



ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОГО СЛОЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НИЖНЕГО ПРИОБЬЯ

✉ Торгунакова Е.А.¹, Кузякин Л.П.¹, Макшаев Р.Р.¹, Кречетов П.П.¹, Юров Ф.Д.¹,
Маслаков А.А.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ ekaterinator09@gmail.com

В работе представлена литолого-геохимическая характеристика активного слоя многолетнемерзлых отложений Нижнего Приобья. Для изученного активного слоя характерно преобладание суглинистых отложений, в которых доминируют фракции крупной и мелкой пыли. Процессы криогенного выветривания, вероятно, являлись, определяющими в дифференциации преобладающего типа пылеватой фракций. Применение геохимических коэффициентов - Rb/Sr и Fe/Mn показало их применимость для оценки процессов выветривания и окислительно-восстановительных условий в слое оттаивания и переходного слоя в мерзлых породах изученного участка.

Ключевые слова: вечная мерзлота, активный слой, геохимия, литология, рентгено-флуоресцентный анализ, изменение климата, Нижнее Приобье

Введение. Многолетнемерзлые отложения являются важным природным архивом, в котором сосредоточена уникальная запись палеоклиматических изменений позднеплейстоцен-голоценового времени. Современное потепление в высоких широтах происходит в 2 раза быстрее, чем в целом по миру [Rossi et al, 2022]. Первым на климатические изменения реагирует подстилаемый многолетнемерзлыми породами активный слой, который подвергается ежегодному протаиванию и промерзанию [Втюрина, 1974]. Кровля многолетней мерзлоты из-за ограниченной подвижности воды является геохимическим барьером, и большая часть геохимических процессов происходит в активном слое [Алексеев, 2009]. При интенсивном оттаивании происходит избыточное накопление воды и формирование верховодки, что может привести к заболачиванию, повышенному стоку и, как следствие, перераспределению геохимических элементов [Iwahana et al, 2014]. Рост температуры воздуха и пород активизирует опасные криогенные процессы: развиваются термократовые явления, ускоряется солифлюкция, активизируется эрозия, а также происходит увеличение выделения метана и углекислого газа в атмосферу [Гребенец и др., 2023]. Таким образом, в активном слое происходят криогенные, педогенные, геохимические и литологические преобразования пород. Исследование литолого-геохимической составляющей активного слоя является важной частью в понимании процессов состояния многолетних мерзлых отложений в условиях современных климатических изменений. Цель исследования дать литолого-геохимическую характеристику активного слоя многолетнемерзлых отложений Нижнего Приобья и на основании геохимических коэффициентов выполнить оценку интенсивности физического выветривания и окислительно-восстановительных условий их формирования.

Район исследования. Исследование проводилось в пределах Обь-Полуйского междуречья расположенного в 95 км к юго-востоку от г. Салехард (рис. 1). Территория характеризуется равнинным рельефом с максимальными отметками 135 м над уровнем моря. Объектом исследования являлись отложения в пределах III террасы р. Оби. Криогенные условия характеризуются массивно-островным распространением многолетнемерзлых пород мощностью до 300 м и температурой -1 – -3 °С. Основным рельефообразующими процессами являются термократ и криогенное пучение. По климатическим характеристикам район относится к атлантико-арктической области умеренного климатического пояса. Среднегодовая температура составляет -6°С, со

средней температурой января $-20 - -25^{\circ}\text{C}$, июля $+15^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков превышает 400 мм. Почвенный покров представлен преимущественно тундровыми элювиально-глеевыми почвами, в долине р. Полуй развиты аллювиальные дерновые и луговые кислые и слабокислые почвы [Атлас ..., 2004]. Растительный покров территории представлен лиственничными лишайниковыми редколесьями с участками кустарниковых тундр. В кустарниковом ярусе преобладают ива красивая (*Salix pulchra*) и карликовая береза (*Betula nana*).

Материалы и методы. Полевые исследования проводились 15 июля 2025 г. и включали в себя проведение буровых работ, литологическое и криолитологическое описание керна и отбор образцов для проведения лабораторных исследований. Из керна скважины 25Lb-7 мощностью 185 см было отобрано 37 образцов (каждые 5 см) массой ~ 50 г. Кровля мерзлых отложений на дату проведения бурения располагалась на глубине 130 см.

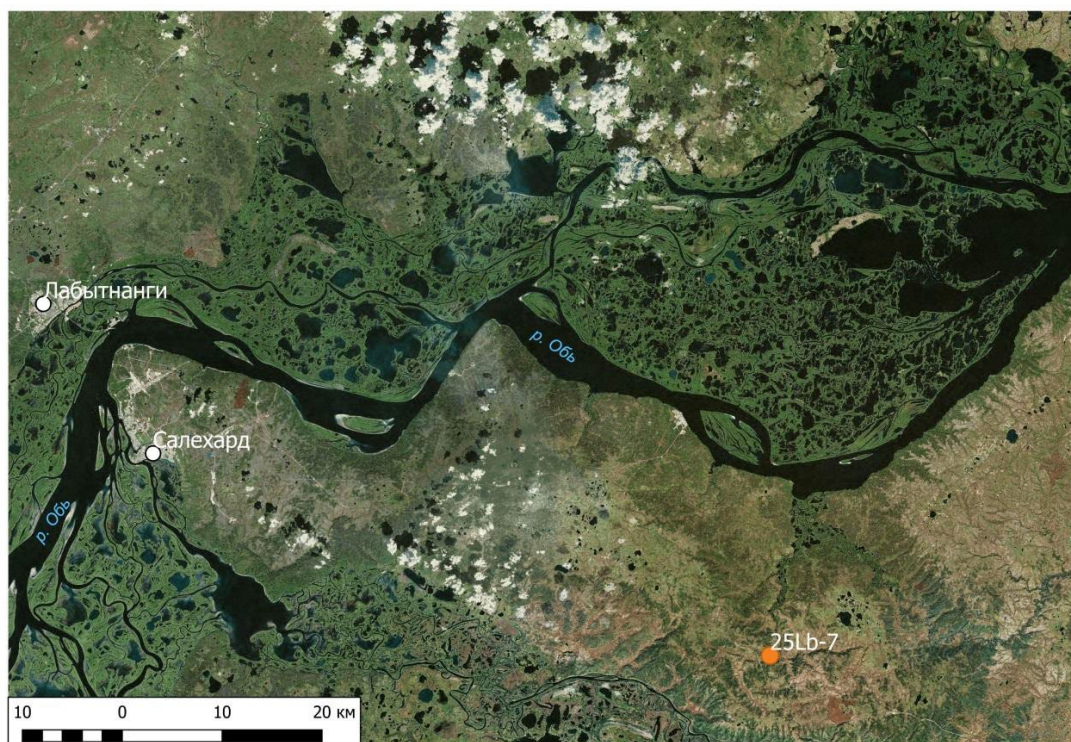


Рис. 1. Космический снимок района исследований, оранжевой точкой обозначено расположение скважины 25Lb-7. Снимок Bing Satellite.

Элементный состав пород определялся с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (EDXRF). Перед проведением исследования, каждый образец (~ 15 г.) высушивался в сушильном шкафу при температуре 50°C в течении 6 часов. Затем образцы измельчались в фарфоровой ступке до состояния пудры (250 мкм). Количественное определение элементов (Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, P, Cu, Ni, Rb, Sr) проводилось портативным EDXRF анализатором Olympus Delta (Innov-X) в режиме “Геохимия”. Оценка процессов выветривания выполнена на основе геохимического коэффициента Rb/Sr (более высокое отношение Rb/Sr указывает на преобладание физического выветривания (Nesbitt et al., 1980). Для верификации окислительно-восстановительных условий использовали отношение Fe/Mn (Barker et al., 2023). Увеличение соотношения Fe/Mn может свидетельствовать о возникновении анаэробных условий после формирования осадка [Boyle, 2001, Barker et al., 2023].

Гранулометрический анализ пород проведен с помощью лазерного анализатора частиц Fritsch Analysette 22, с диапазоном измерения фракций от 0,8 до 2000 мкм. Все

образцы (10–15 г) были высушены при температуре 50°C в течение 6 часов. Перед анализом пробы диспергировали механически растирая их резиновым пестиком в фарфоровой чашке в 4%-й растворе пирогената натрия. Гранулометрическая характеристика пород выполнена на основе классификации Н.А. Качинского [1965].

Определение влажности пород выполнено гравиметрическим методом. Влажные образцы (массой ~25 г.) взвешивались и высушивались в течении 24 часов в сушильном шкафу при температуре 105°C. Высушенный образец взвешивали и рассчитывали влажность в % на абсолютно сухую почву.

Потеря при прокаливании (ППП). Содержание органического вещества и карбонатов в породах определяли методом потери массы при прокаливании (ППП) при температурных режимах (550 °C и 950 °C) по методике Heiry et al. (2001). Величины потери при прокаливании выполнялись на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв с использованием муфельной печи Nabertherm. Для этого образцы (~5 г.), высушенные при температуре 105°C, помещались в муфельную печь при температуре 550 °C на 6 часов, по истечении этого времени образцы помещались в эксикатор, затем взвешивались и после возвращались обратно на 6 часов при температуре 950 °C. Полученные величины PPP 550°C отражают содержание органического вещества в отложениях. Разница PPP 950 °C – PPP 550 °C показывает содержание карбонатов.

Результаты. В исследованном керне на основе комплексного литологического и геохимического анализов выделено 9 слоев (рис. 2). В литологическом строении преобладают суглинки, также выделяются небольшие по мощности слои представленные супесями. До глубины 130 см слои находятся в талом состоянии. Слои, залегающие в интервале 130-160 см имеют тонкошлировую (до 1мм) криотекстуру. На глубинах 160-185 см представлена среднешлировая (5 мм) криотекстура.

Гранулометрический состав.

Слой 1. Оторфованный суглинок серо-коричневого цвета, талый, с включением корней современных растений. Преобладают фракции крупной (ср. 57%) и тонкой пыли (19,3%). Мощность слоя составляет 10 см.

Слой 2. Суглинок, серо-коричневый, с прослоями ожелезнения и корнями современных растений, талый. Преобладают фракции крупной (ср. 56,9%) и мелкой пыли (19,3%). На долю фракции мелкого песка приходится ср. 8,5%. Мощность слоя составляет 50 см.

Слой 3. Легкий суглинок, светло-коричневый, со следами ожелезнения, талый. По сравнению с вышележащими слоями характеризуется пониженным содержанием фракции мелкого песка (ср. 5,5%) и несколько повышенной долей крупной (ср. 57,9%) и мелкой пыли (ср. 19,9%). Мощность слоя составляет 35 см

Слой 4. Пылеватый суглинок, светло-коричневого цвета, со следами ожелезнения, талый. Преобладают фракции крупной (54,3%) и мелкой пыли (17,1%), увеличивается доля фракции среднего (7,1%) и мелкого (6,5%) песка. Мощность слоя 5 см.

Слой 5. По литологии аналогичен слою 3. Преобладает фракция крупной пыли (ср. 56,9%). Максимальная доля мелкого песка (11,9%) наблюдается в центральной части слоя, а фракции мелкой пыли (21,8%) – в верхней. Мощность слоя 30 см

Слой 6. По литологии аналогичен слою 2, но отличается мерзлым состоянием, проявляющимся в наличии тонкошлировой кротекстуры («переходный слой»). Шлиры имеют размер до 1мм, расстояние между ними 1-5 мм. Для слоя характерно преобладание фракции крупной пыли (ср. 56,3%). Для слоя характерна несколько повышенная доля фракции мелкого песка (ср. 13,6%). Мощность составляет 10 см.

Слой 7. Супесь со следами оглеения и ожелезнения, с тонкошлировой криотекстурой («переходный слой»). Шлиры размером до 1 мм, расстояние между которыми 2-10 мм. Преобладают фракции крупной (54,3%) и мелкой (17,1%) пыли. Также в данном слое представлены фракции крупного (3,9%), среднего (1,8%) и мелкого песка (ср. 15%). Мощность слоя 20 см

Слой 8. По литологии аналогичен слою 6, характеризуется среднешлировой криотекстурой (размер шлиров до 5 мм, расстояние между ними 10-15 мм) («переходный слой»). По сравнению со слоем 6 характеризуется повышенным содержанием фракции мелкого песка (ср. 16,6%). Преобладает фракция крупной пыли (55%). Мощность слоя составляет 10 см.

Слой 9. Легкий суглинок, серый со следами ожелезнения, среднешлировая криотекстура, размер шлиров до 5 мм, расстояние между ними 10-15 мм («переходный слой»). Для слоя характерно пониженное содержание фракции мелкого песка (ср. 3,2%) и повышенное – илистых частиц (ср. 8,5%). Преобладает фракция крупной пыли (ср. 53,3%).

Таким образом, во всех представленных 37 образцах преобладает фракция крупной пыли (более 50%).

Влажность. Влажность в исследованной толще отложений варьирует в диапазоне от 20,32 до 47,13%, среднее значение 29,63% и представляет собой льдистый «переходный слой». Минимальные величины влажности характерны для слоя 7, сложенного супесчаными отложениями. Максимальные значения влажности характерны для верхней части профиля, представленной суглинками и оторфованными суглинками. В центральной части отложений влажность слабо дифференцирована и изменяется в пределах от 31 до 26% (рис. 2)

Содержание органического вещества и карбонатов. Оценка количества органического вещества по ППП 550°C варьирует от 1,58 до 6,18%, при среднем значении 3,13%. Прослеживается уменьшение его концентрации с глубиной, с нехарактерным возрастанием содержания органического вещества в слое 6. Минимальные значения характерны для слоя 8, сложенного суглинками (рис. 2). Определение карбонатов по разности ППП 950°C-ППП 550°C показало, что в среднем составляет их количество составило 1,03% и изменяется от 0,72 до 1,27%. Распределение карбонатов по профилю относительно равномерное с тенденцией к уменьшению с глубиной. Максимальные значения характерны для слоя 2, представленного суглинками, минимальные – для слоя 7. Прослеживается незначительное увеличение содержания карбонатов в нижней части разреза, сложенного легким суглинком (рис. 2). Выявленные различия в слоях по содержанию органического вещества и карбонатов по ППП требуют дальнейшей верификации методами прямого определения данных компонентов в породах.

Элементный состав. Распределение в профиле магния (Mg), алюминия (Al), кремния (Si) и кальция (Ca) выявило высокую корреляцию между элементами. Содержание Mg во всех образцах изменяется от 2,13 до 7,2 %, со средним значением 3,4%. Содержание Al в среднем по профилю составляет 4,9% и варьирует от 3,05 до 12,2%. Содержание Si изменяется в диапазоне от 12,14 до 63,87%, в среднем – 21,03%. Содержание Ca в среднем составляет 0,4%, максимальное значение – 2,47%, минимальное – 0,21%. Максимальные концентрации элементов Mg, Al, Si, Ca приурочены к слою 4, представленного пылеватым суглинком, и нижней части профиля (слои 8 и 9). Минимальные содержания Mg, Al и Si отмечаются в центральной части отложений, представленной легким суглинком (слой 3 для Mg, слой 5 для Al и Si), а минимум содержания Ca наблюдается в верхней части профиля в пределах слоя 2, (рис. 2).

Четко выражена корреляция между Ti и Zn, особенно в нижней части профиля. Содержание Ti варьирует в диапазоне от 0,2 до 0,6%, в среднем – 0,38%. Содержание Zn в среднем составляет 0,003%. Максимальные значения тяготеют к слою 8, представленного серо-коричневым суглинком, минимальные – к слоям 4 и 5, состоящих из пылеватого и легкого суглинков.

Видна взаимосвязь между содержанием Fe, Rb, Sr. Максимальные значения элементов тяготеют к серо-коричневым суглинкам в слое 8, минимальное – к отложениям легко-суглинистого состава в пределах слоя 5 (рис. 2).

P, Cu характеризуются произвольным распределением по профилю. Так, значимые количества P наблюдается только в 1-3 и 9 слоях, причем максимум приходится на 1 слой,

представленный оторфованным суглинком, что может быть связано с его биогенным накоплением в поверхностном горизонте. Содержание Си был ниже предела обнаружения в слоях 1, 4 и 6.

Распределение Rb/Sr по профилю позволяет проследить определенную закономерность, тяготеющую к фракциям средней ($r=0,61$) и мелкой ($r=0,62$) пыли. В свою очередь отрицательная корреляция характерна для фракции мелких песков ($r=-0,65$). Наименьшие величины Rb/Sr выявлены в нижних слоях (7 и 8), максимальные значения характерны для слоев 1 и 9.

Коэффициент Fe/Mn показывает увеличение до 70 в средней части слоя 2. После этого с глубины 55 см это соотношение распределяется с глубиной достаточно равномерно-изменяясь в пределах 20-30 вплоть до глубины 130 см. В нижней части (слои 6-9) вновь происходит повышение Fe/Mn до 70-80.

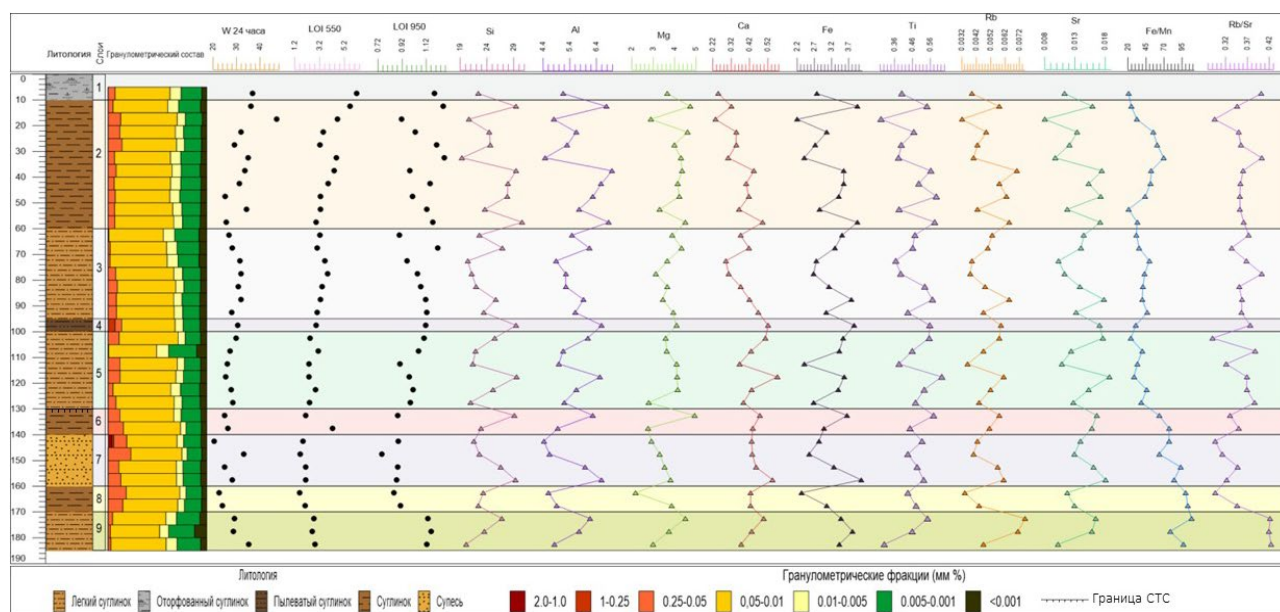


Рис. 2. Литологическая, геохимическая и гранулометрическая дифференциация отложений скважины 25Lb-7.

Обсуждение. Полученные результаты позволяют проследить литолого-геохимические особенности слоев талых и мерзлых отложений в активном и переходном слое на исследуемой территории. В литологическом строении преобладают суглинистые отложения, в которых доминирует фракция крупной пыли (более 50% во всех образцах). Преобладание данной размерности, вероятней всего, связано с интенсивным преобразованием отложений, вследствие избирательного криогенного разрушения минералов, за счет многократных циклов промерзания и оттаивания [Konishchev, Rogov, 1993]. Применение соотношения Rb/Sr, отражающего интенсивность процессов физического выветривания и демонстрирует определенную его связь с процессами криогенного выветривания. Соотношение Rb/Sr по профилю имеют хорошую корреляцию с распределением фракций средней ($r=0,61$) и мелкой ($r=0,62$) пыли, и в тоже время отрицательную для мелких песков ($r=-0,65$). В условиях криогенного выветривания кварц менее устойчив, чем полевой шпат [Konishchev, Rogov, 1993]. Распределение органического вещества и карбонатов также имеет хорошую корреляцию с фракциями мелкой и средней пыли и позволяет предполагать наибольшую их концентрацию в данных размерностях. Применение соотношения Fe/Mn для верификации окислительно-восстановительных условий исследованного участка демонстрирует внутрипрофильную дифференциацию в зависимости от состава отложений, степени увлажнения и глубины сезонно-талого слоя (СТС). Повышенные значения Fe/Mn с одной стороны могут являться индикатором для верификации восстановительных условий, а с другой маркером для оценки глубины СТС. Так, для исследованного участка, повышение Fe/Mn происходит на

двух уровнях. В верхней части СТС, где могут в анаэробных условиях развиваться восстановительные условия из-за роста биологической активности и ниже подошвы СТС (с глубины 130 до 185 см), что может быть следствием криогенной аккумуляции железа в период формирования многолетнемерзлых пород.

Выводы. Результаты исследования активного слоя многолетнемерзлых отложений в Нижнем Приобье позволяют проследить определенные литолого-геохимического закономерности. В исследованных отложениях преобладают фракции крупной и мелкой пыли, которые вероятно свидетельствуют об интенсивных процессах криогенного выветривания на данной территории. В свою очередь практически однородное распределение гранулометрических фракций по профилю отражает стабильные природные условия для данной территории. Доминировал один источник поступления материала. Накопление органического вещества и карбонатов тяготеет к средне- и мелкопылевым фракциям. Тем самым можно предположить, что процессы криогенного выветривания и увеличение пылевых фракций является важной составляющей в аккумуляции вещества в условиях криолитозоны. Однако данный вывод, сделанный по результатам определения ППП требует последующей верификации методами прямого определения данных компонентов в породах. Соотношение Rb/Sr в пылевых фракциях хорошо отражает интенсивность процессов физического и криогенного выветривания. Применение отношения Fe/Mn может быть использовано для оценки окислительно-восстановительных условий, а также возможно его применение для верификации толщины переходного слоя и среднемноголетней границы СТС.

Финансирование. Исследование проведено в рамках и в рамках ГЗ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» №121051100164 и «Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов» №1210514000831. Авторы благодарят сотрудников НЦИА за помощь в организации и проведении буровых работ.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазонасной провинции. Новосибирск: ГЕО, 2009. 319 с.

Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / гл. ред. С.И. Ларин. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.

Втюрина Е.А. Криогенное строение пород сезонно-протаивающего слоя. – М.: Наука, 1974. 129 с.

Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 5. Географическая. 2022. №2. С. 25-36.

Качинский Н.А. Физика почвы. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1965. 324 с.

Barker A.J., Sullivan T.D., Baxter W.B., Barbato R.A., Gallaher S., Patton G.E., et al. Iron oxidation–Reduction processes in warming permafrost soils and surface waters expose a seasonally rusting Arctic Watershed // ACS Earth and Space Chemistry. 2023. Vol. 7. Is. 8. P. 1479–1495. doi: 10.1021/acsearthspacechem.2c00367

Boyle J.F. Inorganic geochemical methods in palaeolimnology. In: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001. P. 83–142. doi:10.1007/0-306-47670-3_5

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // Journal of Paleolimnology. 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Iwahana G., Takano S., Petrov R.E., Tei S., Shingubara R., Maximov T.C., Fedorov A.N., Desyatkin A.R., Nikolaev A.N., Desyatkin R.V., Sugimoto A. Geocryological characteristics of the

upper permafrost in a tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia // *Polar Science*. 2014. Vol. 8. Is. 2. P. 96–113. doi: 10.1016/j.polar.2014.01.005

Konishchev V.N., Rogov V.V. Investigations of Cryogenic Weathering in Europe and Northern Asia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1993. Vol. 4. Is. 1. P. 49–64. doi: 10.1002/ppp.3430040105

Liew M., Ji X., Xiao M., Farquharson L., Nicolsky D., Romanovsky V., Bray M., Zhang X., McComb C. Synthesis of physical processes of permafrost degradation and geophysical and geomechanical properties of permafrost // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198, 103522. doi: 10.1016/j.coldregions.2022.103522

Nesbitt H.W., Markovics G., Price R.C. Chemical processes affecting alkalies and alkaline earths during continental weathering // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1980. Vol. 44. Is. 11. P. 1659–1666. doi: 10.1016/0016-7037(80)90218-5

Rossi M., Dal Cin M., Picotti S., Gei D., Isaev V.S., Pogorelov A.V., Gorshkov E.I., Sergeev D.O., Kotov P.I., Giorgi M., Rainone M.L. Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10, 910078. doi: 10.3389/feart.2022.910078

LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ACTIVE LAYER OF PERMAFROST OF THE LOWER OB REGION

Torgunakova E.A.¹, Kuziakin L.P.¹, Makshaev R.R.¹, Krechetov P.P.¹, Yurov F.D.¹, Maslakov A.A.¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

This paper presents the lithological and geochemical characteristics of the active layer of permafrost deposits in the Lower Ob region. The studied active layer is characterized by a predominance of loamy deposits, dominated by coarse and fine silt fractions. Cryogenic weathering processes likely determined the predominant type of silt fraction. The use of geochemical coefficients Rb/Sr and Fe/Mn demonstrated their applicability for assessing weathering processes and oxidation-reduction conditions for the studied area.

Keywords: *permafrost, active layer, geochemistry, lithology, X-ray fluorescence analysis, climate change, Lower Ob region*

REFERENCES:

Alekseev S.V. Cryohydrogeological systems of the Yakut diamondiferous province. Novosibirsk: GEO, 2009, 319 p. (In Russian)

Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / Ed. S.I. Larin. Omsk: Omsk Cartographic Factory, 2004, 303 p. (In Russian)

Barker A.J., Sullivan T.D., Baxter W.B., Barbato R.A., Gallaher S., Patton G.E., et al. Iron oxidation–Reduction processes in warming permafrost soils and surface waters expose a seasonally rusting Arctic Watershed // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2023. Vol. 7. Is. 8. P. 1479–1495. doi: 10.1021/acsearthspacechem.2c00367

Boyle J.F. Inorganic geochemical methods in palaeolimnology. In: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001. P. 83–142. doi:10.1007/0-306-47670-3_5

Grebenets V.I., Kizyakov A.I., Maslakov A.A., Sokratov S.A., Streletskaya I.D., Tolmanov V.A., Yurov F.D. The influence of hazardous cryogenic processes on the infrastructure of cities in the Arctic. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geographical*, 2022, No. 2. – P. 25–36. (In Russian)

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // *Journal of Paleolimnology*. 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Iwahana G., Takano S., Petrov R.E., Tei S., Shingubara R., Maximov T.C., Fedorov A.N., Desyatkin A.R., Nikolaev A.N., Desyatkin R.V., Sugimoto A. Geocryological characteristics of the upper

permafrost in a tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia // *Polar Science*. 2014. Vol. 8. Is. 2. P. 96-113. doi: 10.1016/j.polar.2014.01.005

Kachinsky N.A. Physics of Soil. Part 1. Moscow: Vysshaya shkola, 1965. 324 p. (In Russian)

Konishchev V.N., Rogov V.V. Investigations of Cryogenic Weathering in Europe and Northern Asia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1993. Vol. 4. Is. 1. P. 49–64. doi: 10.1002/ppp.3430040105

Liew M., Ji X., Xiao M., Farquharson L., Nicolsky D., Romanovsky V., Bray M., Zhang X., McComb C. Synthesis of physical processes of permafrost degradation and geophysical and geomechanical properties of permafrost // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198, 103522. doi: 10.1016/j.coldregions.2022.103522

Nesbitt H.W., Markovics G., Price R.C. Chemical processes affecting alkalies and alkaline earths during continental weathering // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1980. Vol. 44. Is. 11. P. 1659–1666. doi: 10.1016/0016-7037(80)90218-5

Rossi M., Dal Cin M., Picotti S., Gei D., Isaev V.S., Pogorelov A.V., Gorshkov E.I., Sergeev D.O., Kotov P.I., Giorgi M., Rainone M.L. Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10, 910078. doi: 10.3389/feart.2022.910078

Vtyurina E.A. Cryogenic structure of rocks of the seasonally thawing layer. Moscow: Nauka, 1974, 129 p. (In Russian).