



ЛИТОЛОГИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ TTR-24

✉ Коточкова Ю.А.¹, Рыбалко А.Е.^{2,3}, Рябчук Д.В.⁴

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

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

³ СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ФГБУ «Институт Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

✉ yu.kotochkova@oilmsu.ru

В ходе экспедиции TTR-24 (2025 г.) был проведен комплекс геолого-геофизических работ по изучению разрезов четвертичных отложений у о. Самойловича и в Северо-Карском желобе. Литологические описания, данные о физических свойствах и геохимические наблюдения указывают на широкое распространение морских нефелоидных осадков голоцена, повсеместно перекрывающих верхнеплейстоценовые ледниково-морские горизонты. Предварительная корреляция разрезов выявила зоны возможного сохранения ледниковых и подледниково-морских отложений, однако их генезис и связь с динамикой позднеплейстоценовых ледников требуют дальнейших исследований.

Ключевые слова: *Карское море, TTR, геологический пробоотбор, морские осадки, четвертичная геология*

Введение. Криолитозона шельфа и континентального обрамления морей Российской Арктики, включая Карское море, изучена недостаточно, что требует проведения новых геолого-геофизических исследований. Именно здесь, по данным различных геоморфологических, сейсмоакустических и палеогеографических моделей, могла проходить восточная граница максимального распространения ледникового покрова в период последнего ледникового максимума (Last Glacial Maximum – LGM) (рис. 1) [Svendsen *et al.*, 2004]. Однако существующие оценки существенно различаются: одни реконструкции предполагают продвижение ледника далеко к востоку, покрывая значительную часть Карского шельфа, тогда как другие ограничивают ледовый покров лишь западными районами моря. Эти расхождения приводят к неопределённости в понимании масштаба позднеплейстоценовых оледенений, характера дегляциации и условий формирования осадочного чехла в регионе.

Особая значимость исследования определяется тем, что донные отложения северо-восточной части Карского моря представляют собой природный архив, фиксирующий процессы оледенения, последующего таяния и морского трансгрессивного развития.

В отличие от геоморфологических форм рельефа, которые часто подвергались эрозии, донные осадки сохраняют последовательную запись изменений, происходивших на шельфе в течение последних десятков тысяч лет. Анализ текстурно-структурных характеристик, количества и типа органического вещества, минерального состава, микропалеонтологических остатков и геохимических маркеров позволяет выделять ледниковые, ледниково-морские и морские фации, проследивать источники осадочного материала и оценивать изменения условий осадконакопления.

Работы Клауса Диттмарса и соавторов [Dittmers *et al.*, 2008] показали, что распределение осадков и строение толщи четвертичных осадков в Карском море отражают сложную комбинацию ледниковых и послеледниковых процессов, включая вынос материала подледниковыми потоками и последующее переотложение в морском бассейне. Исследования Bettina Bouscein [Bouscein *et al.*, 2002] и Ruediger Stein [Stein *et al.*, 2001] продемонстрировали, что органическое вещество и терригенные компоненты донных отложений фиксируют изменения речного стока, продуктивности моря и притока талых ледниковых вод после LGM. Более поздние данные, включая работы Е.И.

Поляковой [Polyakova, Stein, 2017; Полякова и др., 2023], подтверждают, что микропалеонтологические и органо-геохимические показатели позволяют уверенно разделять голоценовые и неоплейстоценовые горизонты, что критически важно для определения времени освобождения шельфа ото льда. Моделирование мерзлотных условий на шельфе [Gavrilov et al., 2020] также подчёркивает значимость стратиграфии донных осадков, поскольку возраст и характер осадков напрямую влияют на оценку истории затопления и термального состояния шельфа.

Таким образом, уточнение границ максимального распространения последнего оледенения невозможно без комплексного изучения донных осадков, которые обеспечивают наиболее непрерывную и надёжную запись позднеоплейстоценовой и голоценовой истории региона. Это исследование имеет как фундаментальное, так и прикладное значение: результаты позволяют улучшить модели эволюции ледников Баренцево–Карского сектора, уточнить темпы и механизмы дегляциации, оценить динамику изменения уровня моря и пресноводного стока, а также повысить точность прогнозов геологических условий в районах перспективного освоения Арктики. Учитывая растущий интерес к инженерным, навигационным и экологическим проектам в арктической зоне, корректное понимание строения осадочного чехла, его генезиса и степени постледниковой переработки становится важным фактором устойчивого использования ресурсов региона.

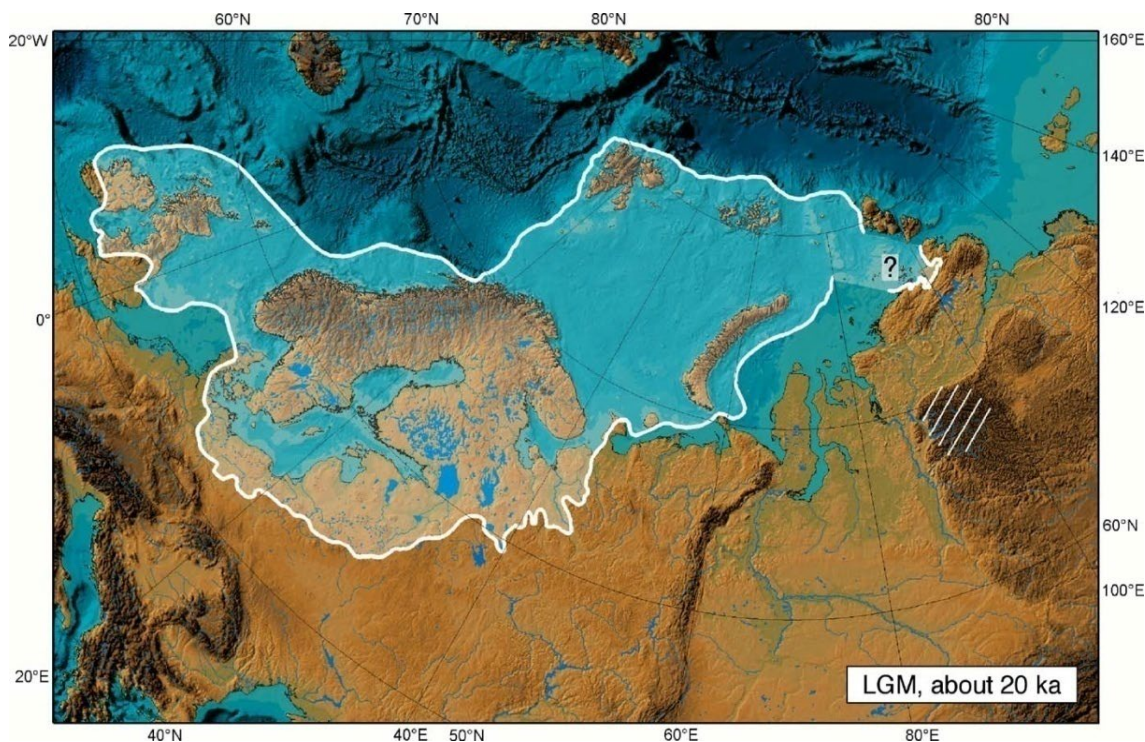


Рис. 8. Распространение ледника при последнем ледниковом максимуме [Svendsen et al., 2004].

Методы и фактический материал. Программа TTR-24 проходила на научно-исследовательском судне «Академик Борис Петров» в августе-сентябре 2025г. В ходе экспедиции был выполнен комплекс геофизических, гидроакустических, геологических и геохимических работ, направленных на изучение строения четвертичных отложений и выявление особенностей геологического разреза северных акваторий. Геофизические исследования включали сейсморазведку сверхвысокого разрешения (ССВР МОВ ОГТ), позволившую получить изображение разреза на всю мощность четвертичного чехла, а также магнитометрическую съёмку. Гидроакустический комплекс НИС «Академик Борис Петров» обеспечил проведение акустического профилирования в широком частотном диапазоне (0,5–50 кГц), многолучевого эхолотирования и измерений скорости звука в воде. Эти методы использовались для детального картирования поверхности дна,

выявления акустических характеристик приповерхностных осадков и предварительной сейсмостратификации разреза.

На основе оперативной интерпретации геофизических профилей выбирались точки для геологического пробоотбора. Отбор осуществлялся с помощью ударной гравитационной трубки длиной 3 м с пластиковым вкладышем. После подъема керна на борт вкладыш разрезался на секции, вскрывался продольно, и одна половина керна использовалась для литологического описания, фотографирования и отбора образцов, а вторая — для комплексных геохимических и инженерных исследований. На нескольких опорных станциях были отобраны повторные, ненарушенные керны, впоследствии направленные в лаборатории для рентгеновской томографии и дополнительных анализов.

Литологические исследования включали макроскопическое описание разреза, определение физических свойств осадков (магнитная восприимчивость, скорость прохождения звука, плотность, увлажненность, сопротивление сдвигу), а также отбор образцов для проведения гранулометрических, минералогических и палеонтологических анализов.

В рамках геохимического блока проводились измерения Eh и pH по разрезу, отбор проб для анализа газовой фазы, люминесцентно-битуминологических исследований, а также изучение состава поровых вод.

В данной работе рассмотрены результаты, полученные в ходе исследования северной части Карского моря, в котором было два основных блока работ: 1) район вблизи о. Самойловича и 2) участок «KasaLima» в районе Северо-Карского жёлоба (рис. 2). Всего было отобрано 13 станций донного пробоотбора.

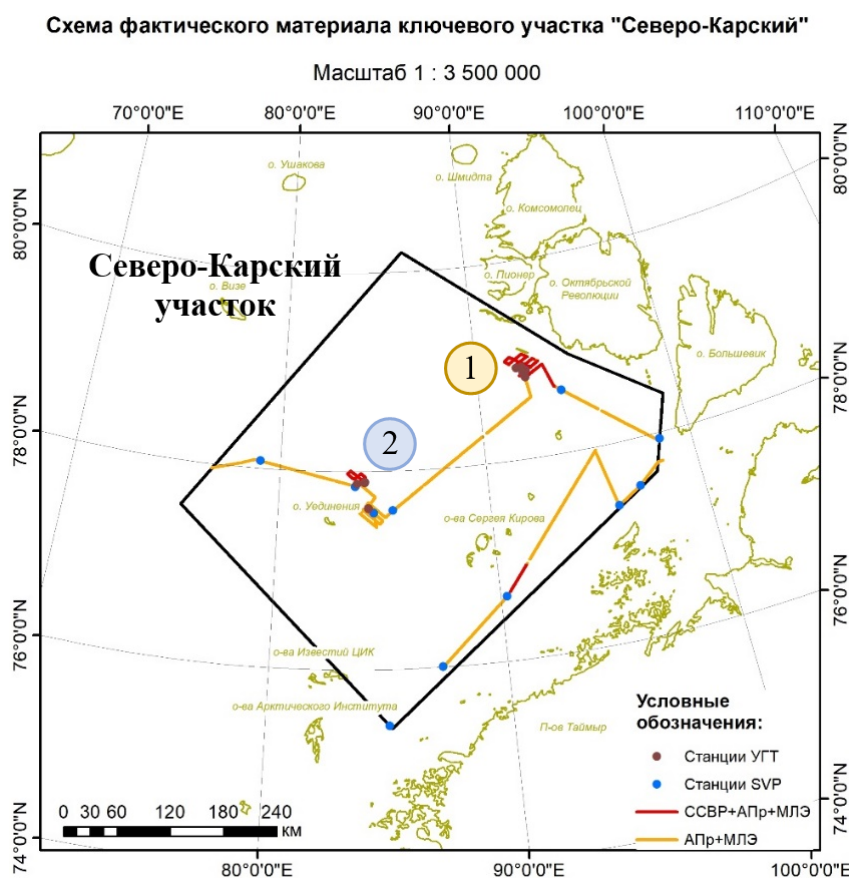


Рис. 9. Участки работ на Северо-Карском полигоне: 1 – район о. Самойловича, 2 – участок «KasaLima».

Результаты. В районе о. Самойловича было 6 станций донного пробоотбора: TTR24-AR-567G, TTR24-AR-569G, TTR24-AR-570G, TTR24-AR-571G, TTR24-AR-572G, TTR24-AR-573G. Трубки вскрыли преимущественно морские нефелоидные осадки

голоценового возраста. Исключением являются станции TTR24-AR-572G и TTR24-AR-569G, в которых предположительно вскрыты более древние отложения – верхнелепестовые-голоценовые.

Станция TTR24-AR-569G, глубина отбора 136 м. Верхний 1 см керн – бурый жидкий песчано-глинистый наилок с четким неровным нижним контактом. Остальная, нижняя, часть трубки сложена пелитовыми алевритами в разной степени песчанистыми. Консистенция текуче-пластичная, постепенно сменяющаяся мягкопластичной к забойной части станции. Отдельные слои выделяются по появлению/исчезновению примазок гидротроилита, границы слоёв постепенные. Также отмечается плавная смена цвета осадка – от зеленовато-серого до коричневатых оттенков с глубины 2,06 м от кровли керн. Нижний метр станции также отличается наличием редкого неравномерно распределённого тонкого раковинного детрита. *Морские нефелоидные осадки голоцена (mnH), однако нижний метр керн, может быть, и более древними образованиями – морские нефелоиды верхнего неоплейстоцена-голоцена (gmIII-H).*

Станция TTR24-AR-572G, глубина отбора 138 м. Верхний 1 см осадка представлен бурым жидким глинисто-песчаным алевритом. Контакт с нижележащими отложениями резкий, эрозионный, со следами размыва. Далее, 0,01-0,22 м, идут алевриты песчанистые однородные с наложенной зоной окисления в верхней части и прослоем тонкозернистого песка с растительным в подошве интервала. Ниже, до глубины 1,56 м от кровли керн осадки сменяются на алевропелиты темно-зеленовато-серые и темно-коричневые (в нижней части). Окраска неоднородная, обусловленная чередующимися интервалами с примазками гидротроилита. Прослеживается чёткая неровная граница с нижележащим слоем (рис. 3). Интервал 1,65-1,87 м сложен мягкопластичными алевроглинами оливковыми с неясной пологоволнистой текстурой, подчеркнутой темными нитевидными слоями. *Разрез в интервале 0,01-1,65 м представлен морскими нефелоидами голоцена (mnH), ниже, возможно, подстилаются ледниково-морскими осадками верхнего неоплейстоцена (gmIII).*

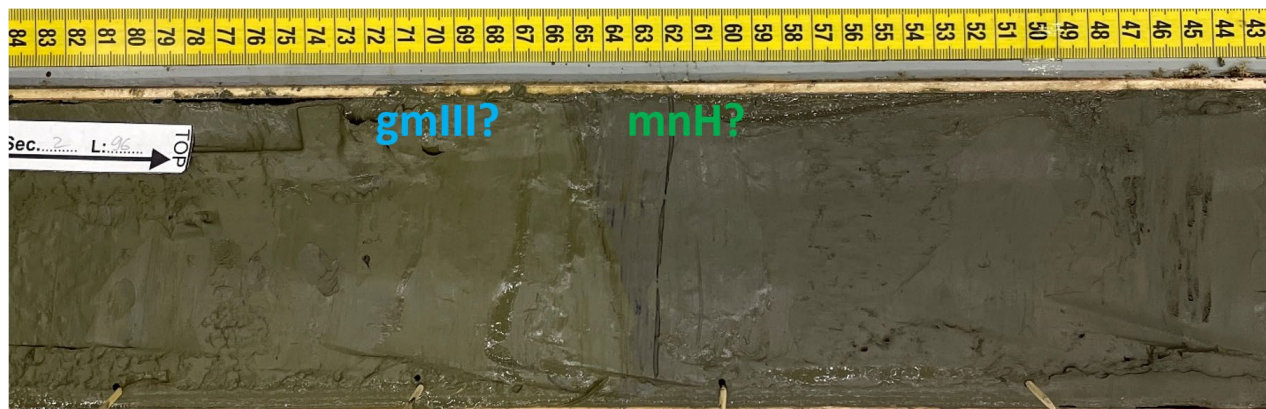


Рис. 10. Контакт алевропелитов коричневатых-серых (справа) и алевроглин оливковых (слева).

В целом, отложения характеризуются схожим гранулометрическим составом – преимущественно алевропелиты слабопесчанистые пятнисто-полосчатые за счет неравномерно развитых стяжений и примазок гидротроилита. По разрезу отмечаются редкие битые раковины двусторчатых моллюсков, а также единичные литокласты. Схожесть вещественного состава, последовательность изменения текстурных признаков позволяет уверенно коррелировать литостратиграфические горизонты в колонках. (рис. 4).

На участке «KasaLima» было 7 станций донного пробоотбора: TTR24-AR-575G, TTR24-AR-577G, TTR24-AR-578G, TTR24-AR-579G, TTR24-AR-581G, TTR24-AR-582G, TTR24-AR-583G.

Станции TTR24-AR-575G и TTR24-AR-577G всего 12 и 13 см, соответственно, и представлены песчаными микритами. Текстура осадка линзоватослоистая за счет

неравномерного распределения песчаного материала. Отмечаются темные примазки гидротроилита, а также многочисленные ходы полихет. Для данных станций характерны резкие, неровные контакты между слоями.

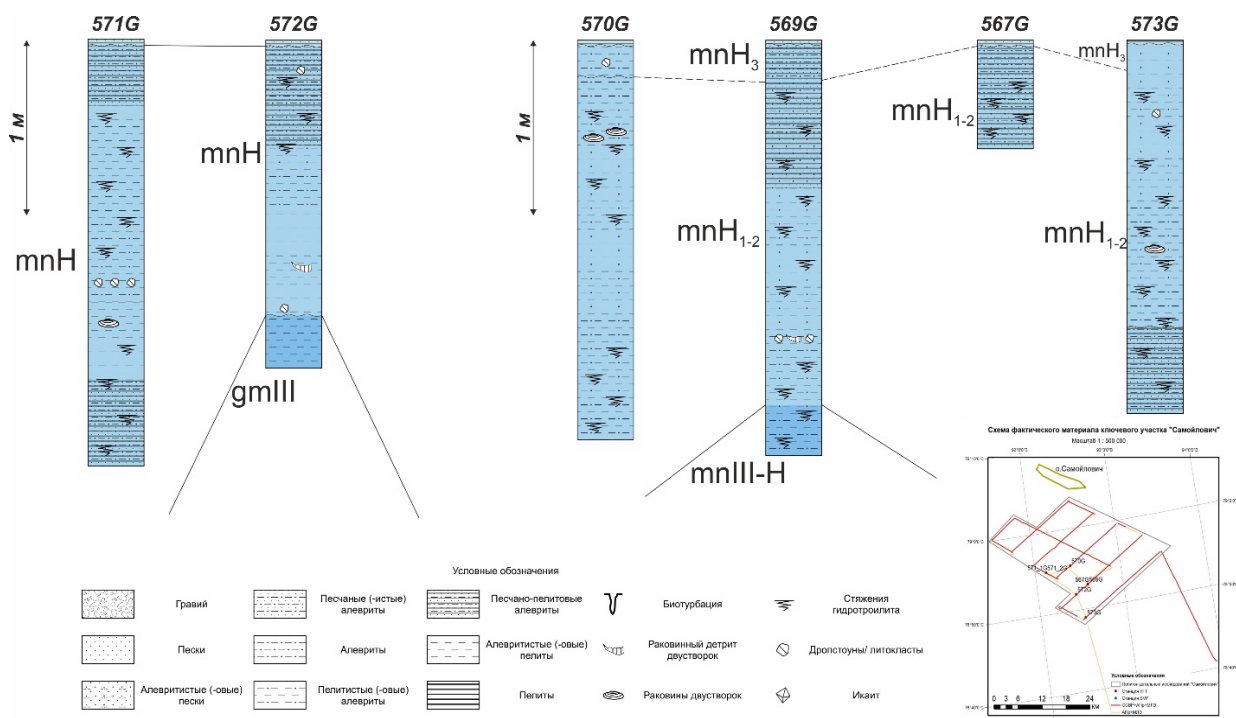


Рис. 11. Корреляция разрезов четвертичных отложений в районе о. Самойловича.

Верхние 6 см станции TTR24-AR-578G сложены текучими песками, подстилающиеся глинистыми алевритами текучепластичными. Стяжения гидротроилита формируют нечеткие пятна, за счет чего образуется пятнисто-полосчатая текстура (рис. 5). Прослеживается редкий раковинный детрит.

Песчаная часть разреза соответствует перлювиальным и течениевым отложениям (mpfIII-H), алевриты – типичным морским нефелоидам голоцена.



Рис. 12. Фото керна станции TTR24-AR-578G.

В осадках отмечается различное содержание примеси песчаных и пелитовых частиц: для верхней части разреза характерна большая песчаность. Окраска отложений неоднородная, полосчатая, местами пятнистая, обусловленная неравномерным распределением стяжений и примазок гидротроилита, а также тонкодисперсного ОВ. По консистенции текуче-пластичные, отмечается уплотнение осадков к нижней части разреза. Нижний контакт между прослоями постепенный, условный по появлению/исчезновению гидротроилита.

Во всех станциях участка «KasaLima» прослеживается верхняя окисленная часть - железоглинистая корка рыжевато-буроватая, плотная, мощностью 4-5 см (Рисунок 6). Отмечаются редкие литокласты. Нижняя граница резкая, со следами размыва.

Подобное строение осадков свидетельствует, что данная область – зона подводной абразии, а также о наличии большого количества кислорода, что подтверждается положительными значениями Eh.

Верхняя, окисленная, часть разреза соответствует области интенсивного диагенетического преобразования осадков, ниже – морским нефелоидам нижнего-среднего голоцена.

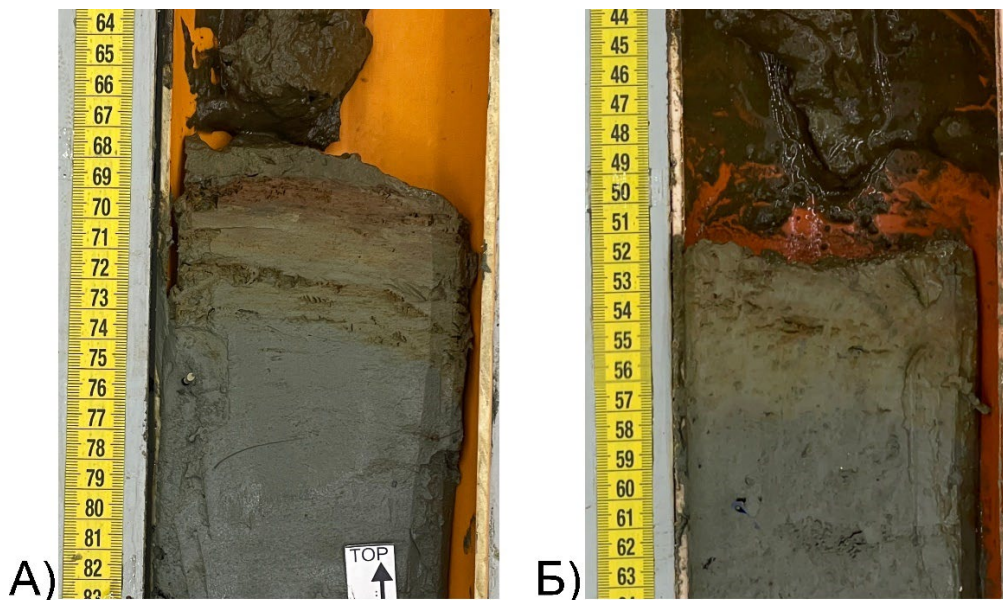
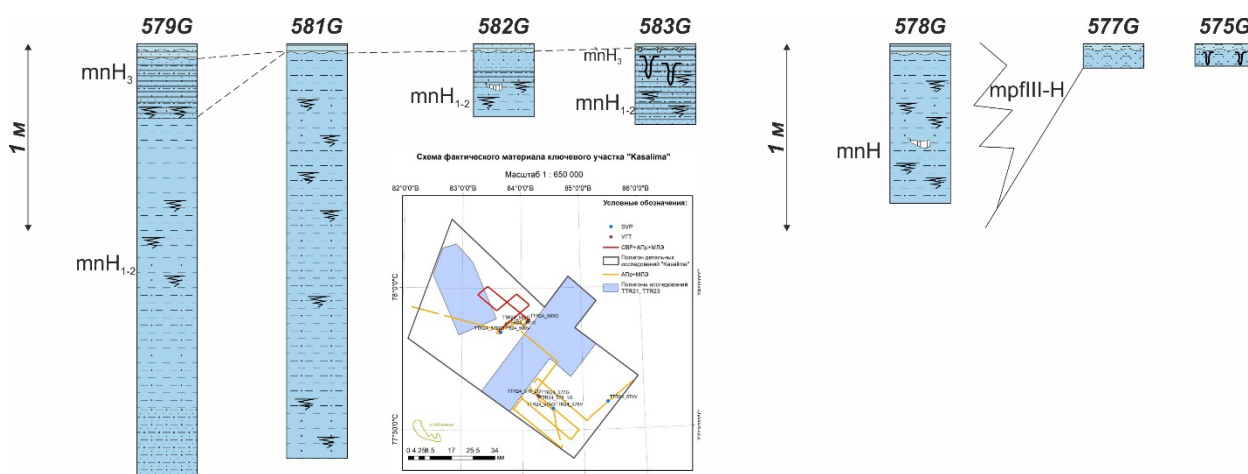


Рис. 13. Фото верхней части осадка – окисленного глинистого наилка, станции: А) TTR24-AR-579G, Б) TTR24-AR-582G.

Отложения схожи по своему строению – преимущественно алевроиты с различным содержанием песчаной примеси по разрезу. Неоднородная окраска обусловлена раннедиагенетическими изменениями – появлением стяжений и примазок гидротроилита. Разрез представлен морскими нефелоидами голоцена (рис. 7).

Морские перлювиально-флювиальные образования верхнего неоплейстоцена-голоцена представлены миктитами песчаными с темными примазками гидротроилита и многочисленными ходами полихет.



близости от Архипелага Северная Земля, косвенно подтверждает наличие здесь ледниковых отложений, но не дают однозначного ответа с какого направления двигался ледник. Остается актуальным и вопрос с генезисом дренажной сети из паледолин, развитых в северной части Карского моря.

Для проведения палеогеографических реконструкций отобранные образцы будут комплексно изучены литологическими, геохимическими и микропалеонтологическими методами. Минералого-геохимические методы включали определение содержания органического углерода, элементов-индикаторов (Ti, K, Fe, Ca, Sr и др.) с использованием рентгенофлуоресцентного анализа, а также анализ изотопного состава органического вещества ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$). Эти параметры позволяют проследить источники терригенного материала, вклад талых ледниковых вод и морской продуктивности, что помогает выделять ледниковые горизонты и послеледниковые трансгрессивные комплексы.

Микропалеонтологический анализ будет проведён для установления условий среды и выявления границы перехода от ледниковой или опреснённой обстановки к нормальной морской. В сочетании с палинологическим анализом это обеспечивает идентификацию голоценовых и неоплейстоценовых горизонтов даже в условиях слабовыраженной стратификации. Также планируется определение возраста осадков по данным радиоуглеродного датирования (^{14}C) раковин фораминифер.

Благодарность. Авторы благодарны команде НИС «Академик Борис Петров», за слаженную и продуктивную работу, и отмечают слаженную работу коллектива студентов и аспирантов, проходящих стажировку в рамках программы «Плавучего университета», что позволило получить новые и интересные научные результаты по фациальной зональности четвертичных отложений вокруг архипелага «Северная Земля»

Финансирование. Экспедиционные работы выполнены в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2025-662/8). Исследование поддержано государственным заданием Федерального агентства по недропользованию от 25.12.2024 № 049-00004-25-00, в рамках объекта работ Института Карпинского «Мониторинг государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 территории Российской Федерации и ее континентального шельфа в 2023-2025 годах» и тематикой работ Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

Полякова Е.И., Клювиткина Т.С., Новичкова Е.А., Агафонова Е.А. Микропалеонтологические индикаторы обстановок осадконакопления в арктических морях России // Микропалеонтология: фундаментальные проблемы и вклад в региональное геологическое изучение недр. Труды XVIII Всероссийского микропалеонтологического совещания (Санкт-Петербург, 2023 г.). Издательство ВСЕГЕИ Санкт-Петербург: 2023. С. 72–76.

Рыбалко А.Е., Полудеткина Е.Н., Потемка А.К., Рябчук Д.В., Токарев М.Ю., Ольнева Т.В., Аксенов А.О., Коточкова Ю.А., Румянцева А.К., Симонова А.К. Плавучий университет МГУ-Юнеско - результаты изучения четвертичных отложений в рейсе ТТР-24 в 2025 году // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2025. Выпуск 12. С. 177-189. doi: 10.24412/2687-1092-2025-12-177-189

Boucsein B., Knies J., Stein R. Organic matter deposition along the Kara and Laptev Seas continental margin (eastern Arctic Ocean) during the last deglaciation and Holocene: evidence from organic-geochemical and petrographical data // Marine Geology. 2022. Vol. 183. Is. 1-4. P. 67-87. doi:10.1016/S0025-3227(01)00249-3

Dittmers K., Niessen F., Stein R. Acoustic facies on the inner Kara Sea Shelf: Implications for Late Weichselian to Holocene sediment dynamics // Marine Geology. 2008. Vol. 254. Is. 3–4. P. 197–215. doi: 10.1016/j.margeo.2008.06.004

Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A., Boldyrev M., Khilimonyuk V., Pizhankova E., Buldovich S., Kosevich N., Alyautdinov A., Ogienko M., Roslyakov A., Cherbunina M., Ospennikov E. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. Is. 6. P. 1857–1873. doi:10.5194/tc-14-1857-2020

Stein R., Boucsein B., Fahl K., Garcia de Oteyza T., Knies J., Niessen F. Accumulation of particulate organic carbon at the Eurasian continental margin during late Quaternary times: Controlling mechanisms and paleoenvironmental significance// *Global and Planetary Change*. 2001. Vol. 31. P. 87-104. doi:10.1016/S0921-8181(01)00114-X

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswell J.A., et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. Is. 11-13. P. 1229-1271. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008

Polyakova Y., Stein R. Holocene paleoenvironmental implications of diatom and organic carbon records from the southeastern Kara Sea (Siberian Margin) // *Quaternary Research*. 2004. Vol. 62. Is. 3. P. 256–266. doi:10.1016/j.yqres.2004.08.002

LITHOLOGY OF BOTTOM SEDIMENTS FROM THE NORTHERN KARA DURING THE TTR-24

Kotochkova Yu.A.¹, Rybalko A.E.^{2,3}, Ryabchuk D.V.³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³ VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

⁴ Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

During the TTR-24 expedition (2025), a comprehensive geological and geophysical survey was conducted to study Quaternary sediment sections near Samoylovich Island and in the North Kara Trench. Lithological descriptions, physical property data, and geochemical observations indicate the widespread occurrence of Holocene marine nepheloid sediments, overlying Upper Pleistocene glacial-marine horizons. Preliminary correlation of the sections revealed zones of possible preservation of glacial and subglacial-marine sediments; however, their genesis and relationship to Late Pleistocene glacial dynamics require further study.

Keywords: *Kara Sea, TTR, geological sampling, marine sediments, Quaternary geology*

REFERENCES:

Polyakova Ye.I., Klyuvitkina T.S., Novichkova E.A., Agafonova E.A. Micropaleontological indicators of sedimentation environments in the Arctic seas of Russia // *Micropaleontology: fundamental problems and contribution to regional geological study of the subsoil. Proceedings of the XVIII All-Russian micropaleontological meeting (St. Petersburg, 2023)*. VSEGEI Publishing House St. Petersburg: 2023. P. 72-76.

Rybalko A.E., Poludetkina E.N., Potemka A.K., Ryabchuk D.V., Tokarev M.Yu., Olneva T.V., Aksyonov A.O., Kotochkova Yu.A., Rumyantseva A.K., Simonova A.K. MSU-UNESCO Floating University - Results of the Study of Quaternary Sediments during the TTR-24 Cruise in 2025 // *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and Northwest Russia*. 2025. Issue 12. P. 177-189. doi: 10.24412/2687-1092-2025-12-177-189

Boucsein B., Knies J., Stein R. Organic matter deposition along the Kara and Laptev Seas continental margin (eastern Arctic Ocean) during the last deglaciation and Holocene: evidence from organic-geochemical and petrographical data // *Marine Geology*. 2022. Vol. 183. Is. 1-4. P. 67-87. doi:10.1016/S0025-3227(01)00249-3

Dittmers K., Niessen F., Stein R. Acoustic facies on the inner Kara Sea Shelf: Implications for Late Weichselian to Holocene sediment dynamics // *Marine Geology*. 2008. Vol. 254. Is. 3–4. P. 197–215. doi: 10.1016/j.margeo.2008.06.004

Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A., Boldyrev M., Khilimonyuk V., Pizhankova E., Buldovich S., Kosevich N., Alyautdinov A., Ogienko M., Roslyakov A., Cherbunina M., Ospennikov E. The current state

and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. Is. 6. P. 1857–1873. doi:10.5194/tc-14-1857-2020

Stein R., Boucsein B., Fahl, K., Garcia de Oteyza T., Knies J., Niessen F. Accumulation of particulate organic carbon at the Eurasian continental margin during late Quaternary times: Controlling mechanisms and paleoenvironmental significance// *Global and Planetary Change*. 2001. Vol. 31. P. 87-104. doi:10.1016/S0921-8181(01)00114-X

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswell J.A., et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. Is. 11-13. P. 1229-1271. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008

Polyakova Y., Stein R. Holocene paleoenvironmental implications of diatom and organic carbon records from the southeastern Kara Sea (Siberian Margin) // *Quaternary Research*. 2004. Vol. 62. Is. 3. P. 256–266. doi:10.1016/j.yqres.2004.08.002