

Пространственное распределение химических элементов в отложениях озера Портлубол (северная часть Мурманской области, Арктика)

Слуковский З. И.^{1,2}, Адамская П. Н.^{1,3}, Вокуева С. И.¹, Даувальтер В. А.¹

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

² Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

³ Филиал ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Апатиты

Аннотация. Ранние исследования отложений озера Портлубол, расположенного в Лицевском геологическом районе на севере Мурманской области, выявили ряд природных геохимических аномалий в донных осадках водоема, связанных с особенностями местных горных пород. В частности, установлено, что повышенные по отношению к кларку концентрации Мо, U и редкоземельных элементов в отложениях озера являются следствием миграции их в системе «порода-вода-отложения». В настоящей работе показано пространственное распределение концентраций этих и других элементов в современных осадках озера Портлубол. Кроме того, проведен гранулометрический анализ отложений, что позволило установить связь тонких (алевритоглинистых) фракций осадков с процессом накопления металлов. Также одним из факторов повышенного накопления Мо в изученных отложениях является смена окислительно-восстановительных условий на границе «вода-дно», где образуются окисленные слои осадков с повышенным содержанием редокс-чувствительного Mn. Вместе с этим металлом в таких слоях отложений более интенсивно накапливается Мо, чьи концентрации достигают 121 мг/кг, что вдове больше среднего значения для отложений всего водоема.

Ключевые слова: геохимия донных отложений, молибден, уран, редкоземельные элементы, Мурманская область, Арктика.

Spatial distribution of chemical elements in the sediments of Lake Portlubol (northern part of Murmansk region, Arctic)

Slukovski Z. I.^{1,2}, Adamskaia P. N.^{1,3}, Vokueva S. I.¹, Dauvalter V. A.¹

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

³ Apatity branch of Murmansk Arctic University, Apatity

Abstract. Early studies of sediments of Lake Portlubol, located in the Litsevsky geological region in the northern part of Murmansk region, revealed a number of natural geochemical anomalies in the reservoir's sediments related to the features of the local rocks. Specifically, it was established that elevated concentrations of Mo, U, and rare earth elements in the lake sediments, relative to the clarke value, are a consequence of their migration within the rock-water-sediment system. This study demonstrates the spatial distribution of these and other element concentrations in modern Lake Portlubol sediments. Furthermore, a grain-size analysis of the sediments revealed a connection between the fine (silt-clay) fractions of the sediments and the process of metal accumulation. Another factor driving the increased Mo accumulation in the studied sediments is the shift in redox conditions at the water-bottom interface, where oxidized sediment layers with elevated contents of redox-sensitive Mn are formed. Along with Mn, Mo accumulates more intensively in these sediment layers, with concentrations reaching 121 mg/kg, which is twice the average value for sediments throughout the reservoir.

Keywords: geochemistry of lake sediments, molybdenum, uranium, rare earth elements, Murmansk region, Arctic.

Введение

Озеро Портлубол, расположенное в северной части Мурманской области (Печенгский район, рис. 1 а), является примером того, как природный (геологический) фактор оказывает существенное влияние на образование геохимических аномалий в донных отложениях (Slukovskii, Dauvalter, 2024; Slukovskii et al., 2025). Исследования установили превышения концентраций Мо, U, редкоземельных металлов (РЗЭ) в 93, 24 и 4 раза по сравнению с кларком (Wedepohl, 1995). Во всех трех слу-

чаях была установлена связь геохимических особенностей изученных отложений озера Портлубол с магматическими породами водосборной площади и их минералами (Адамская, Слуковский, 2025).

При этом несмотря на проведенные исследования остаются невыясненными роли других факторов, оказывающих влияние на формирование геохимического облика современных отложений озера Портлубол. В частности, следует оценить влияние гранулометрического состава отложений, гидрологического режима озера, а также редокс-условий, меняющихся обычно в водоемах на границе «вода-дно». Для ответов на эти вопросы была поставлена цель – изучить пространственное распределение химических элементов (Mo, U, PЗЭ и других) и основных гранулометрических фракций в верхних слоях отложений озера Портлубол, а также установить ключевые литолого-геохимические взаимосвязи и факторы, влияющие на их образование.

Методы исследования

Отбор проб донных отложений во время площадной съемки проводился 9 июля 2025 г. с ПВХ-лодки «Флагман-320» при помощи дночерпателя Экмана. Места отбора отмечены на рис. 1 б. Для исследования использовались только верхние 10 см отложений. Далее пробы складывались в пластиковые zip-пакеты и доставлялись в лабораторию. Гранулометрический состав определялся в пробах, находящихся в состоянии естественной влажности, при помощи многофункционального анализатора частиц LS13 320. Для оценки химического состава отложений пробы высушивались при температуре 105 °С, измельчались на истирателе до состояния порошка и затем разлагались смесью кислот. Содержание микроэлементов 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).

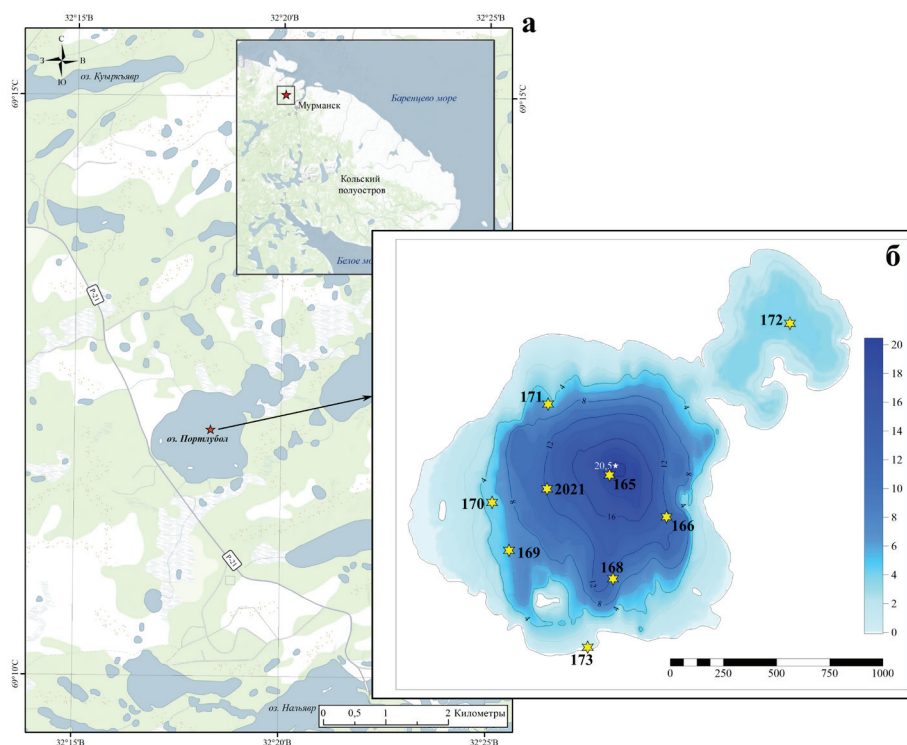


Рис. 1. Карта расположения озера Портлубол (а) и карта глубин водоема с указанием станций отбора проб (автор М. Шестаков)

Fig. 1. Map of the location of Lake Portlubol (a) and a map of the lake's depths indicating sampling stations (author M. Shestakov)

Результаты и обсуждение

Изученные отложения озера Портлубол представлены преимущественно мягкими обводненными илами бурого, зеленовато-бурого цвета с черными включениями и/или прослойками (рис. 2 а).

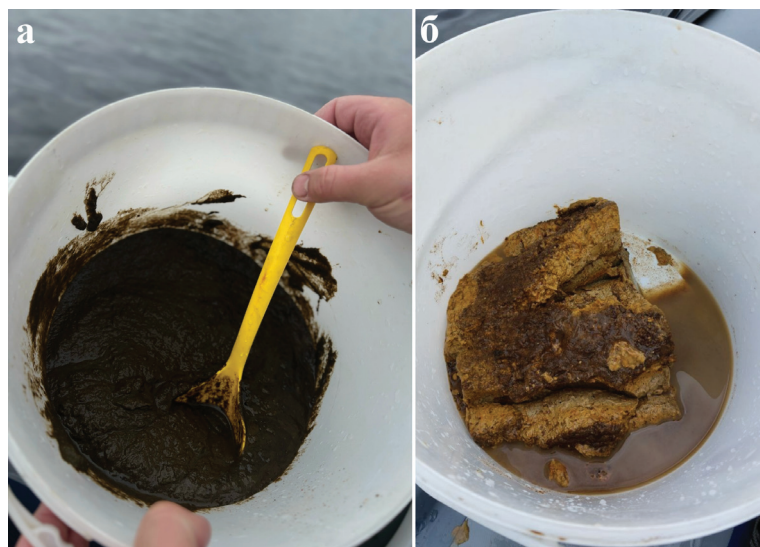


Рис. 2. Фотографии отложений озера Портлубол разных типов
Fig. 2. Photographs of different types of sediments from Lake Portlubil

Исключение составляют отложения на станции 166, где был вскрыт светло-оранжевый осадок, под которым залегают плотные зеленовато-серые отложения с оранжевыми прослойками (рис. 2 б).

Гранулометрический анализ показал, что в основном (большом) плесе озера Портлубол в осадках преобладает фракция 0.01–0.05 мм, чья доля относительно суммы всех фракций варьирует от 36 до 57 % (рис. 3). Однако второй по значимости фракцией в отложениях на станции 166 является фракция 0.005–0.01 мм (41–47 %), хотя во всех остальных пробах донных отложений основного плеса озера Портлубол эта фрак-

ция не превышает 14 %. Таким образом, светло-оранжевый и зеленовато-серый осадок, который, вероятно, подстилает бурые слои отложений, относится к алевритовому типу, хотя в целом по озеру поверхностные осадки – это алевритовые пески, песчаный алеврит или песок. К песчаному типу отложений относится осадок, отобранный в северо-восточной части озера Портлубол (станция 172), то есть во втором (малом) плесе водоема. Здесь в отложениях преобладает фракция 0.1–0.25 мм, составляя 48 % от суммы всех гранулометрических фракций.

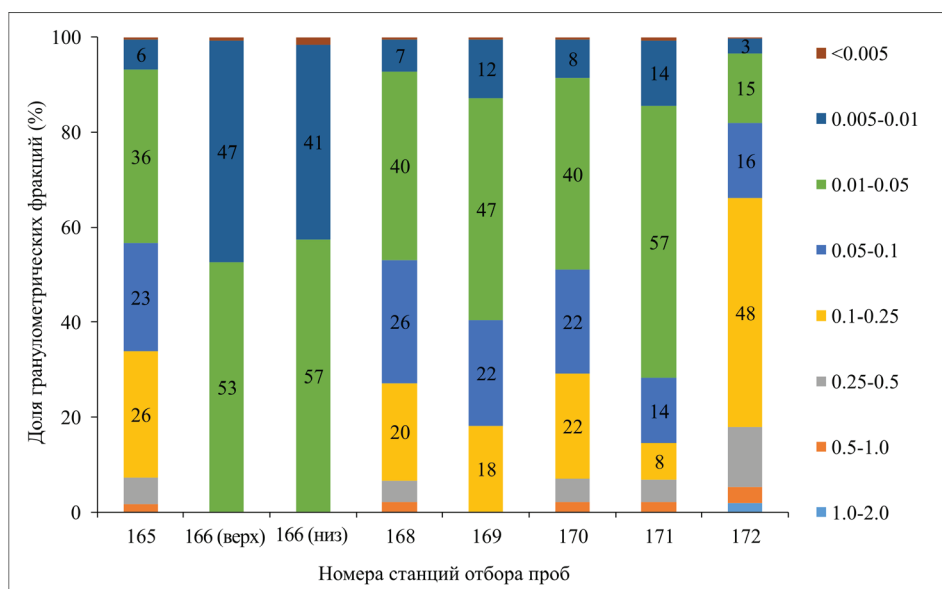


Рис. 3. Гранулометрический состав донных отложений озера Портлубол
Fig. 3. Granulometric composition of sediments of Lake Portlubil

Анализ валовых концентраций микроэлементов показал (рис. 4), что самые большие превышения над кларком и фоном ($K_c > 10$) выявлены для Mo, U, Mn, а также в ряде случаев для W (Wedepohl, 1995; Slukovskii et al., 2026). Кроме того, для PЗЭ, Th, Sr, Pb, Sb, Rb, Ba и Bi установлены превышения над фоновым уровнем с $K_c \geq 5$, но $K_c < 10$. Рассмотрим отдельно картину площадного распределения наиболее показательных элементов в изучаемых отложениях озера Портлубол.

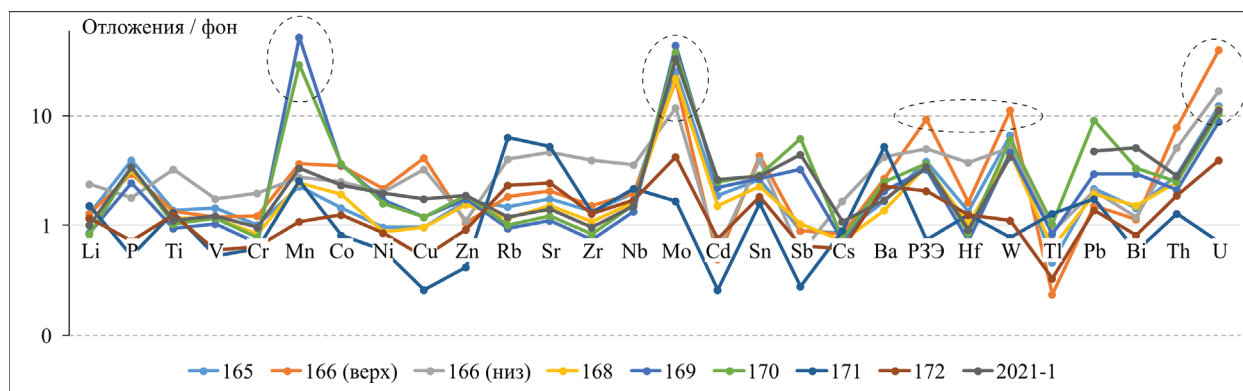


Рис. 4. Нормированные на фоновые значения концентрации микроэлементов в отложениях озера Портлубол. Данные представлены в логарифмическом виде

Fig. 4. Trace element concentrations in Lake Portlubol sediments normalized to background values. Data are presented in logarithmic form

Молибден. Содержание этого элемента в отложениях озера Портлубол варьирует от 4.6 до 120.7 мг/кг (среднее значение – 61 мг/кг, коэффициент вариации – 65 %) (рис. 5). Наибольшие концентрации Мо установлены в западной части озера в зеленовато-бурых слоях отложений с черными (вероятно, железистыми) включениями. Самые низкие концентрации Мо установлены в северной части озера, также невысокие относительно среднего значения концентрации металла отмечены в малом плесе озера Портлубол. В светлых осадках алевритового типа концентрации Мо близки к средним значениям, полученным для всего озера и его поверхностных отложений.

Уран. Концентрации этого элемента колеблются от 2 до 112 мг/кг при среднем значении 36.5 мг/кг и коэффициенте вариации 65 % (рис. 6). Максимальное содержание У установлено в верхней части осадка алевритового типа из восточной части озера Портлубол. При этом в нижней части отложений со станции 166, отличающихся более плотной консистенцией, содержание У падает до 48.4 мг/кг, что немного выше среднего значения для всего озера. Наименьшие концентрации У, как и в случае с Мо, установлены на станциях 171 и 172, то есть в северной части Портлубола, включая его малый плес.

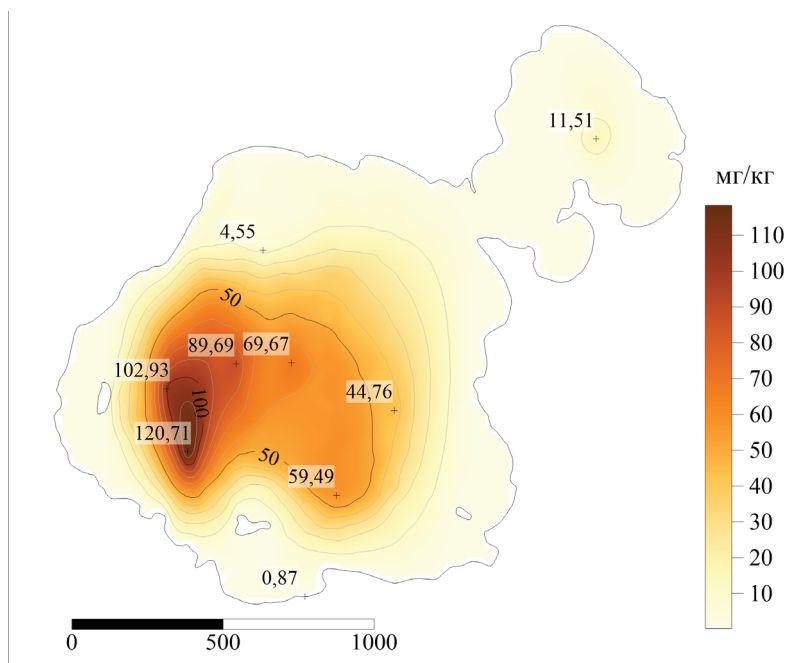


Рис. 5. Карта распределения концентраций Мо (мг/кг) в поверхностных слоях отложений озера Портлубол

Fig. 5. Map of the distribution of Mo concentrations (mg/kg) in the surface layers of sediments of Lake Portlubol

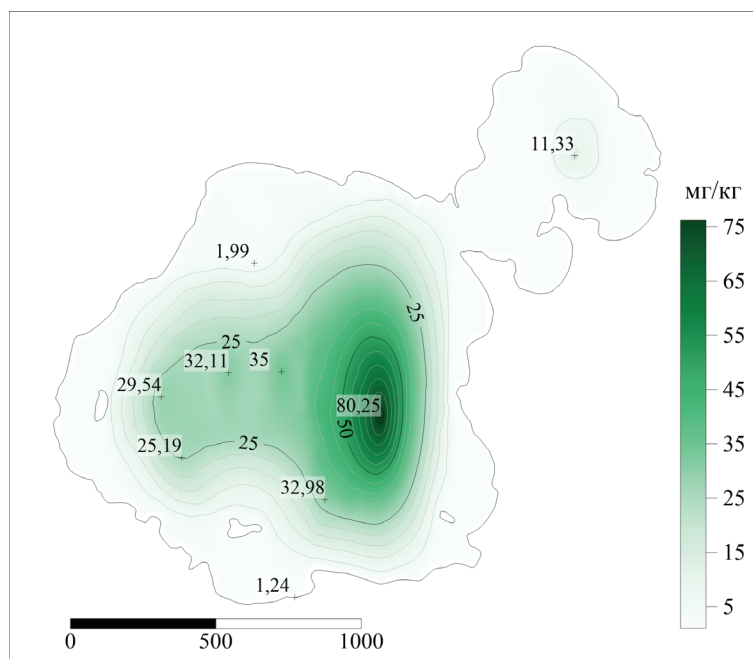


Рис. 6. Карта распределения концентраций U (мг/кг) в поверхностных слоях отложений озера Портлубол
 Fig. 6. Map of the distribution of U concentrations (mg/kg) in the surface layers of sediments of Lake Portlubil

Марганец. Содержание Mn варьирует от 210 до 10020 мг/кг (среднее значение – 2147 мг/кг). Концентрации этого металла имеют самый большой коэффициент вариации (160 %) среди всех изученных микроэлементов, поэтому важно также привести медианное содержание Mn (535 мг/кг), которое значительно ниже среднего. Максимальное содержание Mn, как и Mo, относится к станции 169 в западной части озера Портлубол (рис. 7), а минимальное – в малом плесе водоема.

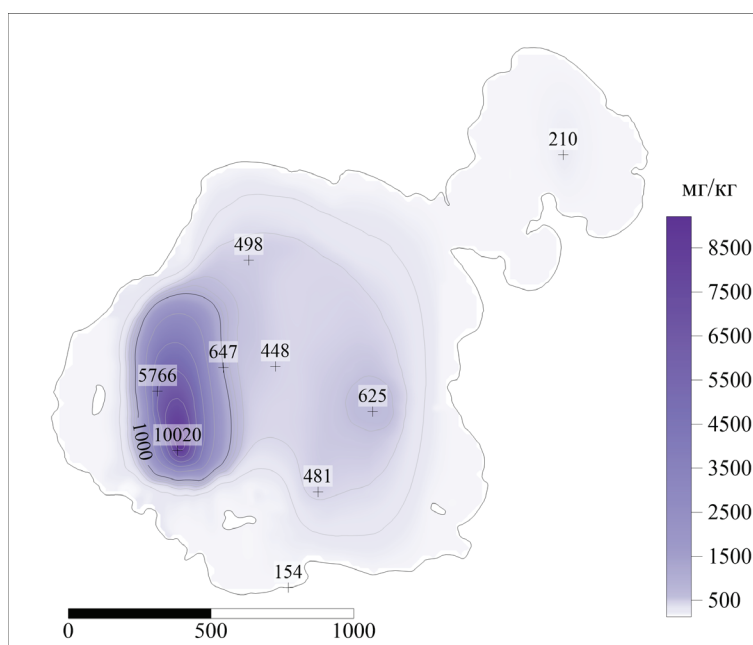


Рис. 7. Карта распределения концентраций Mn (мг/кг) в поверхностных слоях отложений озера Портлубол
 Fig. 7. Map of the distribution of Mn concentrations (mg/kg) in the surface layers of sediments of Lake Portlubil

Концентрации РЗЭ, W, Th, Ti, V, Cu, Zr, Nb, Sn, Hf по аналогии с U также имеют наибольшие концентрации в отложениях на станции 166, где преобладают наиболее тонкие фракции осадков, что, скорее всего, отражается на светлом цвете и плотной консистенции донных отложений озе-

ра Портлубол в восточной части водоема. На графиках (рис. 8) хорошо видна связь между концентрациями U и РЗЭ и долей фракции 0.005–0.05 мм в пробах исследованных отложений. Известно, что РЗЭ и другие микроэлементы часто имеют тесную связь с тонкими фракциями отложений водных объектов (Loring, 1990; Mao et al., 2014), что, в конечном счете, означает, что эти элементы находятся преимущественно в терригенной составляющей донных отложений озер, включая осадки озера Портлубол.

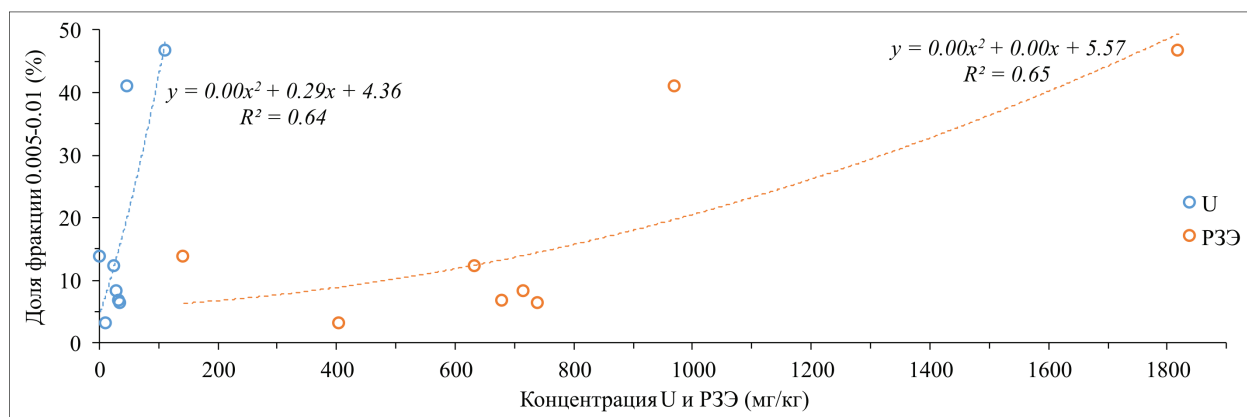


Рис. 8. Взаимосвязь концентраций U и РЗЭ с фракцией 0.005–0.01 мм отложений озера Портлубол

Fig. 8. Relationship between U and REE concentrations and the 0.005–0.01 mm fraction of Portlubol Lake sediments

Совсем иное поведение демонстрирует Мо, элемент, чьи аномалии в изученных донных отложениях вызывают наибольший интерес (Slukovskii et al., 2025). Карты на рисунках 5 и 7 показывают, что этот металл имеет связь с Mn. В первую очередь это объясняется редокс-чувствительностью Мо (Юдович, Кетрис, 2011; Morford et al., 2009), который, высвобождаясь из первичных минералов, может концентрироваться в оксидах Fe и Mn, представленных иногда железомарганцевыми конкрециями. Отсутствие какой-либо связи между Мо и U, второй из которых также может реагировать на изменения окислительно-восстановительных условий, объясняется тем, что минералы, в которых содержится U, более устойчивы в ходе миграции в системе «порода-вода-донные отложения».

Расчет соотношения концентраций Мо/U, являющегося индикатором окисленных или восстановительных отложений (Юдович, Кетрис, 2011), показал, что наибольшее значение индекса (5) отмечено в осадках озера Портлубол с максимальным содержанием Mn. Здесь отложения окисленные. Наоборот, как показано на рис. 9, невысокие значения Мо/U-индекса, свидетельствующие о восстановительных осадках, отмечены в пробах с концентрациями Mn, близкими к медиане содержания этого металла в отложениях озера Портлубол. Вероятно, в восточной части озера Порт-

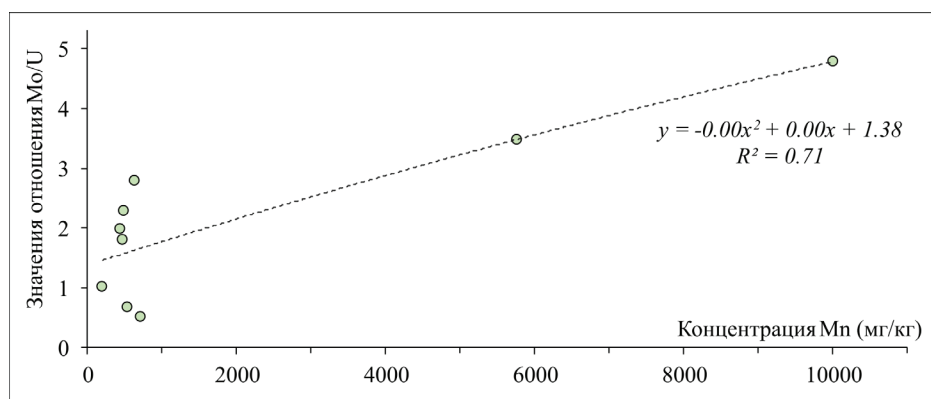


Рис. 9. Взаимосвязь концентрации Mn со значениями индекса Мо/U в разных пробах отложений озера Портлубол

Fig. 9. Relationship between Mn concentration and Mo/U index values in different sediment samples from Lake Portlubol

лубол под влиянием водотоков, обогащенных кислородом и растворенным Mn, на глубинах до 10 м формируется окисленный слой отложений, включающий в себя железомарганцевые конкреции. Для редокс-чувствительного Mo, поступающего в озеро из горных пород водосборной площади, эти слои являются геохимическим барьером. Другие изученные элементы также накапливаются в вышекларковых и вышефоновых значениях в отложениях, обогащенных Mn, но с меньшей интенсивностью по сравнению с Mo. Для большинства других микроэлементов основным фактором, контролирующим их накопления в осадках, является гранулометрический состав.

Заключение

В результате нового исследования поверхностных отложений озера Портлубол было показано, что осадки в водоеме представлены двумя типами – обводненными бурыми или зеленовато-бурными илами и более плотными светло-оранжевыми отложениями. Гранулометрический анализ показал, что первый тип отложений – это преимущественно алевритовый песок или песчаный алеврит, а второй – алеврит, где суммарная доля доминирующих фракций 0.01–0.05 и 0.005–0.01 мм составляет 98–99 %. Геохимические исследования показали, что в более светлых и плотных отложениях лучше всего накапливаются U (до 112 мг/кг), РЗЭ (до 1819 мг/кг), W, Th, Ti, V, Cu, Zr, Nb, Sn и Hf. Пространственное распределение концентраций указанных элементов в современных отложениях озера Портлубол показало, что их максимальные значения отмечены в восточной части водоема, в месте обнаружения светло-оранжевых отложений озера. Иное геохимическое поведение уставлено для Mo и Mn. Оба металла имеют максимальные концентрации в юго-западной части озера, что, вероятно, связано со сменой редокс-условий в этой части озера на границе «вода-дно». Известно, что Mo может концентрироваться в оксидах Fe и Mn, представленных часто железомарганцевыми конкрециями на дне северных озер. Кроме того, для этого района озера установлено наибольшее значение индекса Mo/U (5), что говорит об окисленных осадках с максимальным содержанием редокс-чувствительного Mn.

Благодарности

Работа производилась при поддержке и в рамках реализации проекта РНФ24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

Литература

1. Адамская П. Н., Слуковский З. И. Минеральные включения в гранитоидах района озера Портлубол (Север Мурманской области) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: Матер. XXXVI молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца и акад. РАН Ф. П. Митрофанова (г. Апатиты, 22–27 сентября 2025 г.). Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 2025. С. 9–11.
2. Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.
3. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар. Изд-во: Геопринт, 2011. 742 с.
4. Loring D. H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // Marine Chemistry. 1990. V. 29. P. 155–168. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(90\)90011-Z](https://doi.org/10.1016/0304-4203(90)90011-Z).
5. Mao L. Duowen M., Jinghong Y., Yuan Yuan G., Haiyan L. Rare Earth Elements Geochemistry in Surface Floodplain Sediments from the Xiangjiang River, Middle Reach of Changjiang River, China // Quaternary International. 2014. V. 336. P. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.01.052>.
6. Morford J. L., Martin W. R., Francois R., Carney C. M. A model for uranium, rhenium, and molybdenum diagenesis in marine sediments based on results from coastal locations // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. V. 73. P. 2938–2960. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.02.029>.
7. Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A. Sediment geochemistry of Lake Portlubol (Murmansk region): natural anomalies and reconstruction of anthropogenic events in the catchment // Limnology and Freshwater Biology. 2024. V. 4. P. 659–664. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-659>.

-
8. Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Mescheryakov N. I., Usyagina I. S. Anomalous Concentrations of Molybdenum in Modern Sediments of the Background Lake in the Arctic (Murmansk Region) // *Doklady Earth Sciences*. 2025. V. 520, No. 31. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24605121>.
 9. Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Adamskaia P. N., Guzeva A. V. Background Concentrations of Trace Elements in Recent Lake Sediments of the Murmansk Region // *Doklady Earth Science*. 2026. V. 526, No. 35. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25608806>.
 10. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59, No. 7. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).