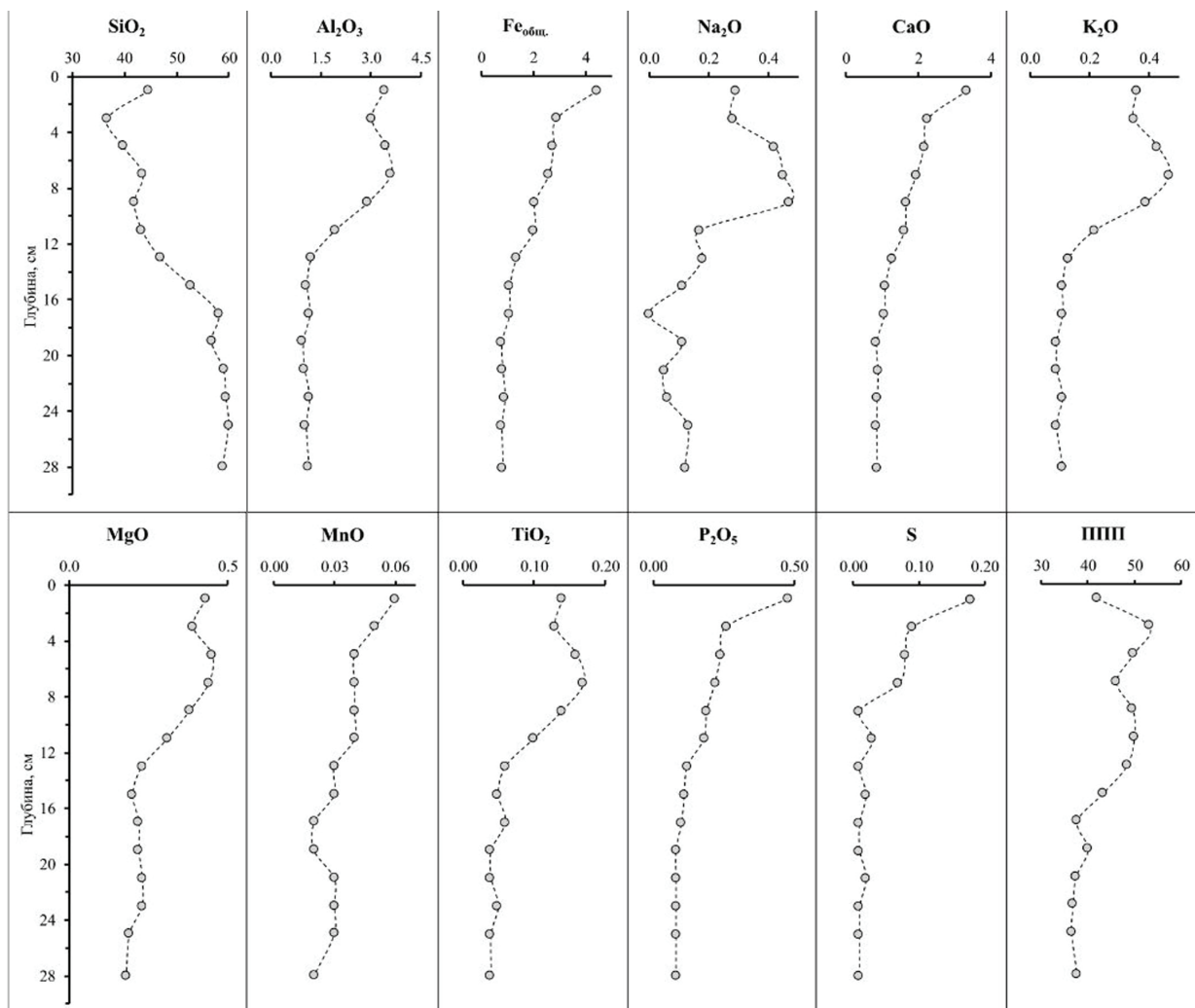


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций (в %) главных элементов и органического вещества (по ППП) в колонке отложений озера Рахкаламппи (Суоярви, Карелия)

Fig. 4. Vertical distribution of concentrations (in %) of the major elements and organic matter (by LOI) in the sediment core of Lake Rakhkalampi (Suoyarvi, Karelia)

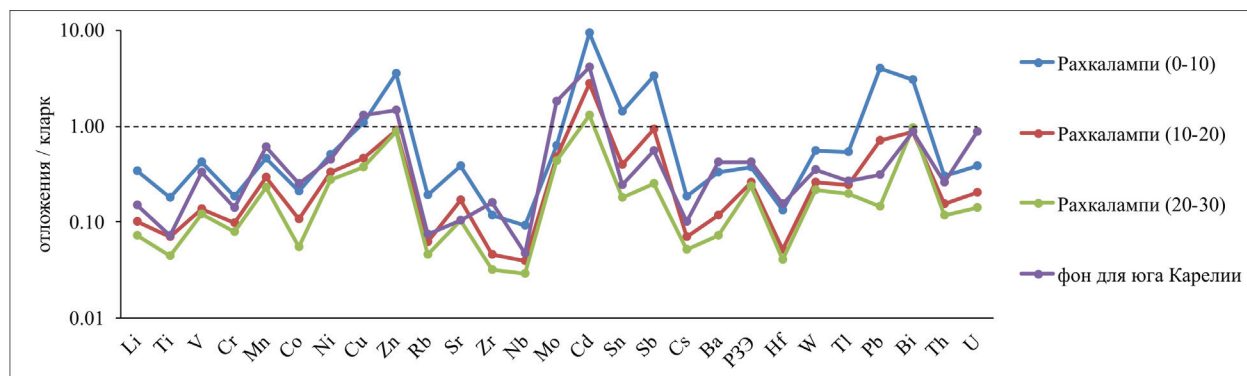


Рис. 5. Нормированные по кларку концентрации редких элементов в разных слоях колонки отложений озера Рахкаламп. Данные представлены в логарифмическом виде

Fig. 5. Clarke-normalized concentrations of rare elements in different layers of the sediment core of Lake Rakhkalampi. The data are presented in logarithmic form

пыли. С этим и связано увеличение доли некоторых гранулометрических фракций и концентраций оксидов Al, Ti, Ca и других элементов.

Анализ накопления редких элементов в отложениях озера Рахкаламп показал (рис. 5), что в верхних слоях (0–10 см) отмечены превышения над кларком, за который взято среднее содержание элементов в верхней части Земной коры (Wedepohl, 1995), концентраций Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, Pb и Bi. Эти элементы, относящиеся к группе тяжелых металлов, ранее уже отмечались как приоритетные загрязнители малых городских озер Карелии (Слуковский, 2018). Также на графике видно, что концентрации многих редких элементов превышают фоновые значения их для отложений озер южной части Карелии (Slukovskii, 2020). В частности, это установлено для Li, Ti, V, Cr, Ni, Zn, Rb, Sr, Nb, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Tl, Pb и Bi. Большинство этих элементов относится к тяжелым металлам, что говорит о существенной роли антропогенного фактора на формирование геохимических особенностей отложений озера Рахкаламп из-за его городского статуса. Также среди перечисленных элементов – щелочные металлы (Li, Rb, Cs), которые часто активно мигрируют в городской среде и аккумулируются в отложениях озер.

На рис. 5 также видно, что нижние слои (10–20 и особенно 20–30 см) отложений озера Рахкаламп имеют существенно более низкие концентрации всех изученных редких элементов по сравнению с верхними (более современными) слоями. Причем наиболее сильно обогащение этими элементами, особенно тяжелыми металлами, начинается со слоя 10–12 см, где, как уже ранее отмечалось, начинается обогащение большинством главных элементов и органическим веществом (рис. 4). Очевидно, что оба процесса тесно связаны с влиянием урбанизированной среды на изучаемый малый водоем. Тяжелые металлы могли поступать в озеро из-за выбросов железнодорожного, автомобильного транспорта, мазутной котельной, автосервисов и других небольших предприятий города Суоярви. Ранее уже отмечались повышенные концентрации химических элементов в воде озер города, включая озеро Рахкаламп (Новицкий и др., 2017). В то же время разрушение берегов, пород на водосборной площади и почвенного покрова в связи со строительством дорог, зданий и другой инфраструктуры в городах ведет к миграции в водную среду литофильных элементов, которые затем накапливаются в современных отложениях озер. Именно этим можно объяснить повышенные концентрации Al, Ca, Mg, Li, Rb, Cs и редкоземельных элементов в верхних слоях озера Рахкаламп по сравнению с нижними.

Для экологической интерпретации полученных геохимических данных были использованы интегральные индексы, основанные на использовании фоновых концентраций элементов (рис. 6). При расчете индекса антропогенной нагрузки PLI были использованы концентрации 14 элементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Tl, Pb, Bi), относящиеся к тяжелым металлам. Анализ показал, что значение индекса PLI варьирует от 0.38 до 2.16, увеличиваясь от нижних слоев к верхним. Согласно (Tomlinson et al., 1980), слои отложений озера Рахкаламп от 12 до 30 см имеют низ-

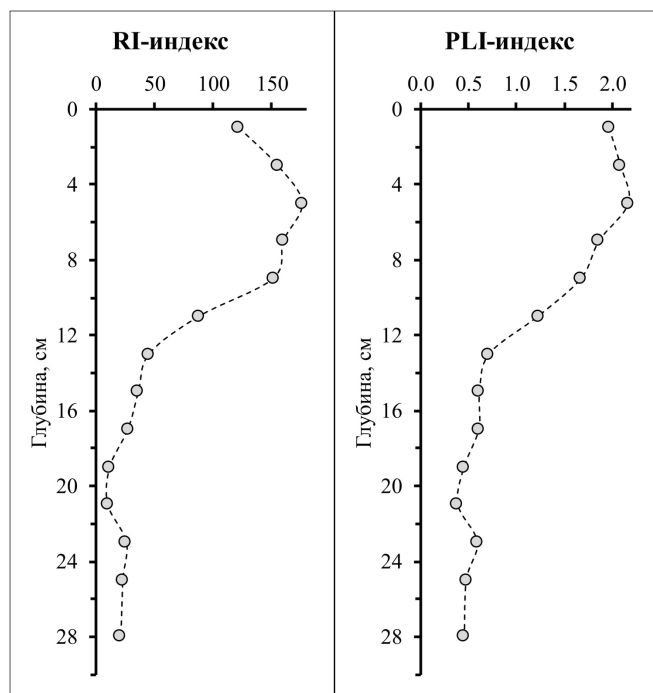


Рис. 6. Вертикальное распределение значений индексов RI и PLI, рассчитанных для колонки отложений озера Рахкаламппи

Fig. 6. Vertical distribution of RI and PLI index values calculated for the sediment core of Lake Rakhkalampi

и 6–12 см – значительный уровень экологического риска ($160 > RI > 80$), а слой 4–6 см – высокий уровень экологического риска ($320 > RI > 160$). Таким образом, наибольшую опасность для биоты озера и людей, которые могут использовать водоем в рекреационных целях, представляют самые современные слои отложения озера Рахкаламппи. Следует с осторожностью относиться к ловле в озере рыбы, купанию в нем. Местным властям необходимо вести мониторинг состояния водоема для контроля качества воды и донных отложений, с учетом установленных экологических рисков.

Заключение

В результате исследования эколого-геохимических особенностей современных отложений (верхние 30 см) озера Рахкаламппи, расположенного в черте города Суоярви (Карелия), было установлено, что водоем испытывает антропогенную нагрузку со стороны урбанизированной среды, даже несмотря на небольшие размеры населенного пункта. В верхних слоях донных отложений, которые были сформированы в последние несколько десятилетий, выявлены повышенные концентрации литофильных элементов (Al, Ca, Mg, Ti, Li, Rb, Cs, редкоземельных металлов) и загрязнителей из числа тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Zn и др.). Все это указывает на существенное преобразования естественной среды в результате строительства и развития города с его инфраструктурой, транспортом, промышленностью и другими видами человеческой деятельности. Расчет интегральных экологических индексов на основе полученных данных по содержанию редких элементов показал, что в результате техногенного влияния озеро эволюционировало от естественного состояния, где уровень загрязнения низкий и нет риска для биоты (нижние слои отложений), до высокого уровня загрязнения и высокого экологического риска (верхние слои отложений). Следует продолжить исследования городских территорий Севера России и их малых водоемов, от качества которых зависит безопасность и комфорт городской среды Карелии и других регионов России.

кий уровень загрязнения ($PLI \leq 1$), слои 0–2 и 4–10 см – умеренный уровень загрязнения ($1 < PLI \leq 2$), а слои от 2 до 6 см – высокий уровень загрязнения ($2 < PLI \leq 3$). Именно в слоях 2–6 см установлены максимальные концентрации тяжелых металлов, особенно Pb, Cd, Zn. Аналогичное вертикальное распределение значений индекса PLI было получено при изучении двух озер в городе Медвежьегорске (Savosin, Slukovskii, 2025). Однако в случае ранее исследованных озер значения индекса PLI в верхних слоях отложений были существенно выше из-за большей антропогенной нагрузки на водную среду в городе Медвежьегорске.

Данные полученные, при расчете индекса потенциального экологического риска RI, где были использованы концентрации Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb, хорошо коррелируют с данными по индексу PLI. Установлено, что слои отложений озера Рахкаламппи от 14 до 30 см имеют низкий уровень экологического риска ($RI \leq 40$), «переходный» слой 12–14 см – средний уровень экологического риска ($80 > RI > 40$), слои 0–4

Благодарности

Работа выполнена в рамках тем НИР Института геологии КарНЦ РАН № FMEZ-2023-0008 (гранулометрический и химический состав отложений) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014 (экологическая интерпретация данных).

Автор также выражает благодарность В. Л. Утициной, М. В. Эховой, А. С. Парамонову, С. В. Бурдюху за качественные аналитические работы.

Литература

1. Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск. Изд-во: Карельский научный центр РАН, 2001. 286 с.
2. Новицкий Д. Г., Слуковский З. И., Медведев А. С. Геохимические индикаторы загрязнения водной среды на территории малого города (на примере города Суоярви, Республика Карелия) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: Материалы XXVIII Молодёжной научной конференции памяти К. О. Кратца. СПб. Изд-во: ООО «Издательство ВВМ», 2017. С. 214–218.
3. Синькевич Е. И., Экман И. М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.
4. Слуковский З. И. Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды Республики Карелии // Водное хозяйство России. 2018. № 6. С. 70–82.
5. Слуковский З. И. Уровень аккумуляции и формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях малых озер урбанизированной среды (Карелия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия: Науки о Земле. 2020. № 65(1). С. 171–192.
6. Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.
7. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Research. 1980. V. 14, No. 8. P. 975–1001.
8. Jumbe A. S., Nandini N. Heavy Metals Analysis and Sediment Quality Values in Urban Lakes // American Journal of Environmental Sciences. 2009. V. 5, No. 6. P. 678–687.
9. Li H., Yu S., Li G., Liu Y. [et al.] Urbanization increased metal levels in lake surface sediment and catchment topsoil of waterscape parks // Science of The Total Environment. 2012. V. 432. P. 202–209.
10. Lindström M. Urban Land Use Influences on Heavy Metal Fluxes and Surface Sediment Concentrations of Small Lakes // Water, Air, & Soil Pollution. 2001. V. 126. P. 363–383.
11. Savosin E., Slukovskii Z. Chemical composition of sediment and macrozoobenthos of small urban lakes, the Republic of Karelia, Russia // International Journal of Sediment Research. 2025. V. 40, No. 1. P. 119–128.
12. Shang S., Zhong W., Wei Z., Zhu C., Ye S., Tang X., Chen Y., Tian L., Chen B. Heavy metals in surface sediments of lakes in Guangzhou public parks in China and their relations with anthropogenic activities and urbanization // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2017. V. 23. P. 2002–2016.
13. Slukovskii Z. I. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia // Вестник МГТУ. 2020. № 23(1). С. 80–92.
14. Tomlinson D. L., Wilson J. G., Harris C. R., Jeffney D. W. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1980. V. 33. P. 566–572.
15. Persson J. Urban Lakes and Ponds // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / (Eds.) L. Bengtsson, R. W. Herschy, R. W. Fairbridge. Dordrecht: Springer Dordrecht, 2012. P. 836–839.
16. Naselli-Flores L. Urban lakes: ecosystems at risk, worthy of the best care // Proceedings of Taal 2007: the 12th World Lake Conference, 28 October-2 November 2007 / Eds. M. Sengupta, R. Dalwani. Jaipur, Rajasthan, 2008. P. 1333–1337.
17. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59, No. 7. P. 1217–1232.