

Problems and Prospects of Seismoacoustic Profiling for Bottom Sediments Stratigraphy Studies, Sedimentary Cover Rocks and Submarine Permafrost Investigations on The Arctic Shelf

E.A. Gusev¹, V.A. Gladyshev¹, E.A. Zylov¹, D.E. Artemieva¹, D.M. Urvantsev¹, D.A. Gorbunov¹

¹ VNIIOkeangeologia

Summary

The article discusses the problems of interpreting the stratigraphy and the genesis of sediments based on seismoacoustic data. Carrying out seismoacoustic studies on the shelf of the Arctic seas made it possible to study the structure of the upper horizons of the sedimentary cover, to identify neotectonic faults, and also to reveal the features of the distribution of submarine permafrost. The results obtained have shown the effectiveness of seismoacoustic studies in areas of a simple structure of the sedimentary cover, not affected by active tectonic movements or permafrost processes. The study of the areas of distribution of submarine permafrost requires expensive drilling operations, which make it possible to correctly estimate the age and genesis of sediments.

Проблемы и перспективы использования сейсмоакустических данных в изучении стратиграфии донных отложений, пород осадочного чехла и многолетнемерзлых образований арктического шельфа

Е.А. Гусев*, В.А. Гладыш, Е.А. Зыков, Д.Е. Артемьева, Д.М. Урванцев, Д.А. Горбунов
(ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Введение

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование входит в перечень основных методов геологической съемки шельфа, а также используется в научных исследованиях и при инженерно-геологических изысканиях. Применяются низко- и высокочастотные источники, а также различные аппаратные комплексы. При профилировании с использованием спаркера на арктическом шельфе мы получаем сведения о строении верхних горизонтов осадочного чехла на глубину его мощности от 20-30 до 700 м. Удастся выявить структуру кайнозойских, мезозойских, а иногда и палеозойских пород, если они относительно слабо нарушены пликативными (с углами наклона рефлекторов не более 15-20°) и дизъюнктивными нарушениями.

Глубины проникновения сигнала при сейсмоакустическом профилировании далеко не всегда хватает для сопоставления с сейсмическими разрезами, получаемыми методами МОВ ОГТ. Поэтому исследователи сталкиваются с проблемой освещения разреза в интервале глубин от ~20 до ~500 м ниже поверхности морского дна. Сейсмоакустические данные используются для геологического картирования шельфа, для установления стратиграфии осадочного чехла и его вещественного состава, для выявления и прослеживания тектонических нарушений.

Данные и методы

Для анализа использованы данные геологической съемки арктического шельфа, выполненной в 1998-2020 гг. силами ОАО «МАГЭ» (г. Мурманск), АО «ПМГРЭ» (г. Ломоносов) и ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (г. Санкт-Петербург). Методами геологической съемки являются низко- и высокочастотное сейсмоакустическое профилирование (спаркер, бумер, профилограф), гидролокация бокового обзора, многолучевое эхолотирование, донный пробоотбор дночерпателями, боксерами, грунтовыми трубками, а также установками для неглубокого бурения с борта судна и для бурения с понтонов или со льда.

Геолого-геофизические материалы, получаемые при геологической съемке шельфа, аккумулируются и систематизируются в банках данных, сопровождающих листы Государственной геологической карты РФ масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000, размещенных на официальном сайте Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского («ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург) по адресу: www.vsegei.ru. Кроме перечисленных материалов, для интерпретации геофизических данных привлекаются результаты инженерно-геологических исследований, проведенных на арктическом шельфе силами АО «АМИГЭ» (г. Мурманск), а также материалы научных исследований на шельфе, осуществляемых институтами РАН и по международным проектам. Нами проведен анализ всех этих материалов по возможности использования сейсмоакустических данных для расшифровки геологической структуры, тектоники и палеогеографии арктического шельфа.

Результаты

Изучение сейсмоакустических данных, полученных для разных геологических условий, показывает возможности и ограничения их использования для геологической интерпретации. В Арктических морях наиболее эффективно использование сейсмоакустического

профилирования в Баренцевом и Чукотском морях. Глубины в Баренцевом море определяют положение первого кратного отражения на разрезах ниже области затухания отражений, поэтому верхняя часть разрезов не замаскирована кратными волнами. Кроме того, разрез осадочного чехла не замаскирован рассеивающим действием пород и осадков, находящихся в мерзлом состоянии (рис. 1).

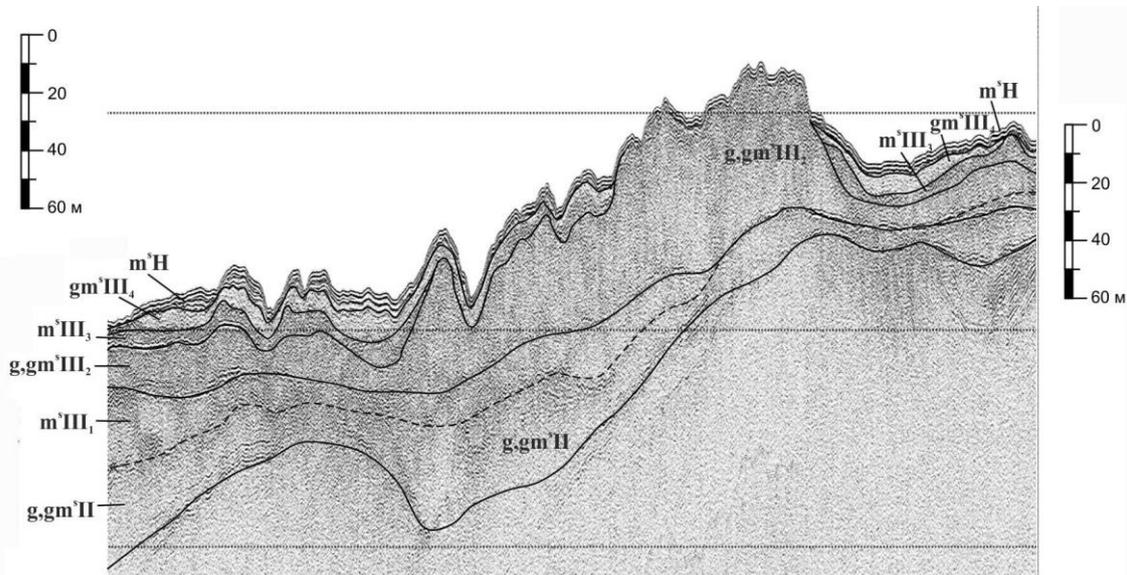


Рисунок 1. Фрагмент сейсмоакустического профиля, выполненного в приновоземельской части Баренцевского шельфа и его возрастная и генетическая интерпретация.

В Чукотском море, несмотря на его мелководность в южной части, удастся получить информативные разрезы с глубиной освещения разреза до 1 секунды двойного времени. Верхние комплексы осадочного чехла здесь разбурены неглубокими скважинами, вскрывшими неогеновые и морские голоценовые осадки (Gusev et al., 2009).

Гораздо сложнее ситуация с опознаванием структур и прослеживанием отражающих горизонтов на сейсмоакустических профилях, полученных в море Лаптевых, а также в южной и центральной частях Карского моря. Очень слабоинформативными являются сейсмоакустические профили в море Лаптевых, где субаквальная мерзлота не позволяет сигналу проникать ниже подошвы голоценовых морских осадков. В редких случаях ниже подошвы голоценового комплекса удастся идентифицировать позднеплейстоценовые ритмично-слоистые озерные отложения, заполняющие палеотермокарстовые озерные впадины (Rekant et al., 2015). Некоторые неотектонические нарушения на Лаптевском шельфе фиксируются на сейсмических профилях МОВ ОГТ, сейсмоакустических профилях и данных профилографа (Рекант и Гусев, 2009; Колубакин и др., 2016; Баранов и др., 2018).

На приямальском шельфе Карского моря структура сейсмической записи осложнена многолетнемерзлыми структурами, при этом чаще всего не удастся определить элементы залегания и положение границ разновозрастных комплексов. Притаймырская часть Карского шельфа также сложна для интерпретации сейсмоакустических профилей, т.к. здесь на мелководье также развита субаквальная мерзлота, маскирующая картину. В частности, здесь трудно отличить акустически прозрачные породы складчатого фундамента от похожих по стилю записи мерзлых кайнозойских пород. В частности, у полуострова Михайлова на западном Таймыре силами ЦАГРЭ в начале 1990-ых годов пробурены скважины, глубиной до 100 м, которые вскрыли мерзлые и оттаявшие суглинки, супеси и сложные миктиты. Вместе с тем, в основном на сейсмоакустических профилях, подходящих к берегам полуострова, не выделяется никаких комплексов ниже подошвы голоценовых осадков. К примеру, на профиле 11, подходящем к Таймырскому полуострову, практически ничего не видно (рис. 2). Если бы тут не было буровых скважин, акустически прозрачную часть сейсмической записи ниже

морского голоцена можно было бы принять за породы складчатого фундамента. Тем не менее, на соседнем профиле 12, отстоящем от предыдущего на 23 км, можно выделить комплексы, по мощности сопоставимые вскрытому скважинами разрезу рыхлого чехла на суше и на мелководье (рис. 2). Очевидно, это связано с островным характером распространения субаквальной мерзлоты на притаймырском мелководье Карского шельфа (Gavrilov et al., 2020), маскирующей разрез на сейсмоакустических профилях.

Наибольшим опытом по идентификации многолетнемерзлых пород на материалах сейсмоакустического профилирования обладает АО «АМИГЭ» (г. Мурманск), сотрудники которого выполняют не только геофизические исследования, но и имеют возможность заверки своих построений буровыми данными. По данным (Рокос и др., 2019), в Карском море вблизи устьев крупных рек мерзлота в значительной степени деградировала и там развиты сквозные талики. Субаквальная мерзлота распространена в узких прибрежных зонах и в виде локальных островных массивов и представлена осадками с отрицательными температурами, твердомерзлыми грунтами с ледяными прослоями и шлирами.

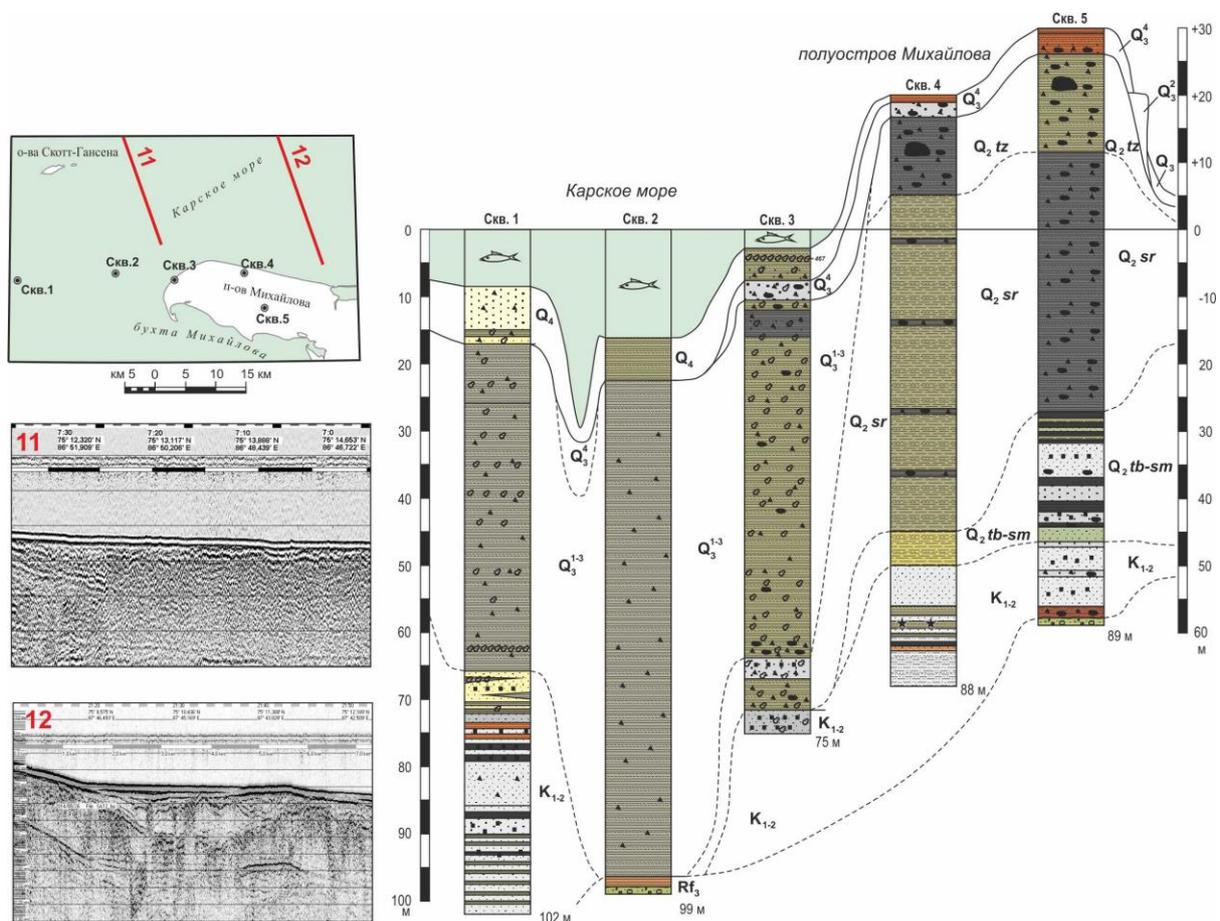


Рисунок 2. Фрагменты сейсмоакустических профилей и неглубокие скважины в районе полуострова Михайлова (карское побережье Таймыра).

В северной части Карского шельфа, в частности, в желобе Воронина и вокруг островов Северной Земли на сейсмоакустических профилях уверенно распознаются слабоскладчатые палеозойские образования, перекрытые горизонтально залегающими мезозойскими и кайнозойскими комплексами (Гайнанов и др., 2005; Гусев и др., 2020). Палеозойские толщ сматы в открытые складки и нарушены разломами. Однако глубина освещения разреза на сейсмоакустических профилях здесь невелика и измеряется в пределах десятков метров. В 2020 г. НК «Роснефть» провела буровые работы в этом районе, был подтвержден палеозойский возраст толщ, идентифицируемых на сейсмоакустических профилях.

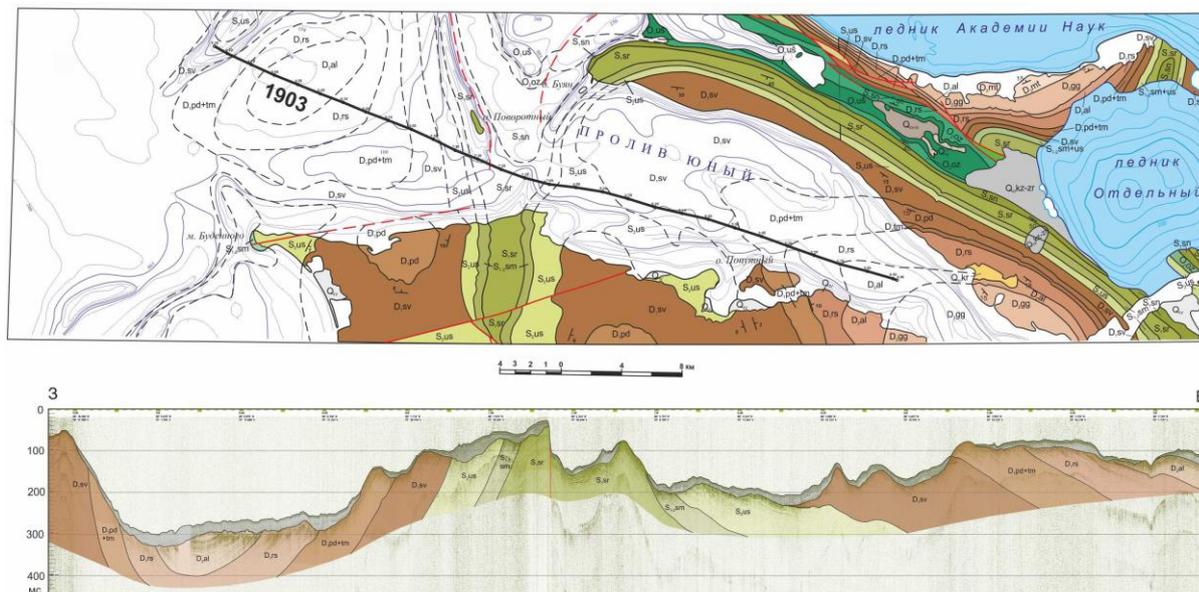


Рисунок 3. Сейсмоакустический профиль 1903 по проливу Юный, архипелаг Северная Земля.

На шельфе Восточно-Сибирского моря до недавнего времени почти не было сейсмоакустических профилей. В его прибрежной части в 2018 году силами ВСЕГЕИ было проведено сейсмоакустическое профилирование, интерпретация которого вместе с корреляцией данных по материковой суши позволило закартировать на шельфе разрывные нарушения и расчленил осадочный разрез на сеймокомплексы. На мелководье вокруг островов Новосибирского архипелага мерзлое состояние осадочного чехла не дает полного представления о его строении, тем не менее, сейсмоакустические материалы позволили интерпретировать аккумулятивные и структурные гряды, окаймляющие берега островов и материковой суши (Сергеев и др., 2020).

Выводы

Проведение сейсмоакустических исследований на шельфе арктических морей позволило изучить строение верхних горизонтов осадочного чехла, закартировать и проследить разрывные нарушения, в том числе и новейшие, а также выявить особенности распространения субаквальной мерзлоты. Полученные результаты показали эффективность сейсмоакустических исследований в районах простого строения осадочного чехла, не затронутого активными тектоническими движениями, или мерзлотными процессами. Изучение районов распространения субаквальной мерзлоты требует дорогостоящих буровых работ, позволяющих верно оценить возраст и генезис развитых там образований.

Перспективы сейсмоакустических исследований на арктическом шельфе связаны с необходимостью изучения районов внешней части шельфа вблизи его бровки и на континентальных склонах для решения проблем делимитации границ в Арктике. Традиционно будут востребованы сейсмоакустические исследования также для определения инженерно-геологических характеристик разреза в местах промышленного освоения арктического шельфа. Новое направление исследований, где также используются эти методы – это мониторинг экологического состояния геологической среды и оценка геологических опасностей. Определенные перспективы для интерпретации данных, полученных в сложных сейсмогеологических условиях, связаны с развитием методов обработки сейсмоакустических данных (Гайнанов, 2019).

Библиография

1. Баранов, Б.В., Флинт, М.В., Римский-Корсаков, Н.А., Поярков, С.Г. и Дозорова, К.А. [2018] Структурные свидетельства современной активности Хатангско-Ломоносовской зоны разломов в море Лаптевых. *Доклады РАН*, **480**(3), 344-347.
2. Гайнанов, В.Г., Поляк, Л.В., Гатауллин, В.Н. и Зверев, А.С. [2005] Сейсмоакустические исследования следов покровных оледенений в Карском море. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, **1**, 38-44.
3. Гайнанов В.Г. [2019] *Методы сейсмоакустических исследований на акваториях*. ООО «ЕАГЕ Геомодель». Москва.
4. Гусев, Е.А., Крылов, А.А., Урванцев, Д.М., Горемыкин, Ю.В. и Криницкий, П.И. [2020] Геологическое строение северной части Карского шельфа у архипелага Северная Земля по результатам последних исследований. *Записки Горного Института*, **245**, 505-512.
5. Коллюбакин, А.А., Миронюк, С.Г., Росляков, А.Г., Рыбалко, А.Е., Терехина, Я.Е. и Токарев, М.Ю. [2016] Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых. *Инженерные изыскания*, **10-11**, 38-51.
6. Рекант, П.В. и Гусев, Е.А. [2009] Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования. *Проблемы Арктики и Антарктики*, **2**, 85-94.
7. Рокос С.И., Костин Д.А., Куликов С.Н. [2019] Субаквальные многолетнемерзлые породы Обской и Тазовской губ Карского моря. *Криосфера Земли*, **23**(5), 17-26.
8. Сергеев, А.Ю., Буданов, Л.М., Ковалева, О.А., Рябчук, Д.В. и Неевин, И.А. [2020] Особенности геологического строения и генезиса подводных гряд шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря (обрамление о. Новая Сибирь). *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*, **7**, 198-205.
9. Gavrilov, A., Pavlov, V., Fridenberg, A., Boldyrev, M., Khilimonyuk, V., Pizhankova, E., Buldovich, S., Kosevich, N., Alyautdinov, A., Ogienko, M., Roslyakov, A., Cherbunina, M. and Ospennikov, E. [2020] The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints. *The Cryosphere*, **14**, 1857–1873.
10. Gusev, E.A., Andreeva, I.A., Bondarenko, S.A., Litvinenko, I.V., Petrova, V.I., Anikina, N.Y., Derevyanko, L.G., Iosifidi, A.G., Popov, V.V., Klyuvitkina, T.S., Polyakova, E.I. and Stepanova, A.Y. [2009] Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi sea: new results from shallow drilling and seismic-reflection profiling. *Global and Planetary Change*, **68**(2), 115-131.
11. Rekant, P., Bauch, H.A., Schwenk, T., Portnov, A., Gusev, E., Spiess, V., Cherkashov, G. and Kassens, H. [2015] Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea. *Arktos*, **1**(1)

References

1. Baranov, B.V., Flint, M.V., Rimskiy-Korsakov, N.A., Poyarkov, S.G. and Dozorova, K.A. [2018] Structural evidence of recent activity of the Khatanga–Lomonosov fault zone in the Laptev sea. *Doklady Earth Sciences*, **480**(1), 671-673.
2. Gainanov, V.G., Polyak, L.V., Gataullin, V.N. and Zverev, A.S. [2005] Seismoacoustic Investigations of Traces of Sheet Glaciation in the Kara Sea. *Moscow university geology bulletin*, **1**, 38–44.

3. Gainanov, V.G. [2019] Methods of seismic acoustic research in water areas. EAGE Geomodel. Moscow.
4. Gavrilov, A., Pavlov, V., Fridenberg, A., Boldyrev, M., Khilimonyuk, V., Pizhankova, E., Buldovich, S., Kosevich, N., Alyautdinov, A., Ogienko, M., Roslyakov, A., Cherbunina, M. and Ospennikov, E. [2020] The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints. *The Cryosphere*, **14**, 1857–1873.
5. Gusev, E.A., Andreeva, I.A., Bondarenko, S.A., Litvinenko, I.V., Petrova, V.I., Anikina, N.Y., Derevyanko, L.G., Iosifidi, A.G., Popov, V.V., Klyuvitkina, T.S., Polyakova, E.I. and Stepanova, A.Y. [2009] Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi sea: new results from shallow drilling and seismic-reflection profiling. *Global and Planetary Change*, **68**(2), 115-131.
6. Gusev, E.A., Krylov, A.A., Urvantsev, D.M., Goremykin, Yu.V. and Krynitsky, P.I. [2020] Geological structure of the northern part of the Kara Shelf near the Severnaya Zemlya archipelago according to recent studies. *Journal of Mining Institute*, **245**, 505-512.
7. Kolyubakin, A.A., Mironyuk, S.G., Roslyakov, A.G., Rybalko, A.E., Terekhina, Ya.E., Tokarev, M.Yu. [2016] Using a complex of geophysical methods to identify dangerous geological processes and phenomena on the Laptev Sea shelf. *Engineering survey*, **10–11**, 38–51.
8. Rekant, P.V. and Gusev, E.A. [2009] Features of newest tectonic movements on the Laptev Sea continental margin according to the seismoacoustic sounding. *Arctic and Antarctic Research*, **2**, 85–94.
9. Rekant, P., Bauch, H.A., Schwenk, T., Portnov, A., Gusev, E., Spiess, V., Cherkashov, G. and Kassens, H. [2015] Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea. *Arktos*, **1**(1)
10. Rokos, S.I., Kostin, D.A. and Kulikov, S.N. [2020] Subsea permafrost in the Ob and Taz bays, the Kara Sea. *Kriosfera Zemli*, **23**(5), 17-26.
11. Sergeev, A.Yu., Budanov, L.M., Kovaleva, O.A., Ryabchuk, D.V. and Neevin, I.A. [2020] Characteristics of the geological structure and genesis of underwater ridges of the East Siberian Sea shelf zone (framing of New Siberia Island). *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, **7**, 198-205.