



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛАБО КОНСОЛИДИРОВАННЫХ МОРСКИХ ОСАДКОВ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ TTR-24

✉ Дернова А.С.¹, Аксенов А.О.^{2,3,4}, Пирогова А.С.¹, Пухов Т.Д.¹, Ошкин А.Н.¹

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

² ФГБУ «Институт Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

³ СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ azya98@ya.ru

В работе приведены предварительные результаты ультразвуковых исследований слабо консолидированных морских осадков, отобранных в экспедиции TTR-24 на шельфе Карского и Лаптевых морей. Ультразвуковые измерения сопоставлены с результатами литологического описания, инженерных исследований физико-механических свойства, а также с данными акустического профилирования, что позволило на качественном уровне связать скорости с характеристиками осадков. Медианные значения скорости продольных волн составляют 1.57–1.70 км/с, увеличиваясь в более плотных осадках.

Ключевые слова: *ультразвуковые исследования, акустическое профилирование, Карское море, море Лаптевых, слабо консолидированные морские отложения*

Введение. Возрастающая потребность в освоении месторождений углеводородов на арктическом шельфе России обуславливает необходимость комплексного изучения инженерно-геологических характеристик морских осадков. Особое значение приобретает исследование строения и свойств верхней части геологического разреза, представленной современными и позднечетвертичными морскими слабо консолидированными отложениями. Изучение свойств и пространственной изменчивости слабо консолидированных отложений верхней части разреза является важнейшей задачей при инженерно-геологических и геотехнических исследованиях арктического шельфа.

Ультразвуковые исследования (выше 20 кГц) являются одним из способов получения значений скоростей упругих волн в осадках. В рамках экспедиции TTR24 на НИС «Академик Борис Петров» в Карском море и море Лаптевых гравитационные трубки вскрывали донные отложения, представленные мягкими водонасыщенными илами, тонкодисперсными глинами, песчано-илистыми разностями и уплотненными алевропелитами. Донные осадки характеризуются высокой пористостью и низкой степенью уплотнения.

Опубликованные исследования показывают, что скорости упругих продольных волн в слабо консолидированных морских осадках обычно изменяются в диапазоне 1450–1650 м/с и хорошо коррелируют с пористостью и гранулометрическим составом. Например, Li et al. [2023] получили значения в диапазоне 1460–1615 м/с для илов и глин Южно-Китайского моря; Orsi & Dunn [1991] отмечали разброс 1490–1736 м/с для гляцио-морских отложений Баренцева моря; Wang et al. [2018] наблюдали около 1470 м/с в илах. Несмотря на различия между регионами, тенденция сохраняется: рост пористости ведет к снижению скорости, тогда как уплотнение и укрупнение зерен – к её увеличению.

Расположение района работ и фактический материал. На Северо-Карском полигоне было выполнено 1970.3 погонных километров акустического профилирования, а также отобрано 15 ударно-гравитационных труб, из которых две были взяты в качестве дублирующих (рис. 1). Дублирующая трубка TTR24-AR-571G_2 была отобрана на полигоне работ «Самойлович», TTR24-AR-578G_2 – на полигоне «Лима». На дублирующих трубках были выполнены ультразвуковые исследования. Согласно геоморфологической карте [Государственная..., 2011a] и карте четвертичных отложений [Государственная..., 2011b], станция TTR24-AR-571 расположена на шельфовой равнине

в зоне распространения морских отложений голоцена а 578G_2 – на ледниковом плато в зоне распространения ледниково-морских отложений сартанского горизонта верхнего неоплейстоцена.

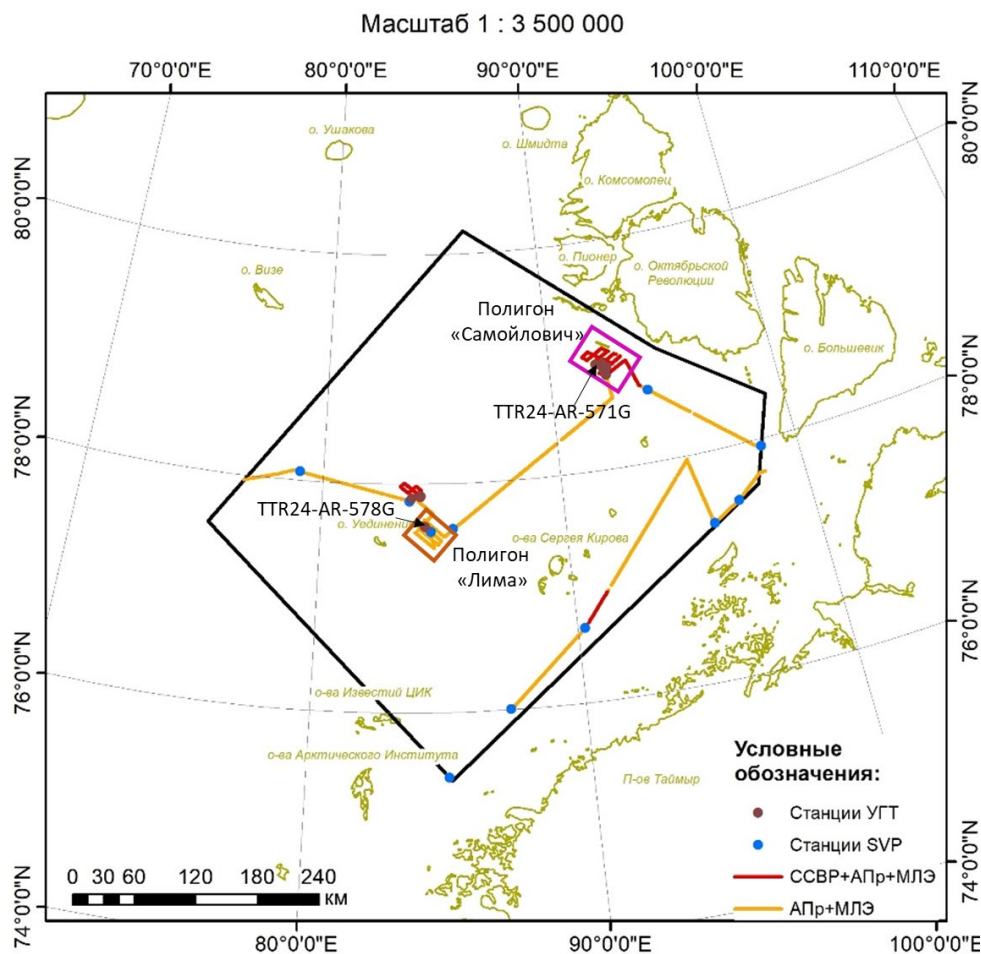


Рис. 1. Схема фактического материала полигона работ "Северо-Карский". Коричневыми точками показаны станции пробоотбора ударными гравитационными трубками (УГТ), синими точками – станции, на которых выполнялась запись профиля скорости звука (SVP), красными линиями показаны профили сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР), желтыми – профили акустического профилирования (АПР) и многолучевого эхолотирования (МЛЭ), черной рамкой обозначен полигон исследований в Карском море

Методика и аппаратура ультразвуковых исследований

При проведении ультразвуковых исследований была использована следующая аппаратура: генератор тока, 2 пьезоэлектрических датчика продольных волн, осциллограф и компьютер (рис. 2). Измерение скорости распространения упругих волн проводилось методом прямого просвечивания вдоль трубки через каждые 5 см, при котором датчики располагались друг напротив друга (рис. 3).

Результаты работ. На рисунках ниже (рис. 5 и 6) представлены разрезы акустического профилографа с отмеченными положениями станций пробоотбора, а также профили скорости звука, полученные для отобранных колонок донных отложений. Поскольку станции TTR24-AR-571G_2 и TTR24-AR-578G_2 не вскрывались на борту НИС «Академик Борис Петров», в настоящее время есть описание только вскрытых дублей (TTR24-AR-571G_1 и TTR24-AR-578G_1), для которых также были проведены измерения физико-механических свойств и магнитной восприимчивости (рис. 4).

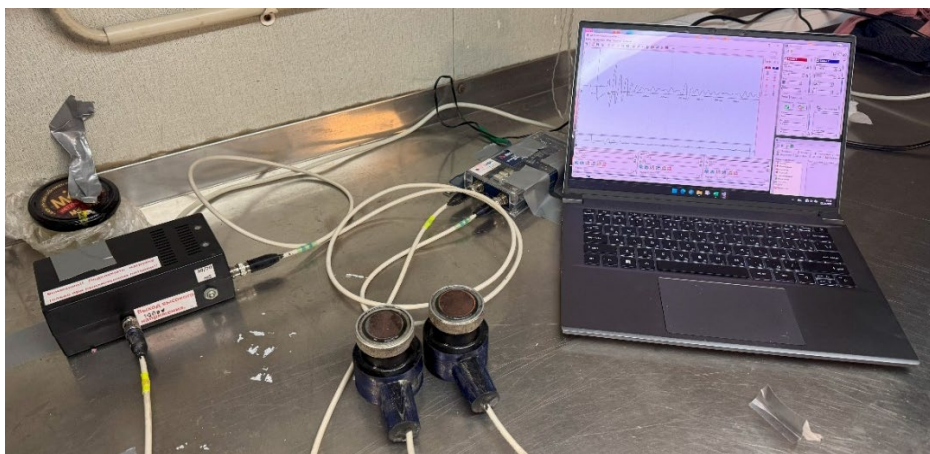


Рис. 2. Используемая аппаратура.

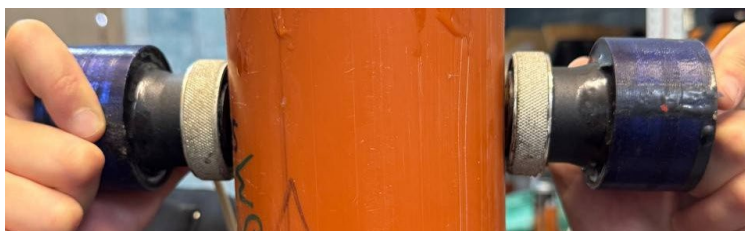


Рис. 3. Пример расположения датчиков при измерениях на трубке.

Мощность вскрытых осадков в станции TTR24-AR-571G_1 составила 243 см. Согласно литологическому описанию, проведенному в бортовой лаборатории, колонка представлена песчано-пелитовыми алевритами и алевропелитами, в которых с увеличением глубины растет количество стяжений гидротроилита. Интервал 184-243 см представлен более песчанистыми, по сравнению с вышележащим слоем, алевропелитами. Увеличение песчаности отражается на графике плотности и сопротивления сдвигу – значения этих параметров в интервале плавно возрастают (рис. 4). Также можно видеть увеличение значений магнитной восприимчивости (рис. 4), что в совокупности может говорить о том, что этот интервал вскрыл более древние отложения, предположительно верхнего неоплейстоцена-раннего голоцена (III^{sr}-H¹). На профиле скорости звука станции TTR24-AR-571G_2 (рис. 5) наблюдается увеличение скорости на глубине от 150 см и ниже – в этом интервале медианное значение устанавливается на уровне 1.6 км/с, тогда как в верхнем интервале – 1.55 км/с.

Станция TTR24-AR-578G_1 сложена алевритами, глинистыми и песчаными, общая мощность колонки составила 85 см. Осадок обладает большим сопротивлением на сдвиг: максимальное значение этого параметра на станции TTR24-AR-578G_1 составляет 10 кПа, тогда как на станции TTR24-AR-571G_1 – 8 кПа. Скорость звука на дублирующей станции TTR24-AR-578G_2 также выше – медианное значение здесь составляет 1.7 км/с (рис. 6). В интервале 45-55 см наблюдается уменьшение скорости, что предположительно связано с уменьшением песчаной составляющей в осадке, аналогично интервалу глубин 6-24 см в станции TTR24-AR-578G_1, сложенному глинистым алевритом. Также можно видеть корреляцию таких параметров, как прочность на сдвиг и магнитная восприимчивость.

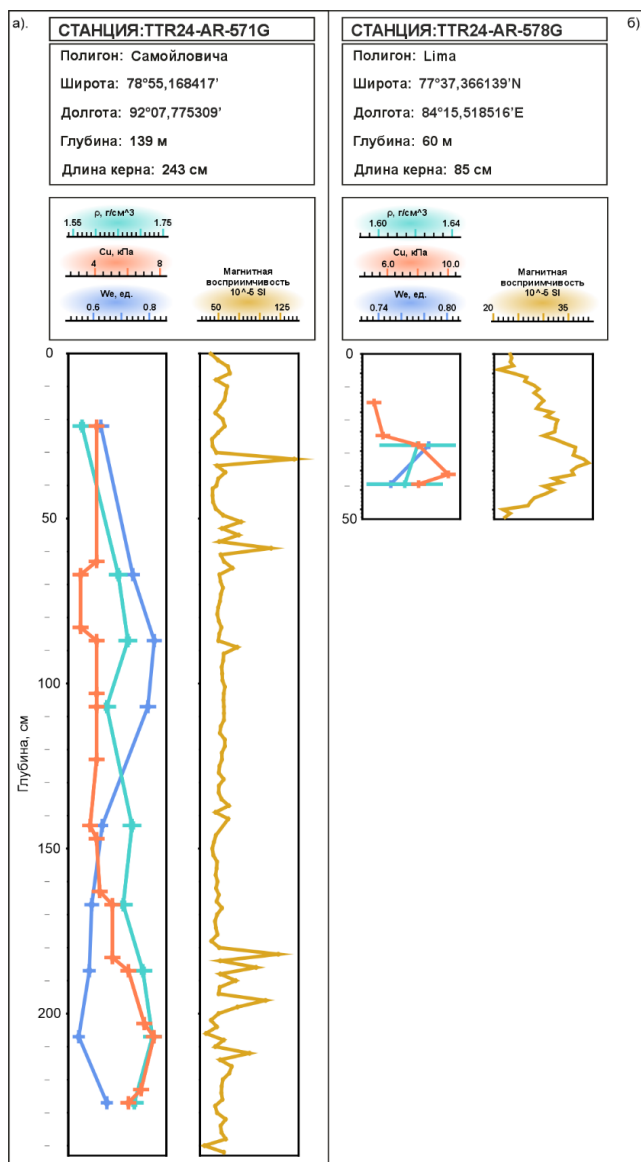


Рис. 4. Результаты измерений физико-механических свойств и магнитной восприимчивости на колонках 571G_1(а) и 578G_1(б). Зеленым цветом показана кривая плотности, оранжевым – прочности, синим – влажности, желтым – магнитной восприимчивости.

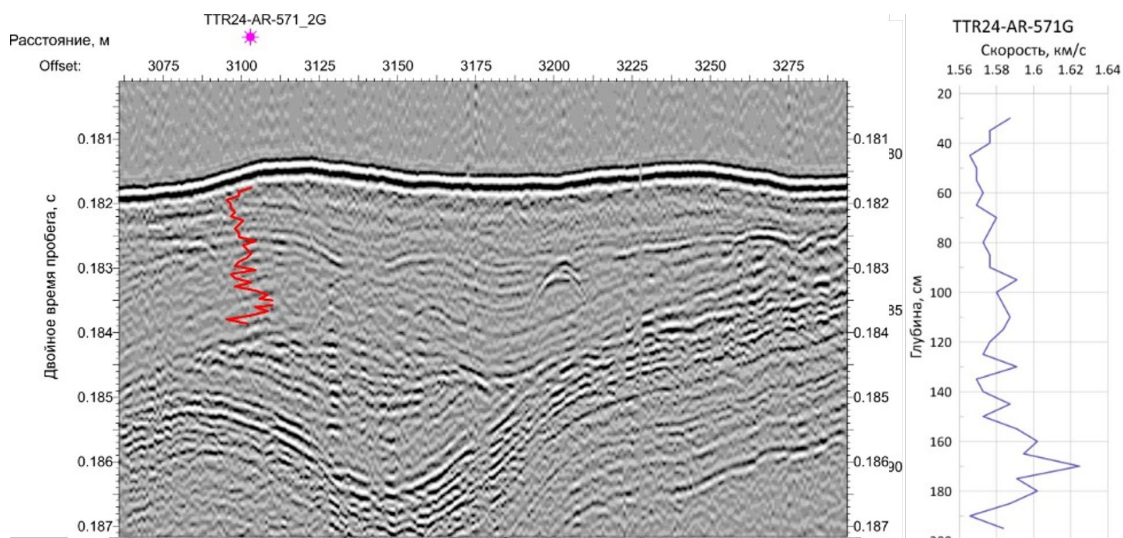


Рис. 5. Положение станции TTR24-AR-571G_2 на разрезе АПр (слева) и профиль скорости звука по гравитационной трубке (справа). Красным на разрезе показан профиль скорости звука.

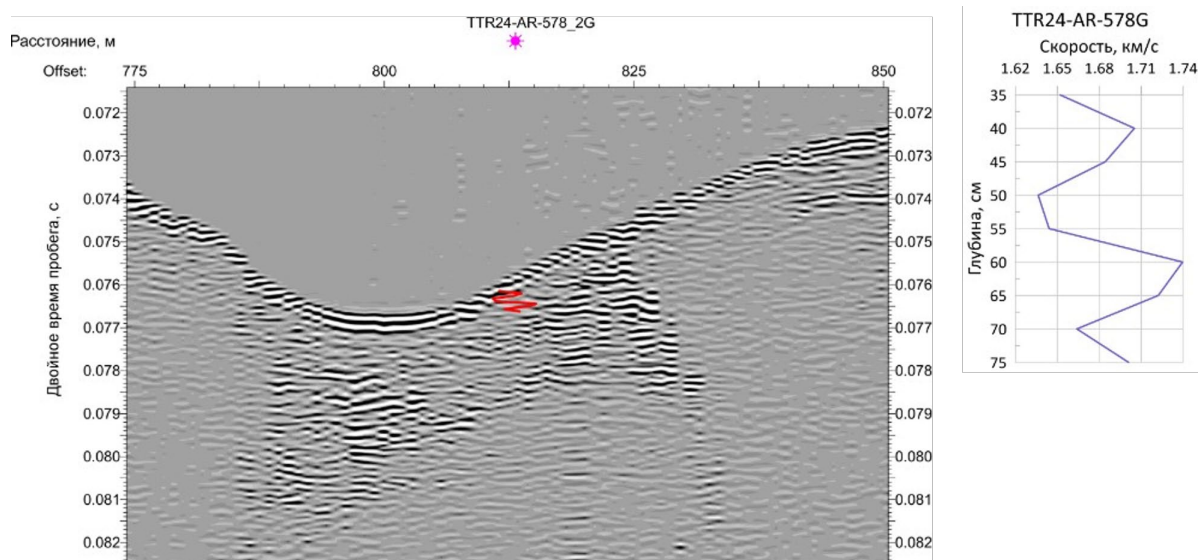


Рис. 6. Положение станции TTR24-AR-578G_2 на разрезе АПр (слева) и профиль скорости звука по гравитационной трубке (справа). Красным на разрезе показан профиль скорости звука.

На рисунке 7 представлены результаты сейсмостратиграфической интерпретации разреза АПр. Границы были проведены по угловому несогласию и по отличиям волновых картин для сейсмокомплексов. Выделенные комплексы скоррелированы с описанными выше слоями станции TTR24-AR-571G_1. Первый сейсмокомплекс (СК 1) характеризуется волновой картиной с субпараллельными слабо выраженными по амплитудам отражениями. В СК 1 фиксируются множественные дифракции. Ему соответствует интервал колонки 0-90 см, в котором значения сопротивления сдвига для отложений составляют до 5 кПа, а плотность – до 1.65 г/см³. Волновая картина второго выделенного комплекса (СК 2) представлена так же субпараллельными слабоамплитудными отражениями; встречаются интенсивные дифракторы. В интервале колонки 90-247 см на станции TTR24-AR-571G_1 отложения характеризуются значениями плотности до 1.75 г/см³, сопротивление сдвигу повышается до 8 кПа. Нижележащий комплекс, на сейсмических разрезах сопоставимый с СК 3, не был вскрыт гравитационной трубкой. СК 3 характеризуется волновой картиной с субпараллельными слабо выраженными по амплитудам отражениями, отделяется от СК 2 по границе стратиграфического несогласия.

Выводы. Полученные результаты ультразвуковых исследований позволяют составить предварительную основу для стратификации изученных донных отложений. В начале послеледниковой трансгрессии (сартанский горизонт, МИС 2) в акваторию центральной части Карского моря поступало большое количество терригенного материала [Stein et al., 2004]. В ходе дальнейшего подъема уровня моря происходило смещение области аккумуляции осадков на юг. Это отражается в изменении физических свойств осадка с глубиной: в колонке TTR-AR-571G_1 мы наблюдаем увеличение размерности частиц, сопротивления сдвигу, плотности с глубиной; для станции TTR-AR-571G_2 было зафиксировано увеличение скорости звука с глубиной. На основе этих данных возраст интервала 0-90 см предположительно определяется как средне-верхнеголоценовый (H²⁻³); возраст нижней части осадка предположительно определяется как верхнеоплейстоценовый-нижнеголоценовый (III^{sr}-H¹). Физические свойства отобранных осадков на станциях TTR24-AR-578G_1 и TTR24-AR-578G_2 характеризуются повышенными значениями физико-механических свойств и скорости звука, вследствие чего возраст исследуемых осадков предположительно интерпретируется как III^{sr}-H¹.

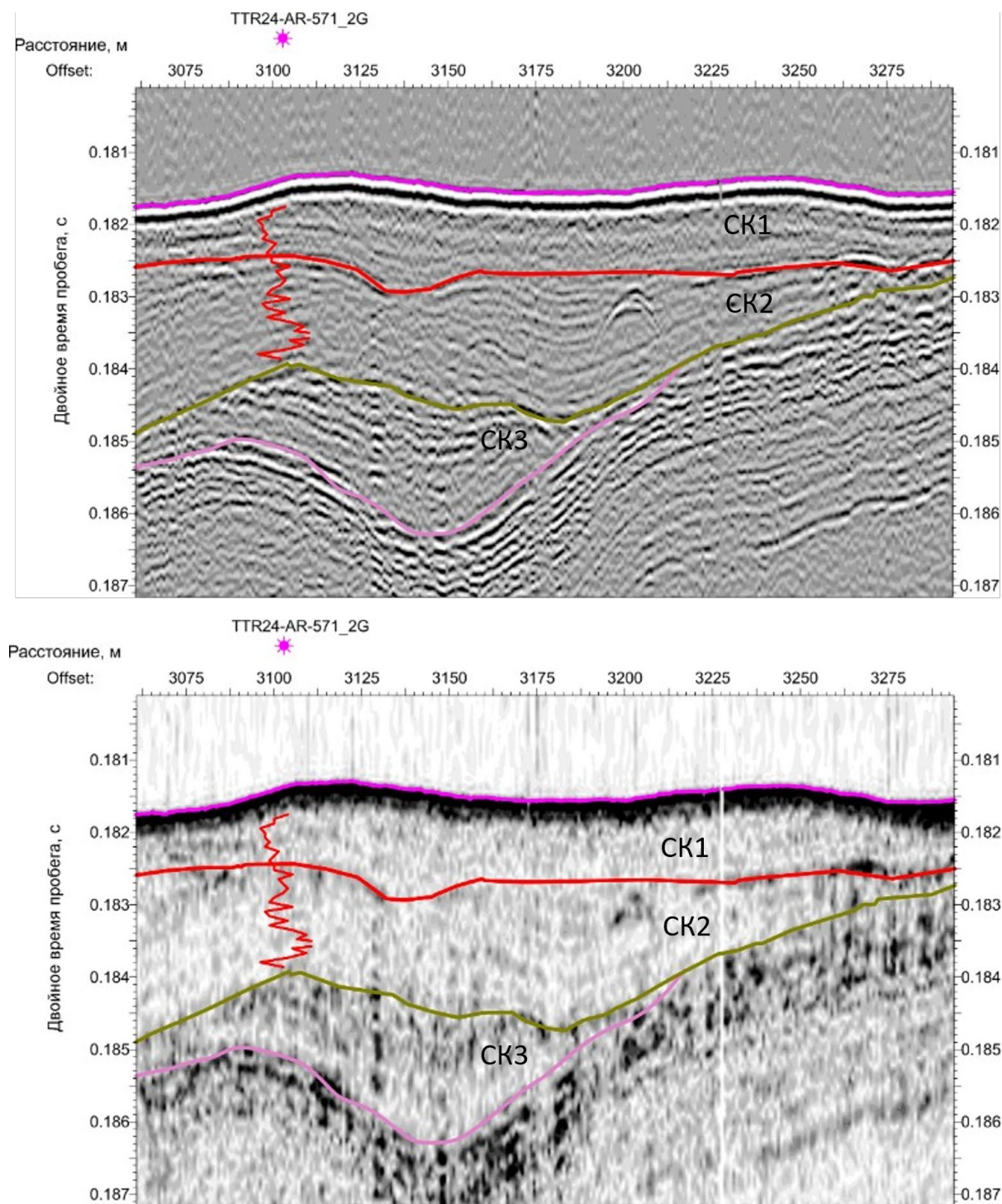


Рис. 7. Разрез АПр, проходящий через станции проботоотбора TTR24_571_2G в амплитудах (сверху) и в огибающей (снизу). Красным на разрезах показан профиль скорости звука.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2025-662/8).

ЛИТЕРАТУРА

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Северо-Карско-Баренцевоморская серия. Геоморфологическая карта. Лист Т-45-48. М. Челюскин. / Под ред. А.А. Макарьева, Е.М. Макарьевой. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2 л.) 2011.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Северо-Карско-Баренцевоморская серия. Карта четвертичных

образований. Лист Т-45-48. М. Челюскин. / Под ред. А.А. Макарьева, Е.М. Макарьевой. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2 л.) 2011.

Li G., Wang J., Meng X., Hua Q., Kan G., Liu C. Seafloor sediment acoustic properties on the continental slope in the northwestern South China Sea // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 12. Is. 4, 545. doi:10.3390/jmse12040545

Orsi T.H., Dunn D.A. Correlations between sound velocity and related properties of glacio-marine sediments: Barents Sea // *Geo-Marine Letters*. 1991. Vol. 11. Is. 3. P. 129–133. doi:10.1007/BF02431033

Wang J., Guo C., Liu B., Hou Z., Han G. Distribution of geoacoustic properties and related influencing factors of surface sediments in the southern South China Sea // *Marine Geophysical Research*. 2016. Vol. 37. Is. 2. P. 181–195. doi:10.1007/s11001-016-9294-z

Stein R., Dittmers K., Fahl K., Kraus M., Matthiessen J., Niessen F., Pirrung M., Polyakova Ye., Schoster F., Steinke T., Fütterer D.K. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. No.11–13. P. 1485–1511. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.004

PRELIMINARY RESULTS OF SCIENTIFIC ULTRASONIC STUDIES OF UNCONSOLIDATED MARINE SEDIMENTS OF THE ARCTIC SHELF BASED ON TTR-24 EXPEDITION DATA

Dernova A.S.¹, Aksenov A.O.^{2,3,4}, Pirogova A.S.¹, Puhov T.D.¹, Oshkin A.N.¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁴Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Preliminary results of ultrasonic studies of unconsolidated marine sediments collected during the TTR-24 expedition on the shelf of the Kara and Laptev seas are presented. Ultrasonic measurements were compared with lithological descriptions, engineering studies of physical-mechanical properties, and sub-bottom profiling data, which made it possible to qualitatively relate acoustic velocities to sediment characteristics. Median P-wave velocities range from 1.57 to 1.70 km/s, increasing with density of the sediments.

Keywords: *ultrasonic studies, sub-bottom profiling, Kara Sea, Laptev Sea, unconsolidated marine sediments*

REFERENCES:

State Geological Map of the Russian Federation. Geomorphological Map: Sheets T-45–48, Scale 1:1,000,000. St. Petersburg: Rosnedra, 20113.

State Geological Map of the Russian Federation. Quaternary Deposits Map: Sheets T-45–48, Scale 1:1,000,000. St. Petersburg: Rosnedra, 2011.

Li G., Wang J., Meng X., Hua Q., Kan G., Liu C. Seafloor sediment acoustic properties on the continental slope in the northwestern South China Sea // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 12. Is. 4, 545. doi:10.3390/jmse12040545

Orsi T.H., Dunn D.A. Correlations between sound velocity and related properties of glacio-marine sediments: Barents Sea // *Geo-Marine Letters*. 1991. Vol. 11. Is. 3. P. 129–133. doi:10.1007/BF02431033

Wang J., Guo C., Liu B., Hou Z., Han G. Distribution of geoacoustic properties and related influencing factors of surface sediments in the southern South China Sea // *Marine Geophysical Research*. 2016. Vol. 37. Is. 2. P. 181–195. doi:10.1007/s11001-016-9294-z

Stein R., Dittmers K., Fahl K., Kraus M., Matthiessen J., Niessen F., Pirrung M., Polyakova Ye., Schoster F., Steinke T., Fütterer D.K. Arctic (palaeo)-river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. No.11–13. P. 1485–1511. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.004