

УДК 550.4

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР ПОЛУОСТРОВОВ РЫБАЧИЙ И СРЕДНИЙ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РФ)

П. Н. Адамская^{1,2*}, З. И. Слуковский¹, В. А. Даувальтер¹,
И. В. Чикирев²

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН
(Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209),
*polina.adamskaya@bk.ru

² Филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Мурманский арктический университет» в г. Апатиты
(ул. Лесная, 29, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

Представлены результаты первого комплексного исследования содержания главных элементов и гранулометрического состава донных отложений шести малых озер (Карху, Питьеовое, Поропеллон, Скорбеевское, Крайнее, Лохи), расположенных на полуостровах Рыбачий и Средний в северной части Мурманской области (Арктическая зона РФ). Результаты показали, что среди главных элементов в осадках преобладает SiO₂ (41,4–59,7 %), и в совокупности с данными о потерях при прокаливании (7,2–35,2 %) это характеризует отложения как органосиликатные. Количество SiO₂ в осадках соответствует его содержанию в породах суши, поступающих в водоем при абразии берегов и выветривании. Процесс механического разрушения пород водосбора и последующего осадконакопления происходил в условиях холодного гумидного климата, что подтверждено результатами расчетов индекса химического выветривания, гидролизатного модуля и титанового модуля. Установлено, что осадки озер Крайнее, Скорбеевское и Лохи имеют связь с глинистыми сланцами, отложения озер Поропеллон и Карху тяготеют по составу к гидрослюдистым пелитам, а в оз. Питьеовое схожи по составу с гидрослюдистыми глинами. Al₂O₃, K₂O и Na₂O в большинстве исследованных озер демонстрируют рост концентраций с глубиной отбора проб, что связано с увеличением доли алевритовой фракции (<0,050–0,005 мм). В целом отложения представлены преимущественно псаммитами (1,00–0,05 мм), указывающими на песчаный тип осадков. Настоящее исследование подчеркивает роль геоморфологических особенностей озер, литологического состава пород водосбора и условий их выветривания в формировании гранулометрического и геохимического состава донных отложений малых озер Арктики.

Ключевые слова: донные отложения озер; геохимические индексы; гранулометрический состав; породообразующие элементы; полуострова Рыбачий и Средний; Арктика

Для цитирования: Адамская П. Н., Слукровский З. И., Даувальтер В. А., Чикирев И. В. Литолого-геохимические особенности современных отложений озер полуостровов Рыбачий и Средний (Мурманская область, Арктическая зона РФ) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 33–48. doi: 10.17076/lim2262

Финансирование. Работа проводилась при поддержке и в рамках реализации проекта РФФ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

**P. N. Adamskaia^{1,2*}, Z. I. Slukovskii¹, V. A. Dauvalter¹, I. V. Chikirev².
LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF MODERN SEDIMENTS
IN LAKES OF THE RYBACHY AND SREDNY PENINSULAS (MURMANSK
REGION, ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION)**

¹*Institute of the North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia), *polina.adamskaya@bk.ru*

²*Apatity Branch of the Murmansk Arctic University (29 Lesnaya St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)*

The article presents the results of the first comprehensive study of the content of the main elements and the particle-size composition of sediments in six small lakes (Karhu, Pityevoe, Poropellon, Skorbeevskoe, Krainee, Lohi) located on the Rybachy and Sredny peninsulas in the northern part of the Murmansk Region (Arctic zone of the Russian Federation). The results show that SiO₂ prevails among the main elements in precipitation (41.4–59.7 %). This, together with data on the loss on ignition (7.2–35.2 %), characterizes the deposits as organosiliceous. The amount of SiO₂ in sediments corresponds to its content in land rocks entering the reservoir during coastal abrasion and weathering. The mechanical destruction of rocks of the catchment area and subsequent sedimentation occurred in a cold humid climate, as confirmed by the estimates of the chemical weathering index, the hydrolysate modulus, and the titanium modulus. Sediments of lakes Krainee, Skorbeevskoye and Lohi are shown to be associated with argillaceous shale, the composition of sediments of lakes Poropellon and Karhu aligns with hydrous-mica pelite, and Lake Pityevoe sediments are similar to hydrous-mica clay. The concentrations of Al₂O₃, K₂O, and Na₂O in most of the studied lakes grow with sampling depth, which is due to an increase in the proportion of silt particles (<0.05–0.005 mm). The sediments in general are mainly represented by psammites (1–0.05 mm), pointing to a sandy type of sedimentation. The study highlights the role of the geomorphological features of lakes, lithological composition of rocks in the catchment area, and their weathering conditions in shaping the particle-size and geochemical composition of bottom sediments in small Arctic lakes.

Keywords: bottom sediments of lakes; geochemical indices; particle-size distribution; rock-forming elements; Rybachy and Sredny peninsulas; the Arctic

For citation: Adamskaia P. N., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Chikirev I. V. Lithological and geochemical features of modern sediments in lakes of the Rybachy and Sredny peninsulas (Murmansk Region, Arctic zone of the Russian Federation). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 33–48. doi: 10.17076/lim2262

Funding. The work was carried out with the support and within the framework of the RSF project #24-17-20006 “Background lakes of the Arctic zone of the Murmansk Region: hydrochemistry, heavy metal anomalies, and microplastics as an emerging pollutant in the world's waterbodies”.

Введение

Донные отложения являются информационным архивом природных условий формирования озерных экосистем [Dearing, 1991; Эдельштейн, 2014]. Ведущую роль в процессе литогенеза озерных осадков играют геологическое строение и литологический состав пород водосбора, подвергающихся процессам выветривания, эрозии и береговой абразии, которые влияют на поступление терригенного материала в водоем. Интенсивность выветривания и стока напрямую связана с климатическими условиями и гидрологическим режимом. Второстепенное влияние на водоем оказывают биологическая продуктивность и локальные особенности ландшафта [Fralick, Kronberg, 1997; Юдович, Кетрис, 2011]. В этой связи геохимические исследования донных отложений позволяют реконструировать условия осадконакопления и оценить роль различных природных факторов в формировании их химического состава [Иванов, 2006].

Геохимические особенности озерных отложений традиционно изучаются на основе распределения микроэлементов, что связано с их высокой чувствительностью к изменениям условий осадконакопления. При этом роль породообразующих оксидов SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Na_2O , CaO , K_2O , MgO , MnO и их связь с гранулометрическим составом осадков нередко остаются менее изученными [Даувальтер, 2012], несмотря на то, что их анализ позволяет оценить литологические условия водосбора и вклад терригенного материала в состав современных отложений.

На территории Мурманской области насчитывается более 18 тыс. рек и более 105 тыс. озер [Кольская..., 2008; Даувальтер, Кашулин, 2014]. Большинство водоемов региона относятся к малым озерам с площадью зеркала менее 1 км^2 . Кроме того, основная масса озер расположены вне зон прямого антропогенного воздействия. К таким территориям относится северная часть Мурманской области, приуроченная к побережью Баренцева моря, включая полуострова Рыбачий и Средний. Ранее проведенные исследования показали, что в гидрохимическом и геохимическом отношении озера полуостровов Рыбачий и Средний в целом сохраняют фоновые характеристики, а влияние антропогенных факторов проявляется преимущественно за счет дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ [Slukovskii et al., 2024]. Вместе с тем в опубликованных работах основной акцент сделан на анализ редких и редкоземельных элементов

в отложениях озер и оценку антропогенного влияния на водоем. В этой связи актуальным является комплексное исследование геохимии озер полуостровов Рыбачий и Средний с привлечением различных методов для оценки влияния природных факторов на формирование современного облика осадков указанных водоемов.

В целом, несмотря на некоторые опубликованные работы, территория полуостровов Рыбачий и Средний является слабоисследованной с лимнологической точки зрения. При этом уникальные геологические условия региона, отличающиеся от геологических условий основной части Мурманской области [Атлас..., 1971], в совокупности с его рекреационной привлекательностью делают изучение озер и их компонентов на полуостровах Рыбачий и Средний актуальными.

Таким образом, цель работы заключается в том, чтобы оценить содержание главных элементов и органического материала в современных отложениях озер полуостровов Рыбачий и Средний, показать их связь с гранулометрическим составом осадков и основными природными (геологическими) факторами, влияющими на формирование озерных отложений.

Общая геологическая характеристика района исследования

Полуострова Средний и Рыбачий располагаются на северо-западе Мурманской области (рис. 1) и административно входят в состав Печенгского муниципального округа. Рельеф местности характеризуется платообразной структурой, резко обрывающейся к Баренцеву морю. Плато сложено преимущественно песчаниками, глинистыми сланцами, алевролитами и карбонатами. Наивысшая точка п-ова Рыбачий достигает высоты 300 м, в то время как максимальная высота п-ова Средний составляет 334 м. Полуостров Средний соединяет п-ов Рыбачий с материковой частью Кольского п-ова через хребет Мустатунтури [Атлас..., 1971].

Геологическая структура полуостровов Средний и Рыбачий является частью позднепротерозойского Тимано-Варангерского геосинклинального складчато-разрывного пояса, граничащего с Восточно-Европейской платформой. Осадочные отложения рифея на данной территории выделяются как самостоятельный структурный блок, обособленный от Мурманского блока пород архейского возраста сложной геометрией отражающих площадок. Кристаллический фундамент архейского базиса в пределах п-ова Средний погружается

на глубины до 8–12 км, а на территории п-ова Рыбачий – до 16–18 км [Симонов, 2002]. В исследуемом районе выделяются две структурно-формационные зоны: зона перикратонного опускания (п-ов Средний) и зона пассивной окраины (п-ов Рыбачий). Более плотные осадочные комплексы п-ова Рыбачий интерпретируются как аллохтонная пластина, надвинутая на менее плотные отложения п-ова Средний [Сорохтин и др., 2022].

Исследуемые на п-ове Рыбачий озера Скорбеевское, Крайнее и Лохи расположены в пределах скорбеевской свиты баргоутной серии рыбачинского комплекса пород. Мощность скорбеевской свиты достигает 500 м. Отложения представлены однородной ассоциацией терригенных пород флишоидного типа. Литологический состав пород включает преимущественно аркозовые алевро-песчаники, алевролиты и глинистые и сульфидно-углеродистые сланцы. Эти породы характеризуются преобладанием алевропелитовых фракций и выраженной ритмичностью турбидитного типа. В породах свиты широко развиты сульфидные

(до 10 см) и карбонатные (до 50 см) конкреции. В целом ассоциация пород п-ова Рыбачий демонстрирует относительно однородный ряд терригенных осадков — от псефитов до пелитов [Негруца и др., 1993].

Исследуемые на п-ове Средний озера Поропеллон и Карху находятся на поропеллонской свите кильдинской серии пород. В то время как озеро Питьево принадлежит к куяканской свите волоковой серии пород п-ова Средний. Общая мощность разреза данных серий достигает примерно 2 км. Стратиграфический комплекс кильдинской и волоковой серий преимущественно представлен аркозовыми, олигомиктовыми и кварцевыми псаммитами, а также алевролитами и аргиллитами, что указывает на осадконакопление в условиях слабокислых или нейтральных сред с высокой степенью дифференциации осадочного материала. Роль второстепенных компонентов в породах играют конгломераты и гравелиты, а также в основании куяканской свиты установлено присутствие линз переотложенных фосфоритовых слоев [Сорохтин и др., 2022].



Рис. 1. Картограмма расположения исследованных озер (автор М. А. Шестаков)

Fig. 1. Schematic map of the studied lakes (by M. A. Shestakov)

Все исследуемые водоемы на п-овах Рыбачий и Средний имеют ледниковое происхождение, обусловленное поздневалдайской ледниковой эпохой. Доказательством этого являются вытянутые или треугольные формы озерных котловин, а также присутствие в рельефе местности следов поздне- и послеледниковых трансгрессий [Атлас..., 1971]. Более детально влияние ледника на развитие рельефа на Кольском п-ове освещено в работах [Евзеров и др., 2007; Большианов и др., 2009; Евзеров, 2010].

Материалы и методы

Отбор проб донных отложений проводился в два этапа. В летний период 2020 года с применением пробоотборника системы Стогхейма отобраны стратифицированные пробы отложений с точек максимальных глубин озер Карху и Питьево [Slukovskii et al., 2024]. Во время полевых работ, осуществленных летом 2024 года, также с использованием пробоотборника Стогхейма отобраны донные отложения из наиболее глубоких частей озер Скорбеевское, Крайнее и Поропеллон. С озера Лохи с помощью дночерпателя Экмана-Берджа была получена нестратифицированная проба. Общие географические и морфометрические показатели исследуемых озер отражены в табл. 1.

Мощность полученных колонок донных отложений составляет от 25 до 35 см. После

извлечения колонки были разделены на слои по 5 см, затем каждая проба была помещена в отдельные маркированные грипперы Zip-Lock. Для хранения проб и их транспортировки использовалась сумка-холодильник, что обеспечивало сохранность образцов в течение всего периода работ. Просушивание образцов проб донных отложений до воздушно-сухого состояния проводилось в лабораторных условиях.

Лабораторные исследования осуществлялись на базе Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск). Гранулометрический анализ выполнялся с использованием анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter). Навески были усреднены методом квартования. Породообразующие элементы (оксиды Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) в донных отложениях определялись с применением рентгенофлуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific). Пробоподготовка включала в себя плавление образца и литиевого флюса в золото-платиновых тиглях с использованием электроплавильной печи Katanax K1 (SPEX Sample Prep). Погрешность измерения для всех изученных проб в среднем составляет (в %): от 0,6 до 1,19 для SiO_2 , 0,67–1,03 для Al_2O_3 , 0,31–0,51 для суммы окислов Fe, 0,04–0,30 для Na_2O , 0,15–0,23 для CaO, 0,17–0,25 для K_2O , 0,12–0,24 для MgO, 0,06–0,10 для TiO_2 и 0,009–0,06 для P_2O_5 .

Таблица 1. Общие географические и морфометрические показатели озер

Table 1. General geographical and morphometric indicators of the lakes

Название озера Name of the lake	Координаты Coordinates	S, км ² S, km ²	Глубина, м Depth, m		Мощность колонки, см Core length, cm	Полевое описание отложений Field description of sediments
			сред. med.	макс. max.		
Карху Karkhu	69.730280°, 31.736048°	0,06	1,8	2,8	25	мягкий ил от зеленовато-коричневого до светло-коричневого цвета soft mud ranging from greenish-brown to light brown in color
Питьево Pitevoe	69.769419°, 31.756518°	0,09	2,3	3,7	30	мягкий ил бурого-коричневого цвета с бактериальным матом в верхней части разреза soft brown mud with a bacterial mat in the upper part of the section
Поропеллон Poropellon	69.692267°, 31.843637°	0,12	0,66	0,8	30	отложения творожистой консистенции темно-серого цвета с растительными остатками dark gray, curd-like (gelatinous) sediments with plant remains
Скорбеевское Skorbееvskoe	69.885323°, 32.159350°	0,17	3,31	8,9	35	мягкий ил светло-коричневого цвета с большим количеством неразложившейся органики light brown soft mud with abundant undecomposed organic matter
Крайнее Krainee	69.934964°, 32.084000°	0,05	2,01	3,2	25	мягкий ил светло-коричневого цвета light brown soft mud
Лохи Lokhi	69.869485°, 32.121749°	0,18	3,06	13,1	—	алеврито-песчанистые отложения бурого цвета с небольшими Fe-конкрециями brown silty-sandy sediments with small Fe concretions

Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым методом после нагревания исследуемых образцов в муфельной печи до температуры 500 °С. Более подробная методика подготовки проб и описание методов лабораторных исследований представлены в работе Т. С. Шелеховой и др. [2020]. Для графического представления данных использовались программы MS Excel 2016, Inkscape 0.91, Matplotlib и QGIS.

Для классификации донных отложений по гранулометрическому составу использовалась классификация, предложенная Д. А. Субетто [2009], основанная на процентном соотношении размерных фракций. Следует отметить, что данная классификация применяется независимо от вещественного состава осадка и не учитывает органическую и/или минеральную составляющую. В связи с этим полученные типы отложений интерпретировались исключительно в гранулометрическом смысле, тогда как особенности вещественного состава осадков учитывались отдельно при обсуждении результатов и сопоставлении с геохимическими данными.

Для расчета геохимических индексов по содержанию порообразующих элементов применялись: индекс химического выветривания (CIA) $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO + K_2O)) * 100$; титановый модуль (ТМ) TiO_2 / Al_2O_3 ; гидролизатный модуль (ГМ) $(TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_{общ.} + MnO) / SiO_2$; железный модуль (ЖМ) $(Fe_{общ.} + MnO) / (TiO_2 / Al_2O_3)$; калиевый модуль (КМ) K_2O / Al_2O_3 . Точное использование и интерпретация данных показателей подробно описаны в работах Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [2011], Е. В. Скларова [2001].

Для выявления взаимосвязей между геохимическими индексами и определения сходства донных отложений с геологическими комплексами использовалась многомерная статистика с применением метода Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP). Это современный алгоритм нелинейного снижения размерности, сохраняющий локальные топологические отношения между объектами многомерного пространства [McInnes et al., 2018]. Для оценки степени «тяготения» озерных осадков к конкретным породам внутри свит использовалось евклидово расстояние между точками озер и точками пород в UMAP-пространстве, что позволяет количественно определить ближайшие литотипы [Legendre, Legendre, 2012]. Анализ проводился в среде программирования Python 3.10 в среде Google Colab с использованием следующих библиотек: pandas – для обработки и структурирования данных; umap-learn – для расчета двумерных проекций.

Результаты и обсуждение

Процессы эрозии материнских пород водосбора приводят к транспортировке силикатных минералов поверхностными водами в водоемы и их последующей аккумуляции в донных отложениях [Страховенко, 2011]. В результате Si и Al концентрируются в осадках и занимают ведущие позиции в их составе [Даувальтер, 2012]. Основную долю состава отложений исследуемых водных объектов занимает SiO_2 , варьируя от 41,8 до 59,5 % в осадках озер на п-ове Рыбачий и от 55,2 до 60,3 % – на п-ове Средний. В осадках оз. Лохи наблюдается повышенное, по сравнению с другими исследуемыми объектами, содержание Al_2O_3 (до 14,2 %). Высокое содержание глинозема может говорить о высоком содержании тонкодисперсных частиц и глинистых минералов [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989], что подтверждается гранулометрическим анализом (табл. 2). Содержание P_2O_5 , достигающее 0,6 % (рис. 2), может свидетельствовать о вымывании фосфатоносных осадочных пород [Негруца и др., 1993]. Низкое значение ППП (7,2 %) свидетельствует о преобладании минеральной составляющей в донных отложениях оз. Лохи, что позволяет отнести их к минеральному типу. Напротив, осадки озер Крайнее, Скорбеевское, Питьево, Поропеллон и Карху классифицируются как органо-силикатные (сапропели), где ППП составляет от 24,2 до 35,2 %, а SiO_2 – от 41,4 до 59,7 % (рис. 3), что отражает существенный вклад в осадкообразование органического материала [Слуковский и др., 2017; Шелехова и др., 2020].

В донных отложениях озер Скорбеевское, Крайнее, Карху и Питьево отмечается тенденция к увеличению содержания Al_2O_3 , K_2O и Na_2O (рис. 4) с глубиной отбора проб, что согласуется с ростом доли алевритовой фракции (0,05–0,005 мм). Подобная закономерность свойственна озерным осадкам и отражает усиление вклада глинистых минералов в более древних горизонтах разреза, а также процессы постседиментационной сортировки и раннего диагенеза осадка [Dean, 1999; Cohen, 2003].

В оз. Поропеллон выявлена обратная тенденция, что может свидетельствовать о накоплении органического вещества в нижних горизонтах разреза, сформированных в условиях более низкой гидродинамической активности и ограниченного поступления терригенного материала. Подобные профили ППП характерны для малых озер с устойчивыми условиями седиментации и слабой минерализацией притока [Meyers, 2003].

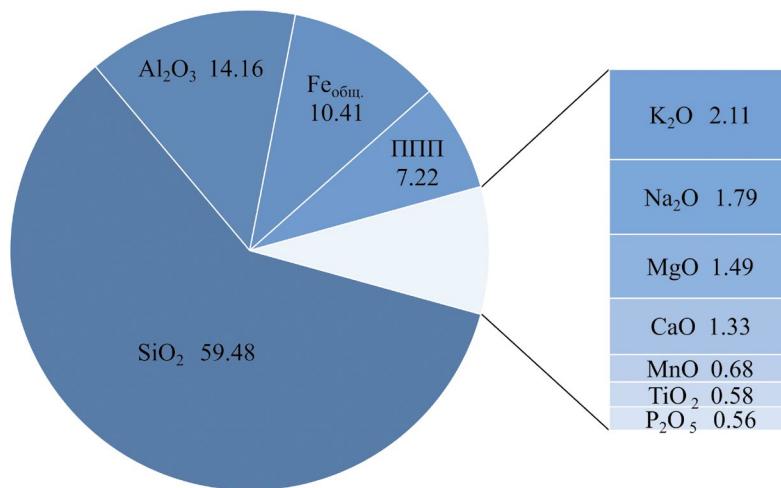


Рис. 2. Состав породообразующих (главных) элементов в осадках оз. Лохи, %

Fig. 2. Composition of the rock-forming (main) elements in the sediments of Lake Lokhi, %

В оз. Питьево отмечается локальный максимум ППП на глубине 15–20 см, что указывает на кратковременное изменение условий осадконакопления. Данный уровень, вероятно, отражает фазу повышенной биопродуктивности или

усиленного поступления органического вещества, что могло быть связано с локальными изменениями гидрологического режима озера. Аналогичные пики ППП в разрезах озерных отложений интерпретируются как маркеры кратковременных изменений трофического состояния и редокс-условий среды [Meyers, Ishiwatari, 1993; Dean, 1999]. Таким образом, вариации ППП и содержания главных оксидов по разрезам отражают сочетание дисперсного состояния осадка, изменений источников осадочного материала и динамики органического вещества, что подчеркивает сложный характер формирования донных отложений в малых озерах арктической зоны.

Геохимические вариации состава главных элементов образуют основу для интерпретации гранулометрических данных, являющихся важным индикатором генезиса, физических и химических свойств, а также геохимических и минеральных особенностей донных отложений [Håkanson, Jansson, 1983]. Анализ гранулометрических показателей (табл. 2) свидетельствует о значительном разнообразии гранулометрического состава озерных осадков на полуостровах Средний и Рыбачий. Доминирование песчаных фракций (0,25–0,5 и 0,1–0,25 мм) в большинстве изученных озер позволяет классифицировать отложения как преимущественно песчаные. В соответствии с классификацией смешанных пород Д. А. Субетто [2009] отложения озер Скорбеевское и Питьево можно отнести к алевритовым пескам, поскольку содержание псаммитовых частиц в этих пробах составляет примерно 63–64 %, а алевритовых – 32–35 %.

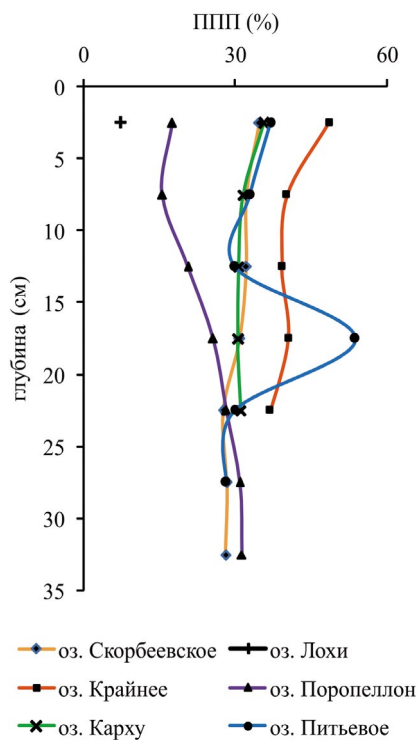


Рис. 3. Распределение количества ППП в донных отложениях озер, %

Fig. 3. Distribution of LOI content in the sediments of the lakes, %

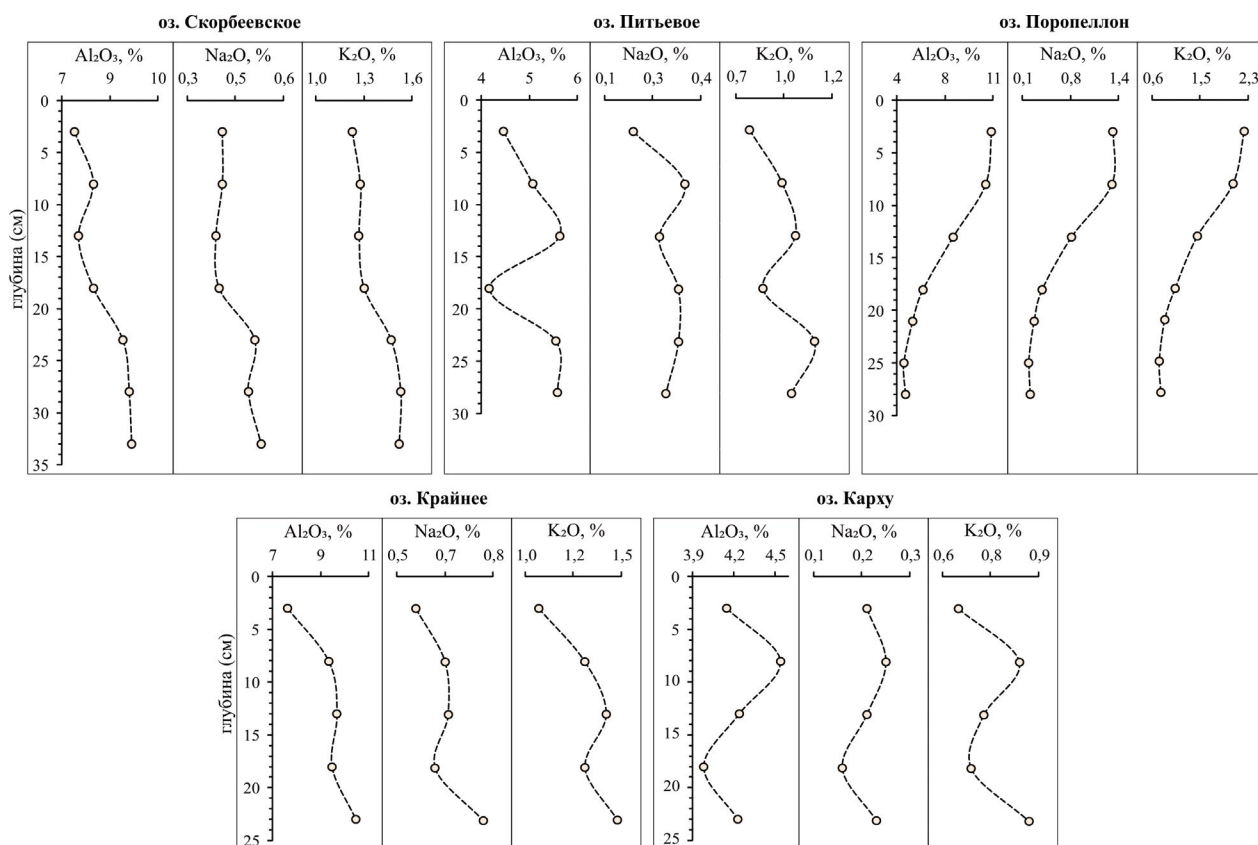


Рис. 4. Распределение содержания Al_2O_3 , K_2O и Na_2O в стратифицированных колонках донных отложений, %
 Fig. 4. Distribution of Al_2O_3 , K_2O and Na_2O in stratified sediment columns, %

В то же время осадки озер Крайнее, Поропеллон и Карху характеризуются высоким содержанием фракций размером от 2,00 до 0,05 мм, суммарная доля которых превышает 70 % общего объема материала, что свидетельствует о принадлежности к «чистым» пескам.

В отложениях оз. Лохи отмечается значительное преобладание алевритовых частиц (до 79 %) в диапазоне от 0,05 до 0,005 мм. Особенности гранулометрического состава отложений оз. Лохи, по сравнению с другими исследуемыми водоемами, вероятно, связаны с геоморфологическими характеристиками его котловины, включая сравнительно большую глубину и высокие крутые берега, что создает условия для интенсивного осаждения тонких частиц вблизи зоны аккумуляции.

Преобладание алевритовой фракции согласуется с геохимическими особенностями осадков. В горизонтах, обогащенных тонкодисперсным материалом, отмечается повышенное содержание Al_2O_3 (рис. 5). Относительно более низкие значения ППП, отмеченные для осадков оз. Лохи по сравнению с другими исследуемыми объектами (рис. 3), могут быть интерпрети-

рованы как результат разбавления органического вещества минеральной составляющей при интенсивном поступлении тонкого терригенного материала [Dean, 1999; Cohen, 2003].

Особенности химического состава донных отложений исследованных озер во многом определяются спецификой процессов береговой абразии, выветривания и переноса терригенного материала пород водосбора. Глинистые сланцы, гидрослюдистые пелиты и хлорит-серицитовые породы характеризуются высокой слоистостью и низкой прочностью, что способствует их интенсивному выветриванию в условиях холодного гумидного климата и формированию тонкодисперсного обломочного материала [Чикирев, Войтеховский, 2017]. В условиях северных регионов разрушение данных пород сопровождается преимущественно механическим распадом с сохранением первичных алюмосиликатных минералов, прежде всего хлорита, серицита и гидрослюды [Иванов, 2006; Даувальтер, 2012]. Транспортировка обломочного материала с водосборов озер полуостровов Рыбачий и Средний осуществляется главным образом за счет склонового

Таблица 2. Средний гранулометрический состав современных отложений в исследуемых озерах, %
 Table 2. Average granulometric composition of the surface sediments in the studied lakes, %

Название озера Name of the lake	Размер фракций, мм / Grain size, mm										Тип, наименование осадка [Субетто, 2009] Sediment type, name [Subetto, 2009]
	Псефиты Psephites	Псаммиты Psammites				Алевриты Aleurites (silt)		Пелиты Pelites	Σпсам Σpsam	Σал Σal	
	> 1 мм	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005	1–0,05	0,05–0,005	
Скорбеевское Skorbeevskoe	3	2	5	32	25	27	5	0,5	64	32	Песчаный, алевритовый песок Sandy, silty sand
Лохи Lokhi	–	–	–	8	11	50	29	1,4	19	79	Алевритовый, алеврит Silty, silt
Крайнее Krainee	–	2	12	39	18	24	4	0,4	71	28	Песчаный, песок Sandy, sand
Поропеллон Poropellon	1	3	12	36	19	23	5	0,5	70	28	«
Карху Karkhu	0,6	5	15	36	21	20	2	0,3	77	22	«
Питьевое Pitevoe	1	2	7	30	24	31	4	0,5	63	35	Песчаный, алевритовый песок Sandy, silty sand

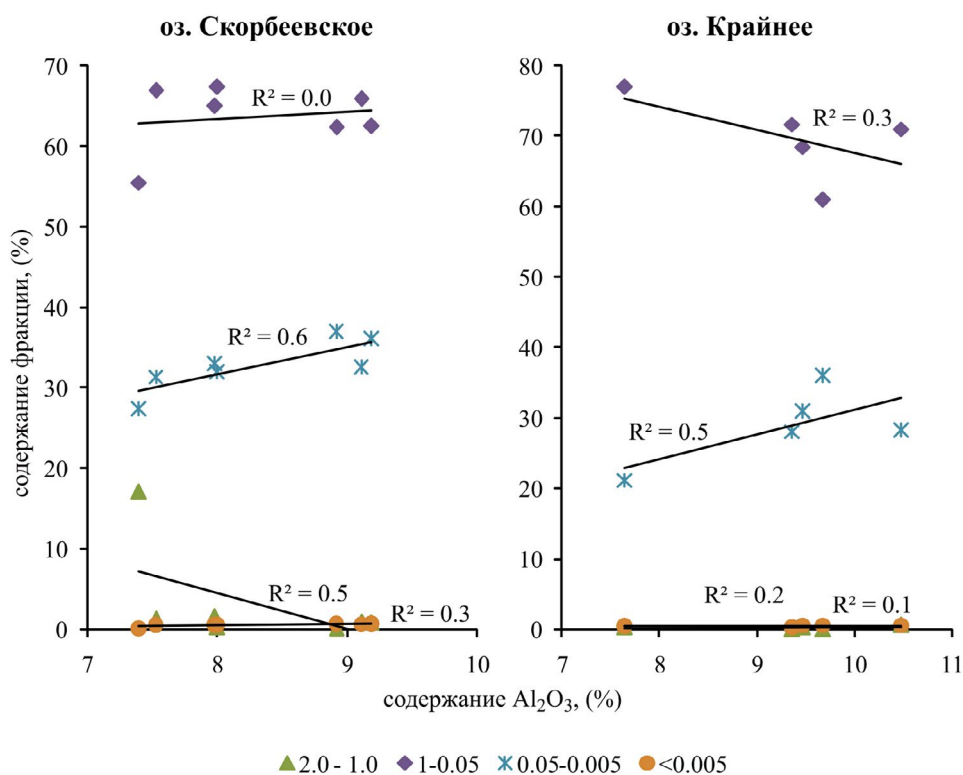


Рис. 5. Зависимость содержания Al₂O₃ от размера фракции в донных отложениях на примере озер Скорбеевское и Крайнее

Fig. 5. Dependence of Al₂O₃ content on the fraction size in sediments by the example of Lakes Skorbeevskoe and Krainee

смыва и временных водотоков, активизирующихся в периоды снеготаяния и интенсивных осадков. При этом короткие пути переноса и низкая скорость потоков способствуют слабой дифференциации материала и сохранению его геохимической специфики, что должно свидетельствовать о генетической близости донных отложений и пород водосборной площади [Юдович, Кетрис, 2011; Даувальтер, 2012].

Для комплексного понимания генезиса донных отложений был проведен расчет геохимических индексов (CIA, ТМ, ГМ, КМ, ЖМ) для донных отложений озер полуостровов Рыбачий

и Средний (рис. 6), а также литотипов пород скорбеевской, поропеллонской и куяканской свит, пород рыбачинского комплекса и гранитоидов основания кильдинской серии по данным Сорохтина с соавт. [2022] (табл. 3).

Значения индекса CIA > 70 у всех изученных водоемов указывают на формирование осадков в условиях холодного гумидного климата с устойчивыми процессами химического выветривания и постепенным повышением температур воздуха, что обосновывается увеличением соотношения алюминия и щелочных элементов в продуктах выветривания [Скляров и др., 2001].

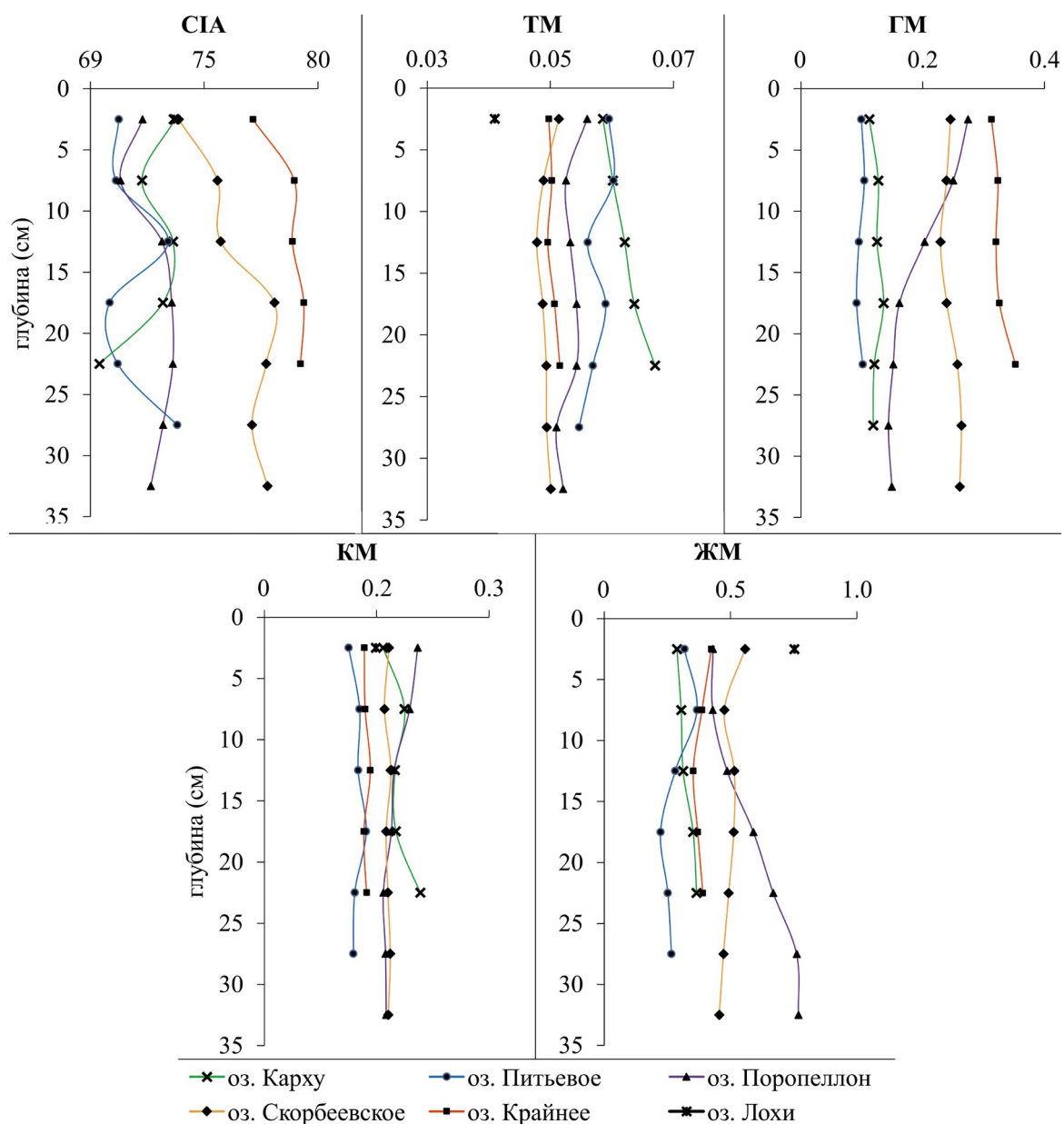


Рис. 6. Значения геохимических модулей в отложениях озер полуостровов Средний и Рыбачий
 Fig. 6. Values of geochemical modules in the sediments of the lakes of the Sredny and Rybачy Peninsulas

Таблица 3. Результаты расчета геохимических индексов в литотипах пород полуостровов Рыбачий и Средний
 Table 3. Results of calculation of geochemical indices in lithotypes of rocks of the Rybachy and Sredny Peninsulas

Литотипы пород Rock lithotypes	Геохимические индексы Geochemical indices				
	CIA	TM	ГМ HM	КМ PM	ЖМ IM
Литотипы пород скорбеевской свиты Lithotypes of the Skorbeevskaya Formation					
граувакковые (субграувакковые) песчаники graywacke (subgraywacke) sandstones	61,99	0,02	0,23	0,09	0,24
алевролиты siltstones	64,88	0,05	0,39	0,21	0,48
глинистые сланцы clay shales	73,18	0,04	0,45	0,18	0,48
сульфидно-углеродистые сланцы sulfide-carbonaceous shales	61,09	0,05	0,61	0,18	1,35
сульфидные конкреции sulfide concretions	58,64	0,06	1,25	0,18	8,59
кальцитовые конкреции calcite concretions	7,57	0,06	0,43	0,17	0,70
Литотипы пород поропеллонской свиты Lithotypes of the Poropellonskaya Formation					
аркозовые псаммиты arkosic psammites	69,81	0,09	0,13	0,16	0,52
алевролиты siltstones	68,28	0,07	0,33	0,35	0,55
пелиты pelites	77,45	0,06	0,39	0,19	0,43
Литотипы пород куйканской свиты Lithotypes of the Kuyakanskaya Formation					
аркозовые псаммиты с глинистым цементом arkosic psammites with clay cement	61,78	0,07	0,14	0,42	0,60
алевролиты с глинистым цементом siltstones with clay cement	68,76	0,07	0,29	0,30	0,46
пелиты pelites	71,06	0,06	0,34	0,26	0,34
фосфатоносные псефиты phosphatic psephites	30,53	0,06	0,11	0,42	0,82
фосфоритовые конкреции phosphorite concretions	15,18	0,06	0,45	0,28	0,59
Литотипы пород рыбачинского комплекса Lithotypes of the Rybachy Complex					
псефиты psephites	60,30	0,03	0,24	0,19	0,43
псаммиты psammites	60,67	0,03	0,23	0,15	0,31
карбонатсодержащие псаммиты и алевролиты carbonate-bearing psammites and siltstones	42,29	0,03	0,28	0,18	0,31
алевролиты siltstones	66,40	0,05	0,45	0,20	0,44
пелиты pelites	64,35	0,05	0,46	0,21	0,40
Гранитоиды основания кильдинской серии Granitoids of the basement of the Kildin Series					
неизмененные граниты unaltered granites	63,69	0,00	0,22	0,14	0,11
измененные граниты altered granites	62,29	0,00	0,20	0,16	0,12
перекрывающие осадочные породы overlying sedimentary rocks	62,93	0,02	0,07	0,49	0,90

Геохронологические данные, полученные в результате исследования А. Н. Толстобровой с соавт. [2024], проведенного в озере в районе хребта Мустатунтури, подтверждают постепенное потепление, что проявляется в увеличении видового разнообразия диатомовых водорослей вверх по разрезу начиная с границы на глубине 90 см (6800 ± 120 лет – наши дни). ТМ в диапазоне 0,05–0,06 также соответствует гумидному типу выветривания [Юдович, Кетрис, 2011], что согласуется с результатами по CIA. Показатели ГМ $\leq 0,43$ указывают на умеренную степень минеральной зрелости материала [Скляров и др., 2001]. Значения КМ 0,13–0,21 указывают на преобладание гидрослюд и хлоритов среди породообразующих минералов [Скляров и др., 2001]. По ЖМ большинство озерных осадков относится к нормально-железистым (0,20–0,60) [Юдович, Кетрис, 2001], тогда как в озерах Лохи и Поропеллон наблюдается повышенное содержание железа (до 0,77).

Результаты многомерного анализа UMAP показали (рис. 7, 8), что точки, соответствующие донным отложениям озер, группируются

вблизи полей определенных литотипов породных комплексов. Такое распределение отражает литогенную обусловленность химического состава осадков и позволяет проследить связь между современными донными отложениями и породами водосбора соответствующих свит. Использование UMAP в геологических исследованиях подтверждено в ряде публикаций, где метод применялся для выявления геохимических и минералогических паттернов в осадочных и магматических породах [McInnes et al., 2018; Becht et al., 2019].

В условиях слабо развитого химического выветривания, характерного для северных регионов, разрушение данных пород сопровождается преимущественно механическим распадом с сохранением первичных алюмосиликатных минералов, прежде всего гидрослюд, хлорита и серицита. Эти минералы отличаются высокой устойчивостью к выщелачиванию щелочных и щелочноземельных элементов и легко вовлекаются в миграцию в составе взвешенного и придонного материала, что обуславливает их накопление в донных отложениях озер [Иванов, 2006].

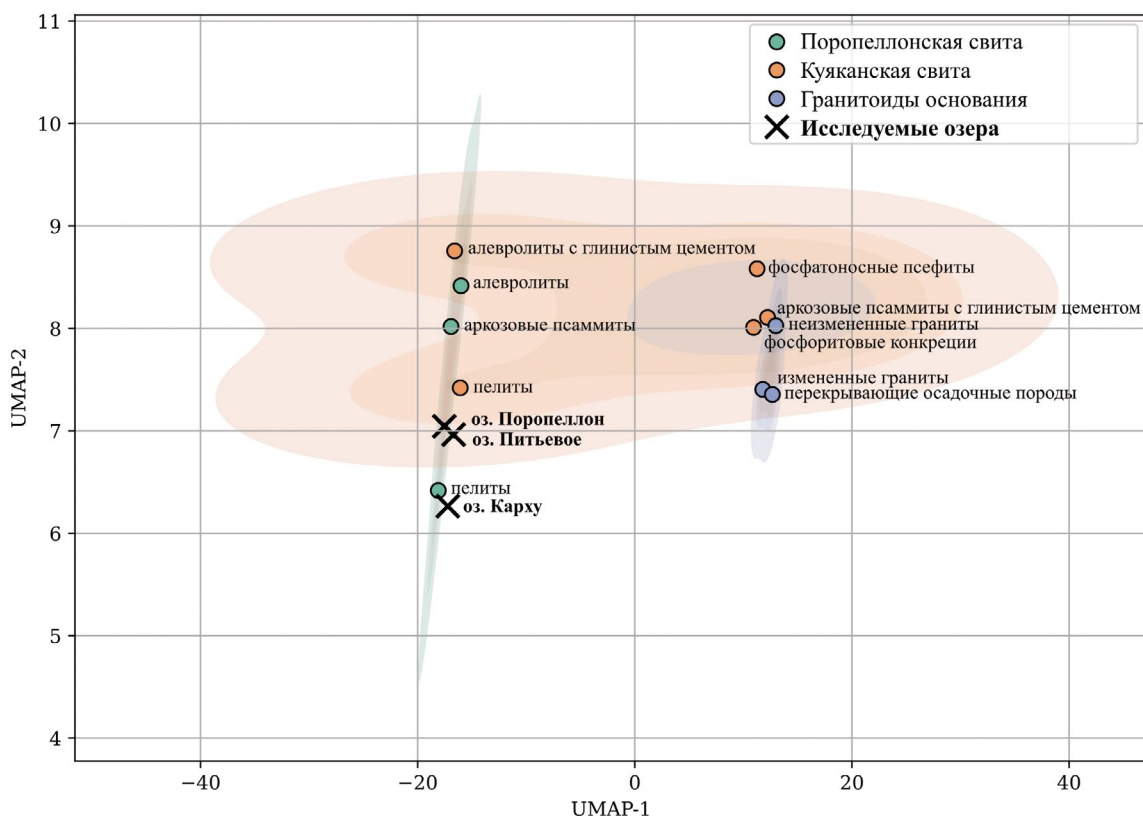


Рис. 7. UMAP-анализ геохимических индексов донных отложений и литотипов пород полуострова Средний

Fig. 7. UMAP-analysis of geochemical indices of the bottom sediments and lithotypes of rocks of the Sredny Peninsula

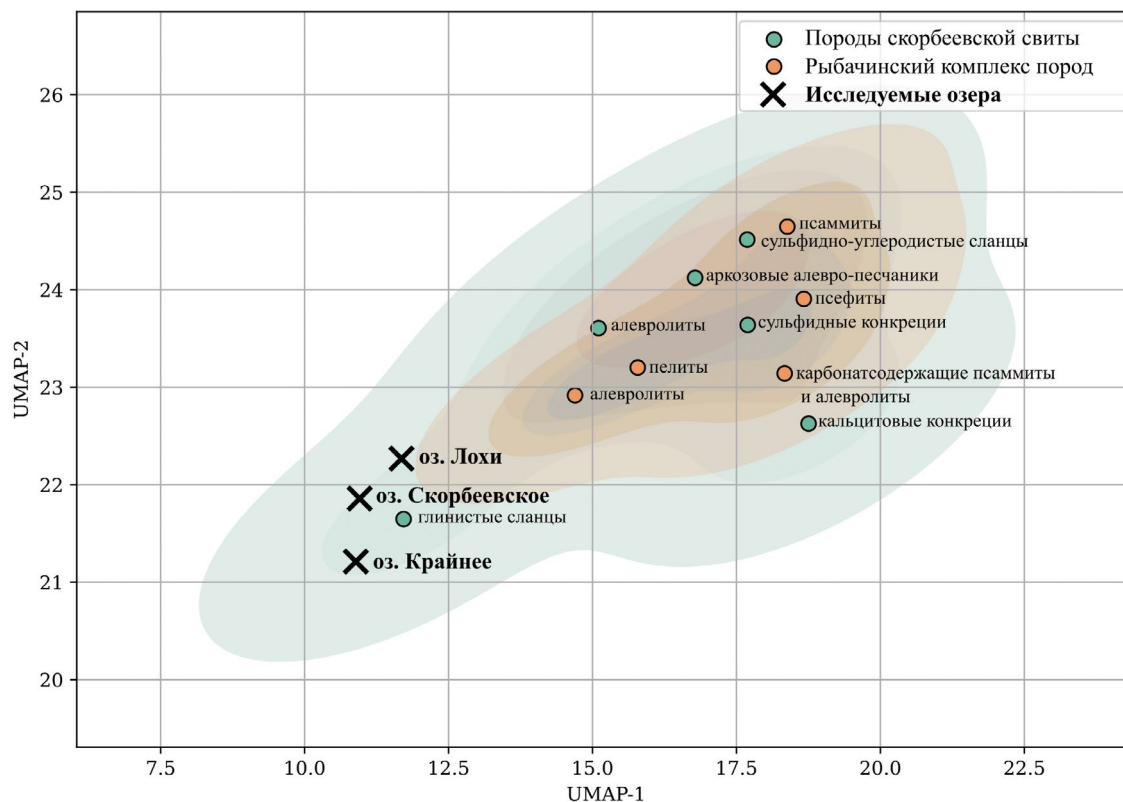


Рис. 8. UMAP-анализ геохимических индексов донных отложений и литотипов пород полуострова Рыбачий

Fig. 8. UMAP-analysis of geochemical indices of the bottom sediments and lithotypes of rocks of the Rybachy Peninsula

Осадки оз. Карху отчетливо тяготеют к пелитам поропеллонской свиты, представленным хлорит-серицитовыми сланцами с высоким содержанием кварц-полевошпатовых примесей. Отложения оз. Поропеллон занимают промежуточное положение между пелитами и аркозовыми псаммитами поропеллонской свиты. Такое положение обусловлено ярко выраженной ритмичностью флишоидного типа в разрезе свиты. При градационной слоистости озерные осадки способны унаследовать комбинированный геохимический облик. Донные отложения оз. Питьево близки по составу к пелитам куяканской свиты, где на 80–85 % преобладает хлорит-серицитовый агрегат (гидрослюдистые глины), а остальную часть породы занимает алевролит кварц-полевошпатового состава [Негруца и др., 1993]. Близкое расположение точек озер Питьево, Поропеллон и Карху на UMAP-графике отражает схожесть химического и минералогического состава пелитов поропеллонской и куяканской свит, влияющих на состав донных отложений. Осадки озер Скорбеевское, Крайнее и Лохи, принадлежащих к скорбеевской свите, группируются вблизи

поля глинистых сланцев, сложенных мусковит-хлоритовым агрегатом. При этом для оз. Лохи авторы предполагают смещение в сторону железосодержащих пород, что обуславливало бы повышенное содержание Fe (до 10,4 %) в донных отложениях. Подобным параметрам соответствуют пирит-марказитовые минерализации, выявленные в отдельных прослоях глинистых сланцев скорбеевской свиты [Негруца и др., 1993].

Заключение

Содержание главных элементов и особенности гранулометрического состава донных отложений шести малых озер на полуостровах Рыбачий и Средний являются результатом сложного взаимодействия множества процессов, включающих климатические, физические, геологические, биологические и прочие факторы. Выветривание и эрозия материнских пород водосбора регулируют поступление Si и Al в отложения, исходя из чего генезис осадков имеет преимущественно органо-силикатный характер, с преобладанием SiO_2 (41,4–59,7 %)

и вариативным количеством ППП (7,2–35,2 %). Наименьшие относительно других водоемов ППП отмечаются в оз. Лохи, в совокупности с показателями Al_2O_3 (до 14,2 %) и P_2O_5 (до 0,6 %) эти параметры свидетельствуют о преобладании минеральной составляющей в его осадках.

Преобладание псаммитовой фракции (1–0,05 мм) в донных отложениях исследуемых озер определяет общую песчаную по гранулометрическому составу направленность осадконакопления. В озерах Скорбеевское и Питьево отложения характеризуются как алевритовые пески (Σ псам = 63–64 %), в озерах Крайнее, Поропеллон и Карху – как «чистые» пески (Σ псам = 70–77 %). Увеличение доли алевритовой фракции (0,05–0,005 мм) в глубинных горизонтах объясняет вертикальные изменения химического состава: с глубиной увеличивается содержание Al_2O_3 , K_2O и Na_2O . Исключением является оз. Лохи, где алевритовая фракция преобладает (до 79 %), что объясняется глубинно-геоморфологическими условиями водоема.

Современный анализ подтверждает, что разрушение материнских пород и дальнейшее осадконакопление материала в водоемах происходило в условиях гумидного климата ($CIA > 70$) с постепенным увеличением температур. Геохимические индексы указывают на преимущественно нормально-железистый ($JM = 0,20–0,60$) состав донных отложений исследованных озер, а также подчеркивают значительную роль гидрослюдистых минералов и хлорита в формировании их минерально-химического состава ($KM = 0,13–0,21$). Исключением является оз. Лохи ($JM = 0,75$), где вероятно влияние на осадки мусковит-хлоритовой минерализации глинистых сланцев. Сопоставление с породами бассейна водосборной площади указывает на генетическую близость отложений озер п-ова Рыбачий к глинистым сланцам скорбеевской свиты, озер Поропеллон и Карху – к гидрослюдистым пелитам поропеллонской свиты и оз. Питьево – к хлорит-серицитам куканской свиты. Таким образом, выявленные зависимости отражают непрерывность миграции химических элементов между породами водосбора и донными осадками.

Литература

Атлас Мурманской области / Гл. ред. А. Г. Дуров и др. М.: ГУГК при СМ СССР, 1971. 33 с.

Большаинов Д. Ю., Макаров А. С., Морозова Е. А., Павлов М. В., Саватюгин Л. М. Развитие природной среды полярных областей Земли

последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1. С. 108–115.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: монография. В 3 ч. Ч. 3. Донные отложения водоемов. Мурманск: МГТУ, 2014. 214 с.

Евзеров В. Я. Реконструкция поверхности поздневалдайского ледникового покрова в области Хибинских и Ловозерских гор на Кольском полуострове // ДАН. 2010. № 430(2). С. 254–256.

Евзеров В. Я., Меллер Я. Й., Колька В. В., Корнер Д. Д. История дегляциации полуостровов Рыбачьего и Среднего (Кольский полуостров) в позднем плейстоцене // Известия РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 58–63.

Иванов Г. И. Геоэкология Западно-Арктического шельфа России: литолого-экогеохимические аспекты. СПб.: Наука, 2006. 302 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. М. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Кольская энциклопедия. В 5 т. Т. 1. А–Д / Гл. ред. А. А. Киселев. СПб.-Апатиты: ИС, КНЦ РАН, 2008. 600 с.

Негруца В. З., Басалаев А. А., Чикирев И. В. Баренцевоморский фосфоритовый бассейн. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. 119 с.

Симонов А. П., Губерман Д. М., Яковлев Ю. Н., Снетко П. П., Берзин Р. Г., Сулейманов А. К., Андрищенко Ю. Н., Заможная Н. Г. Полуостров Рыбачий (Баренцево море): новые данные о тектонике и перспективах нефтегазоносности рифейских отложений прибрежной зоны Кольского полуострова // ДАН. 2002. № 384(6). С. 795–801.

Склярков Е. В., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Иванов А. В., Летникова Е. Ф., Миронов А. Г., Бараш И. Г., Буланов В. А., Сизых А. И. Интерпретация геохимических данных: учебное пособие. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Слуковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Глазнев В. Н., Куликов Н. В., Чикирев И. В., Мартынов Е. В., Марчук Т. С. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность. Апатиты: КНЦ РАН, 2022. 853 с. doi: 10.37614/978.591137.469.3

Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2011. 307 с.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

Толстоброва А. Н. Характеристика условий среды при накоплении донных отложений озера в районе хребта Мустатунтури (Кольский регион) // Limnology

and Freshwater Biology. 2024. No. 4. С. 779–784. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

Чикирев И. В., Войтеховский Ю. Л. Россыпная Ti-Zr минерализация в неопротерозойских (верхне-рифейских) породах кильдинской серии и современных пляжевых отложениях п-овов Средний и Рыбачий, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2017. № 1(1). С. 140–150. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-140-150

Шелехова Т. С., Слукровский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.

Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ: учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

Becht E., McInnes L., Healy J., Dutertre C.-A., Kwok I., Ng L., Ginhoux F., Newell E. Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP // Nat. Biotechnol. 2019. Vol. 37. P. 38–44. doi: 10.1038/nbt.4314

Cohen A. S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. Oxford: Oxford University Press, 2003. 528 p.

Dean W. E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments // J. Paleolimnol. 1999. Vol. 21. P. 375–393. doi: 10.1023/A:1008066118210

Dearing J. A. Lake sediment records of erosional processes // Hydrobiologia. 1991. Vol. 214. P. 99–106. doi: 10.1007/BF00050938

Fralick P. W., Kronberg B. I. Geochemical discrimination of elastic sedimentary rock sources // Sediment. Geol. 1997. Vol. 113. P. 111–124. doi: 10.1016/S0037-0738(97)00049-3

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. London: Springer-Verlag, 1983. 309 p.

Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. 419 p.

McInnes L., Healy O., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1802.03426

Meyers P. A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions // J. Paleolimnol. 2003. Vol. 29. P. 1–25. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00168-7

Meyers P. A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments // Organic Geochemistry. 1993. Vol. 20. P. 867–900. doi: 10.1016/0146-6380(93)90100-P

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtseva L. Pristine tundra lakes in the north of Murmansk Region (Arctic): geochemistry of sediments, pollution assessment and heavy metal forms // Int. J. Environ. Res. 2024. Vol. 18. Art. 57. doi: 10.1007/s41742-024-00612-7

References

Becht E., McInnes L., Healy J., Dutertre C.-A., Kwok I., Ng L., Ginhoux F., Newell E. Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP. *Nat. Biotechnol.* 2019;37:38–44. doi: 10.1038/nbt.4314

Bol'shiyanov D. Yu., Makarov A. S., Morozova E. A., Pavlov M. V., Savatyugin L. M. Development of the natural environment of the polar regions of the Earth in the last millennium based on lake sediment studies. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic.* 2009;1:108–115. (In Russ.)

Chikirev I. V., Voitekhovskii Yu. L. Placer Ti-Zr mineralization in the Neoproterozoic (Upper Riphean) rocks of the Kilda series and modern beach deposits of the Sredny and Rybachy Peninsulas, Kola region. *Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU.* 2017;1(1):140–150. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-140-150

Cohen A. S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. Oxford: Oxford Univ. Press; 2003. 528 p.

Dauval'ter V. A. Geocology of lake bottom sediments. Murmansk: MGTU; 2012. 242 p. (In Russ.)

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Geocology of lakes of the Murmansk Region: a monograph. In 3 parts. Part 3. Bottom sediments of water bodies. Murmansk: MGTU; 2014. 214 p. (In Russ.)

Dean W. E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. *J. Paleolimnol.* 1999;21: 375–393. doi: 10.1023/A:1008066118210

Dearing J. A. Lake sediment records of erosional processes. *Hydrobiologia.* 1991;214:99–106. doi: 10.1007/BF00050938

Durov A. G. et al. (eds.). Atlas of the Murmansk Region. Moscow: GUGK SM SSSR; 1971. 33 p. (In Russ.)

Edelstein K. K. Hydrology of lakes and reservoirs: a university textbook. Moscow: Pero; 2014. 399 p. (In Russ.)

Evzerov V. Ya. Reconstruction of the Late Valdai ice-sheet surface in the area of the Khibiny and Lovozero mountains, Kola Peninsula. *Doklady Earth Sciences.* 2010;430(2): 254–256. (In Russ.)

Evzerov V. Ya., Möller J. Y., Kol'ka V. V., Corner D. D. Deglaciation history of the Rybachy and Sredny Peninsulas (Kola Peninsula) in the Late Pleistocene. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series.* 2007;5: 58–63. (In Russ.)

Fralick P. W., Kronberg B. I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. *Sedimentary Geology.* 1997;113:111–124. doi: 10.1016/S0037-0738(97)00049-3

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. London: Springer-Verlag; 1983. 309 p.

Ivanov G. I. Geocology of the Western Arctic shelf of Russia: lithological and ecological-geochemical aspects. St. Petersburg: Nauka; 2006. 302 p. (In Russ.)

Kabata-Pendias A., Pendias H. Micronutrients in soils and plants. Moscow: Mir; 1989. 439 p. (In Russ.)

Kiselev A. A. (ed.). Kola encyclopedia. Vol. 1. St. Petersburg-Apatity: IS, KSC RAS; 2008. 600 p. (In Russ.)

Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier; 2012. 419 p.

McInnes L., Healy O., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1802.03426

Meyers P. A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions. *J. Paleolimnol.* 2003;29:1–25. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00168-7

Meyers P. A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 1993;20:867–900. doi: 10.1016/0146-6380(93)90100-P

Negrutsa V. Z., Basalaev A. A., Chikirev I. V. Barents Sea phosphorite basin. Apatity: KSC RAS; 1993. 119 p. (In Russ.)

Shelekhova T. S., Slukovskii Z. I., Lavrova N. B. Methods of studying bottom sediments of lakes of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 111 p. (In Russ.)

Simonov A. P., Guberman D. M., Yakovlev Yu. N., Snetko P. P., Berzin R. G., Suleimanov A. K., Andryushchenko Yu. N., Zamozhnyaya N. G. The Rybachy Peninsula (Barents Sea): new data on tectonics and prospects for oil and gas potential of Riphean sediments in the coastal zone of the Kola Peninsula. *Doklady Earth Sciences.* 2002;384(6):795–801. (In Russ.)

Sklyarov E. V., Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Ivanov A. V., Letnikova E. F., Mironov A. G., Barash I. G., Bulanov V. A., Sizykh A. I. Interpretation of geochemical data: a study guide. Moscow: Internet Engineering; 2001. 288 p. (In Russ.)

Slukovskii Z. I., Ilmast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small Lake Lamba under technogenic impact. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN =*

Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2017;10:45–63. (In Russ.). doi: 10.17076/lim618

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtseva L. Pristine tundra lakes in the north of Murmansk Region (Arctic): geochemistry of sediments, pollution assessment and heavy metal forms. *Int. J. Environ. Res.* 2024;18:57. doi: 10.1007/s41742-024-00612-7

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Kulikov N. V., Chikirev I. V., Martynov E. V., Marchuk T. S. Archean and Neoproterozoic of the Rybachy and Sredny Peninsulas (Baltic Shield): geology, geodynamics, petroleum potential and diamond potential. Apatity: KSC RAS; 2022. 853 p. (In Russ.). doi: 10.37614/978.591137.469.3

Strakhovenko V. D. Geochemistry of bottom sediments of small continental lakes of Siberia: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Novosibirsk; 2011. 307 p. (In Russ.)

Subetto D. A. Lake bottom sediments: palaeolimnological reconstructions. St. Petersburg: Herzen Univ. Press; 2009. 343 p. (In Russ.)

Tolstobrova A. N. Environmental conditions of sediment accumulation in a lake near the Mustatunturi Ridge (Kola Region). *Limnology and Freshwater Biology.* 2024;4:779–784. (In Russ.). doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar: Geoprint; 2011. 742 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.11.2025; принята к публикации / accepted: 26.02.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Адамская Полина Николаевна

инженер ИППЭС КНЦ РАН; студентка МАУ

e-mail: polina.adamskaya@bk.ru

Слуковский Захар Иванович

канд. биол. наук, заведующий лабораторией

e-mail: slukovsky87@gmail.com

Даувальтер Владимир Андреевич

д-р геогр. наук, главный научный сотрудник

e-mail: vladimir.dauvalter@mail.ru

Чикирев Игорь Владимирович

канд. геол.-мин. наук, заведующий кафедрой

e-mail: geo@arctivsu.ru

CONTRIBUTORS:

Adamskaia, Polina

Engineer, INEP KSC RAS; Student, Murmansk Arctic University

Slukovskii, Zakhar

Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory

Dauvalter, Vladimir

Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher

Chikirev, Igor

Cand. Sci. (Geol.), Head of Department