

СЕКЦИЯ АРКТИКА И СУБАРКТИКА

doi: 10.24412/2687-1092-2025-12-13-18



ПРИРОДА КУПОЛООБРАЗНЫХ ПОДНЯТИЙ МИКРОРЕЛЬЕФА ДНА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ (РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИИ TTR-24)

✉ Аксенов А.О.^{1,2,3}, Рыбалко А.Е.^{2,4}, Рябчук Д.В.¹, Полудеткина Е.Н.⁵, Коточкова Ю.А.⁵,
Потемка А.К.^{5,6}, Токарев М.Ю.⁵, Ахманов Г.Г.⁵

¹ ФГБУ «Институт Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия

⁴ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

⁵ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶ ООО «Центр анализа сейсмических данных», Москва, Россия

✉ aksenov2801@gmail.com

В ходе экспедиции TTR-24 Плавучего университета ЮНЕСКО-МГУ в 2025 году на шельфе моря Лаптевых были обнаружены не известные ранее формы рельефа, представляющие собой отдельные куполообразные поднятия высотой 1-2 м. На полигоне, где эти формы отмечены, были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования с целью изучения морфологии и строения этих форм, состава слагающих их отложений. Выполнена интерпретация материалов сейсмо- и гидроакустических данных, вещественного состава и текстуры осадков. Проанализирована газовая фаза осадка. Выдвинуты два альтернативных предположения о происхождении этих поднятий. Рассматривается криогенная и грязевулканическая модель их образования. Определены пути дальнейшего изучения обозначенных вопросов.

Ключевые слова: *Море Лаптевых, TTR, субаквальная геоморфология, сейсморазведка высокого разрешения, акустическое профилирование, многолучевое эхолотирование, геологический пробоотбор, флюидогенный рельеф, пингоподобные формы, грязевой вулканизм*

Введение. Со 19 августа по 30 сентября 2025 года на борту научно-исследовательского судна «Академик Борис Петров» состоялась научно-образовательная геолого-геофизическая экспедиция TTR-24 программы «Training-through-Research» Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ в акваторию морей Карского и Лаптевых. В ходе рейса на полигоне детальных исследований, расположенном на внешнем шельфе моря Лаптевых, на данных съемки многолучевого эхолота были обнаружены небольшие куполообразные поднятия (рис. 1). В результате выполнено изучение этих объектов комплексом набортных методов и отобраны образцы для лабораторного анализа. В работе представлены предварительные результаты исследований и рассмотрены гипотезы, выдвинутые относительно генезиса обнаруженных построек.

Методы. В экспедиции были выполнены геофизические исследования разреза донных отложений, гидроакустические исследования приповерхностных осадков и поверхности дна, геологические и геохимические исследования кернов донных отложений. Геофизическая часть включала в себя сейсморазведку высокого разрешения (СВР МОВ ОГТ) и магнитометрическую съемку. В группу гидроакустических методов входили акустическое профилирование (АПр), гидрографическая съемка многолучевым эхолотом (МЛЭ), измерение скорости звука в водной толще. Геологические исследования осуществлялись методом геологического пробоотбора ударной гравитационной трубкой. Извлеченные керны впоследствии фотодокументировались и описывались. Кроме того, выполнялось определение физических свойств донных отложений (магнитной восприимчивости, скорости прохождения звука, плотности, увлажненности и сопротивления сдвигу). В ходе осуществления геохимических исследований на кернах

производились измерения Eh и pH по разрезу, отбор проб для анализа газовой фазы и битуминологических исследований органического вещества, а также опробование для изучения состава поровых вод.

В работе представлены результаты интерпретации сейсмических и акустических профилей, пересекающих исследуемые формы, анализ цифровой модели рельефа дна, полученной по данным многолучевого эхолотирования, а также рассмотрены вещественный состав и состав газовой фазы донных отложений, отобранных на изучаемых объектах. Куполообразные формы опробованы в двух станциях донного пробоотбора. Керна TTR24-AR-553-1G (длина 234 см) был распилен продольно на две равные части, детально описан, и из него были отобраны образцы на дальнейшие камеральные исследования. Керна TTR24-AR-553-2G (длина 190 см) был упакован целиком в ненарушенном виде для выполнения последующих анализов.

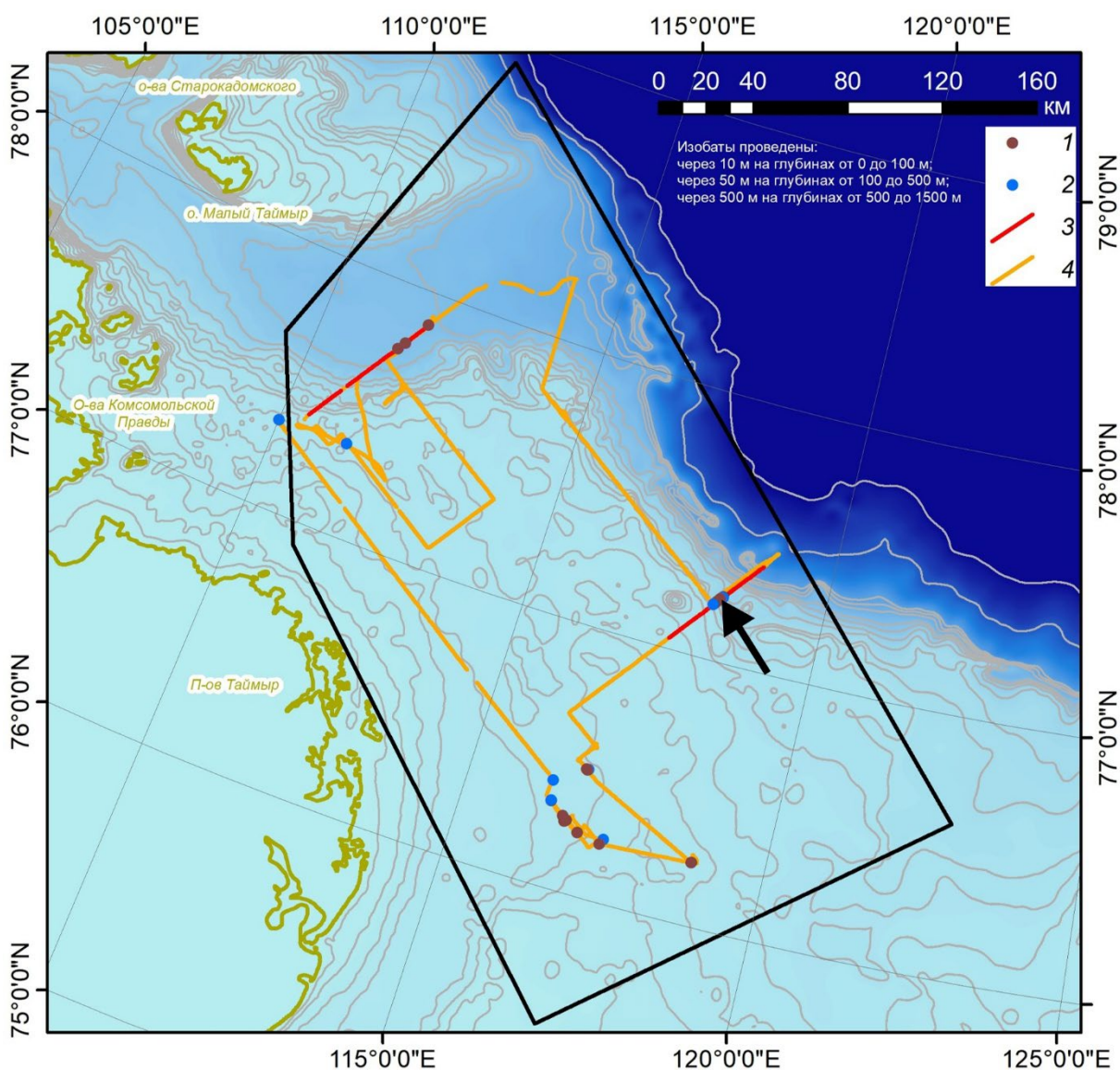


Рис. 1. Положение профилей и станций, выполненных в экспедиции TTR-24 в районе работ «Лаптевоморский» (батиметрическая основа схемы – ИВСАО [Jakobsson et al., 2024]). 1 – станции геологического пробоотбора; 2 – станции измерений скорости звука в воде; 3 – профили СВР, АПр и МЛЭ; 4 – профили АПр и МЛЭ. Черной стрелкой отмечено местоположение куполообразных форм.

Местоположение, морфология и сейсмофациальная структура куполообразных поднятий. Полигон детальных исследований, на котором были обнаружены

куполообразные формы, расположен в западной части моря Лаптевых, на внешнем шельфе. Глубины на этом участке постепенно увеличиваются с юго-запада на северо-восток, от 50 до 930 м. Средний уклон поверхности дна составляет $0,8^\circ$. Помимо куполообразных форм микрорельеф полигона представлен покмарками, современными и частично погребенными бороздами айсбергового выпаживания.

Обнаруженные поднятия расположены на глубинах 145-160 м. Выделяются три относительно крупных поднятия, высотой до 1,5-2 м (рис. 2а), а также серия более мелких форм, их окружающих. Диаметр наиболее крупного купола достигает 30 м. Уклон склонов составляет $7,3^\circ$.

Волновая картина куполообразных форм на акустическом разрезе характеризуется прозрачным типом записи (рис. 2б). Отражающий горизонт, соответствующий поверхности дна, имеет холмистую морфологию. Нижележащие акустические толщи характеризуются параллельно-слоистой волновой картиной. Непосредственно под куполом наблюдается зона потери корреляции акустического сигнала. Фиксируется слабое опускание осей синфазности по направлению к зоне потери корреляции, а также небольшое смещение последних по вертикали. На сейсмических данных потеря корреляции наблюдается вплоть до акустического фундамента, при этом амплитуда вертикального смещения осей синфазности увеличивается вниз по разрезу.

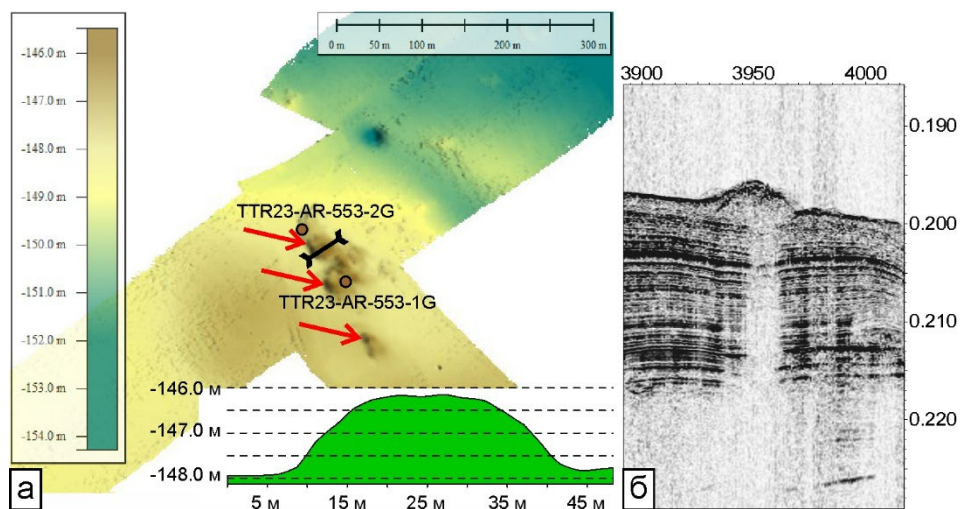


Рис. 2. а – фрагмент цифровой модели рельефа дна, на которой отображены куполообразные формы. Красными стрелками указаны наиболее крупные поднятия. Коричневыми точками указано положение станций пробоотбора. б – фрагмент акустического профиля, пересекающего куполообразную форму. Горизонтальная ось – расстояние от начала профиля (м), вертикальная – время двойного пробега акустического сигнала (с).

Вещественный состав. Донные отложения, отобранные на станции TTR24-AR-553_1G представлены темно-зеленовато-серыми песчано-пелитовыми алевритами с однородной, неслоистой текстурой. В верхней части колонки фиксируются пятнообразные скопления тонкодисперсной органики, а также линзы алевритистого песка. В нижней части, на интервале 172-182 см встречены два сфероидальных включения слобосцементированных песчаных алевролитов темно-серого цвета диаметром 5 см (рис. 3). На интервале 195-200 см присутствует раковина двустворки. По всей колонке наблюдаются следы «вскипания» и выхода газов. Также при извлечении керна из гравитационной трубки отмечен сильный запах сероводорода.



Рис. 3. Сфероидальное включение алевролитов в нижней части керна TTR24-AR-553_1G.

Состав газовой фазы. Углеводородный состав газовой фазы донных осадков, выделенной методом «head-space» в станции TTR24-AR553_1G показывает резкое превышение концентраций относительно фоновых для района исследований. Содержание CH_4 в верхней части разреза составляет 17 ppm, резко увеличиваясь с глубиной, и достигает на глубине 225 см 4,8%, концентрации гомологов C_{2+} до 17 ppm. Увеличение концентраций углеводородов вниз по разрезу в совокупности с увеличением параметра $(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8)/(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_6)$ [$R^2=0.73$] характеризует подток термогенных УВ флюидов вверх по разрезу.

В гексановых экстрактах донных отложений обнаружена гомологическая серия н-алканов с длиной цепи от C_{12} до C_{40} . В высокомолекулярной области характерно типичное для сингенетичных осадков пилообразное распределение н-алканов состава C_{23} - C_{33} , в низкомолекулярной области наблюдается повышенные концентрации н-алканов C_9 - C_{20} с плавным трендом распределения без выраженной нечетности и 2 относительными максимумами – на C_{12} и C_{19} , что характерно для миграционных термогенных углеводородов.

Обсуждение предварительных результатов. Куполообразные объекты, подобные по форме и близкие по размерам с теми, которые были нами обнаружены в экспедиции TTR-24, ранее неоднократно картировались на дне Баренцева и Карского морей. В научных публикациях они получили название «пингоподобные формы» (ППФ), и их происхождение некоторые исследователи связывают с поверхностными проявлениями фокусированной флюидоразгрузки в районах возникновения очагов повышенного давления в разрезе за счет высвобождения внутримерзлотных газов или вод [Кохан и др., 2024]. Шельф моря Лаптевых относится к перигляциальной зоне Евразийской Арктики, и во время последнего ледникового максимума (сартанское оледенение, МИС 2) за счет падения уровня Мирового океана большая часть современного Лаптевоморского шельфа находилась в субаэральной экспозиции, что в условиях резко континентального холодного климата привело к формированию многолетнемерзлых пород (ММП). ММП, в свою очередь, могли содержать значительное количество «захваченного» газа. Деградация мерзлоты в ходе послеледниковой трансгрессии моря должна была освободить газам пути вверх, что при их повышенной концентрации на локальных участках могло привести к образованию куполообразных объектов на дне. Таким образом, обнаруженные нами структуры могут быть аналогичны по генезису пингоподобным формам Западной Арктики.

С другой стороны, изученные в TTR-24 куполообразные формы расположены на глубинах 145-160 м, которые превышают максимальный относительный уровень сартанской регрессии (100-110 м по [Klemann et al., 2015]). То есть, область распространения куполообразных форм располагалась либо на самом краю сформировавшейся в позднем неоплейстоцене палео-криолитозоны, либо даже за ее

пределами. Подтверждение этому находим в некоторых работах, посвященных моделированию распространения современных многолетнемерзлых пород. По мнению ряда исследователей [Смирнов и др., 2024; Bogoyavlensky et al, 2023] изученный нами полигон находится в зоне отсутствия ММП. Отметим также, что на профилях АПр и СВР, выполненных в ходе экспедиции ТТР-24, уверенные признаки наличия ММП в районе исследований также не наблюдались. Волновая картина акустического разреза подстилающих отложений характеризуется параллельно-слоистым типом записи, что свойственно для отложений, формирующихся в субаквальных обстановках. Это не отрицает возможность существования ММП в области развития куполообразных поднятий во время максимума сартанской регрессии. А, следовательно, отрицать возможное криогенное формирование обнаруженных куполообразных форм также нельзя.

Также можно выдвинуть и другое предположение о генезисе обнаруженных куполообразных структур, не связывающее их природу с эволюцией криолитозоны в исследованном районе. Их морфологические характеристики, присутствие «экзотических» фрагментов (включения слабосцементированных алевролитов) в матриксе формирующих их отложений и повышенные концентрации метана позволяют предположить их формирование вследствие вертикальной миграции флюидов (газа, в основном CH_4 и CO_2 , и вод) совместно с тонкозернистым материалом под воздействием избыточного давления («грязевые вулканы» по [Napoli et al., 2025]). Анализ газовой фазы позволяет сделать вывод о том, что в осадках станции наблюдается мощный подток газообразных, а также легких жидких углеводородов, что характеризует структуру как зону фокусированной флюидной разгрузки из недр осадочно-породного чехла. На полученных в экспедиции данных СВР выделяется разрывное взбросовое нарушение с малыми амплитудами смещения, которое может выступать в качестве канала миграции не только флюидов, но и существенного объема минерального вещества, даже со значительных глубин осадочного разреза, таким образом определяя грязевулканическую природу обнаруженных объектов.

Для более обоснованного определения генезиса описанных структур запланировано выполнение аналитических исследований отобранных образцов отложений, слагающих куполообразные постройки и вмещающих. Будут определены гранулометрический и минеральный составы, проведены микротомографические исследования, а также исследования в шлифах и под электронным микроскопом.

Финансирование. Работа выполнена 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», а также тематикой работ Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

Кохан А.В., Еременко Е.А., Мороз Е.А., Ермаков А.В., Соколов С.Ю. Флюидогенный рельеф на шельфах морей Арктики // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. Т. 79. № 2. С. 91–107. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8

Смирнов Ю.Ю., Матвеева Т.В., Щур Н.А., Щур А.А., Бочкарев А.В. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на Евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 5. С. 38–59. doi: 10.15372/KZ20240504

Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G. Distribution of subsea permafrost (frozen ground) in the Laptev Sea based on seismic refraction data // Arctic: Ecology and Economy. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 501–515. doi: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515

Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // Scientific Data. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 176. doi: 10.1038/s41597-020-0520-9

Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. Sea-level evolution of the Laptev Sea and the East Siberian Sea since the last glacial maximum: Impact of glacial isostatic adjustment // *Arktos*. 2015. Vol. 1. No. 1. P. 1. doi: 10.1007/s41063-015-0004-x

Napoli S., Spatola D., Casalbore D., Lombardo L., Tanyas H., Chiocci F.L. Comprehensive global inventory of submarine mud volcanoes // Scientific Data. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 382. doi: 10.1038/s41597-025-04726-1

NATURE OF THE DOME-LIKE MOUNDS OF THE LAPTEV SEA FLOOR MICRO-SCALE MORPHOLOGY (RESULTS OF THE TTR-24 EXPEDITION)

Aksenov A.O.^{1,2,3}, Rybalko A.E.^{2,4}, Ryabchuk D.V.¹, Poludetkina E.N.⁵, Kotochkova Yu.A.⁵, Potemka A.K.^{5,6}, Tokarev M.Yu.⁵, Akhmanov G.G.⁵

¹ Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

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

³ Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

⁴ VNIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁶ LMSU Seismic Data Analysis Center, Moscow, Russia

During the TTR-24 cruise of the UNESCO–MSU Floating University in the Laptev Sea, atypical seafloor landforms were discovered, represented by isolated dome-shaped mounds 1–2 m high. In the area where these features were observed, comprehensive geological and geophysical investigations were carried out. As a result, the morphology and internal structure of these landforms, as well as the composition of the sediments, were examined. Seismic and hydroacoustic data, along with sediment composition and texture, were interpreted. The gas phase of the sediments was analyzed. Two alternative hypotheses are proposed regarding the origin of these mounds. The one related to permafrost evolution and the other of mud volcanic genesis are under consideration. Future studies are planned.

Keywords: *The Laptev Sea, TTR, Subaqueous geomorphology, High-Resolution Seismics, Subbottom Profiling, Multibeam Echosounding, Sediment Coring, Fluidogenic Landforms, Pingo-Like Structures, Mud Volcanism*

REFERENCES:

Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G. Distribution of subsea permafrost (frozen ground) in the Laptev Sea based on seismic refraction data // *Arctic: Ecology and Economy*. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 501–515. doi: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515

Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // Scientific Data. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 176. doi: 10.1038/s41597-020-0520-9

Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. Sea-level evolution of the Laptev Sea and the East Siberian Sea since the last glacial maximum: Impact of glacial isostatic adjustment // *Arktos*. 2015. Vol. 1. No. 1. P. 1. doi: 10.1007/s41063-015-0004-x

Kokhan A.V., Eremenko E.A., Moroz E.A., Ermakov A.V., Sokolov S.Yu. Fluidogenic Landforms on the Arctic Shelves // *Lomonosov Geography Journal*. 2024. Vol. 79. No. 2. P. 91-107. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8

Napoli S., Spatola D., Casalbore D., Lombardo L., Tanyas H., Chiocci F.L. Comprehensive global inventory of submarine mud volcanoes // Scientific Data. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 382. doi: 10.1038/s41597-025-04726-1

Smirnov Yu.Yu., Matveeva T.V., Shchur N.A., Shchur A.A., Bochkarev A.V. Numerical Modelling of Submarine Permafrost on the Eurasian Arctic Shelf Considering Modern Climate Zonality // *Kriosfera Zemli*. 2024. Vol. 28. No. 5. P. 38-59. doi: 10.15372/KZ20240504