УДК 551.465:550.347

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_01
EDN: CPKVGK

ЦИФРОВОЕ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

А.Н. Самченко, И.О. Ярощук

В работе рассмотрено создание цифровой геоакустической модели (ГАМ) геологических структур в море Лаптевых на основе имеющейся геолого-геофизической информации региона. ГАМ дна предоставляет априорные данные по акустическим характеристикам геологических сред. Цифровая ГАМ в основном используется в сейсмо- и гидроакустическом моделировании распространения сигналов в океане. В условиях шельфа и применения низкочастотных сигналов акустические характеристики дна играют основную роль в их распространении.

Изучение шельфа моря Лаптевых, расположенного в районе Крайнего Севера имеет важное научное и прикладное значение, поскольку здесь проходит Северный морской путь. В научном плане интересно исследование распространения акустических сигналов в условиях, когда имеются мощный слой льда и низкие температуры воды. Кроме того, шельф моря является перспективным нефтегазоносным районом, что обусловлено его хорошей геолого-геофизической изученностью. Собран обширный массив данных геолого-геофизических исследований такими организациями, как НИИГА ВНИИ Океанология, Севморгео, Севморгеология и другими. В акватории моря проведены все возможные сейсмические работы различными методами. Только методом общей глубинной точки пройдено более 30 тыс. км профилей.

Ключевые слова: упругие характеристики дна, сейсмоакустика, гранулометрический состав, геоакустическая модель, море Лаптевых.

Введение

Основная цель работы заключалась в создании цифровой геоакустической модели (ГАМ) реального дна шельфа в арктической зоне для дальнейшего использования в гидро- и сейсмоакустических теоретических исследованиях распространения акустического сигнала. ГАМ позволяет проводить проверку различных математических моделей распространения акустического сигнала различной частоты и конфигурации на шельфе в арктической зоне. Цифровая геоакустическая модель также помогает и в практических сейсмоакустических исследованиях [1]. Необходимо отметить, что с уменьшением частоты используемых акустических сигналов все большую роль в распространении сигнала вдоль шельфа играет дно моря [2].

Геоакустическое моделирование дна моря позволяет собрать набор акустических параметров геологических сред на основе различных прямых или косвенных измерений. Наиболее предпочтительные данные получают на основе прямых измерений физико-химических свойств горной породы керна из скважин. В случае с рыхлым осадком измерения проводятся на поднятых со дна колонках. Косвенные методы основаны на расчете акустических параметров геологической среды с помощью сейсмических исследований дна [3]. Акустические параметры рыхлых донных отложений можно рассчитать с помощью известных зависимостей упругих свойств от гранулометрического состава проб. Наиболее известная зависимость основана на пороупругой теории Био–Столла [4]. Модель Био–Столла часто используется в исследованиях и в настоящее время [5]. Например, в работе [6] показана зависимость акустических характеристик от гранулометрического и химического состава проб донных осадков. В модели Био–Столла донные осадки представляются в виде двухфазной квазиравновесной системы – насыщенного жидкостью более или менее жесткого скелета, образованного множеством контактирующих твердых частиц. Существенное влияние может оказывать присутствие в осадках газовых пузырьков. Данные модели расчета акустических характеристик рыхлых донных отложений предполагают серьезные требования к отбору проб осадков и их лабораторным исследованиям. Более простой метод определения упругих свойств предложен Е. Гамильтоном и Р. Бачманом [7, 8]. Метод основан на получении эмпирических зависимостей упругих свойств донных отложений с их гранулометрическим составом. Данный метод имеет важное преимущество в том, что можно использовать обширную базу данных ранее изученных проб донных отложений, а также провести их верификацию. Однако он имеет меньшую точность определения свойств осадка.

Существует ряд готовых решений, посвященных моделированию геологических сред, на базе созданных программных продуктов, например 3D GeoModeller [9]. В целом создание геологических 3D цифровых моделей является актуальным для различных геологических объектов [10]. В нашем случае необходимо получить набор акустических параметров, таких как плотность, скорости продольной и поперечной волн и поглощение в осадках, по глубине вдоль всего профиля. Такие данные удобно формировать и в последующем использовать для проведения моделирования в программной среде MatLab.

Объект исследования. Фактический материал

Выбранный профиль находится в арктической зоне, что обусловливает научный и практический интерес (рис. 1). Арктическая зона, и в частности море Лаптевых, является перспективным нефтегазоносным районом [11]. В связи с этим на шельфе моря Лаптевых активно проводятся геолого-геофизические исследования [12]. В исследовании геологического строения шельфа моря применялись различные виды сейсмоакустических работ, в том числе метод общей глубиной точки (МОГТ), которым пройдено более 30 тыс. км [13]. В геоакустическом моделировании использовался сейсмогеологический разрез по профилю МОГТ, выполненный в рейсе, – BGR-97-01 [14, 15]. Глубина проникновения сигнала по профилю превысила 15 км, что значительно больше необходимой мощности изученного геологического слоя для сейсмоакустического моделирования (рис. 2).

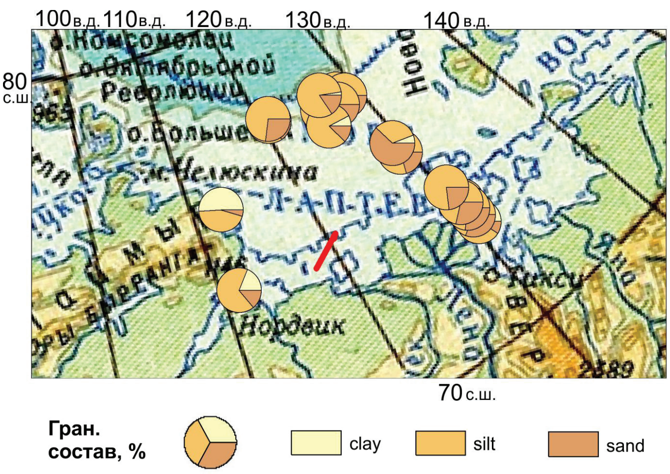

Рис. 1. Море Лаптевых. Красным отмечен сейсмический разрез по профилю BGR-97-01 [14, 15]. Кружками отмечены места отбора проб донного осадка [18, 19]

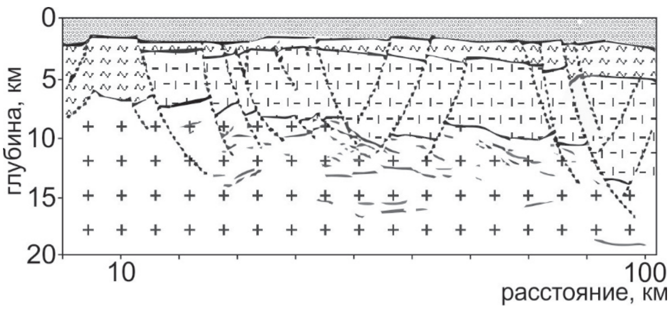

Рис. 2. Сейсмогеологический разрез. Исходный сейсмический разрез по профилю BGR-97-01 опубликован в работах [14, 15]

Побережье и острова моря Лаптевых покрыты геологической съемкой 1 : 200000, на побережье пробурено несколько глубоких (до 3,6 км) скважин. В акватории моря проводились магнитометрические и гравиметрические съемки, в том числе выполнялась и аэросъемка (в масштабе 1 : 1000000). Отбор проб донных осадков проводился систематически различными организациями начиная с 1950-х гг. Согласно [16], примерно 1600 станций отбора проб было поднято на акватории моря. Геологическое строение шельфа моря хорошо изучено различными сейсмическими и сейсмоакустическими методами [17].

Шельф моря Лаптевых преимущественно представляет собой слабохолмистую поверхность с глубинами порядка 50 м, ограниченную с севера Центральным арктическим бассейном. По северной границе протягивается континентальный склон, где глубина резко меняется от 50–100 м до более 3000 м. Осадконакопление происходит преимущественно за счет сброса реками осадочного материала. В море впадает четыре крупные реки: Лена, Яна, Оленек, Хатанга и ряд небольших рек. В работе использовались данные литологических исследований, проведенных в бухтах Моржевая и Отмелая [18]. Авторами работы [18] были проведены детальные физико-химические исследования на пробах донных отложений. Полученные результаты исследований позволили рассчитать плотностные характеристики, а также уточнить акустические параметры верхнего осадочного слоя схожего состава в районе профиля МОГТ. Кроме того, в создании цифровой ГАМ профиля использовались данные отбора проб поверхностного горизонта (до 2 см), которые получены в арктических экспедициях авторами работы [19] (рис. 1).

Геоакустическая модель

ГАМ построена на основе исследований Е. Гамильтона, который опубликовал серию работ посвященных её созданию и определению зависимостей акустических параметров среды от гранулометрического состава и глубины залегания пород, например [7, 8, 20]. Все этапы и модификации создания ГАМ шельфа описаны в статьях авторов [21–23], где были созданы обобщенные и детализированная модели в заливе Петра Великого Японского моря. ГАМ залива Петра Великого используется при моделировании распространения акустических сигналов и помогает при интерпретации натурных сейсмоакустических экспериментов [24].

На первом этапе формирования ГАМ профиля на море Лаптевых проведен расчет акустических параметров верхнего осадочного слоя по гранулометрическому составу проб (рис. 1), отобранных авторами работ [18, 19]. В таблице выписаны номера и координаты отобранных проб. Гранулометрический состав проб приведен к стандартам, принятым в США по Шепарду [7]. Расчет скорости продольной волны рыхлых донных отложений осуществлялся по формуле 1, приведенной в работе [23]:

$$V_p = k_1L_1 + k_2L_2 + k_3L_3\,, \qquad (1)$$

где L_1, L_2, L_3 – долевое содержание фракции песка, ила и глины соответственно в пробе донного осадка. Содержание фракции песка в гранулометрическом составе проб используются по международным стандартам (по Шепарду). Коэффициент k зависит от минерального состава донного осадка. Далее рассчитали скорости поперечной волны относительно скорости продольной волны [20]. Для скоростей продольной волны от 1555 до 1650 м/с соотношение имеет вид: $V_s = 1.137V_p - 1485$. Для скорости продольной волны более 1650 м/с: $V_s = 991 - 1.136V_p + 4.7V_p^2 * 10^{-4}$. Так как на самом профиле данных гранулометрических исследований нет, рассчитанные акустические характеристики были проинтерполированы по акватории моря Лаптевых методом Natural Neighbor Interpolation [25]. На профиле ГАМ всего 200 точек и скорость продольной волны плавно меняется от 1660 м/с (в ближней точке к берегу) до 1580 м/с (рис. 3). Изменение физических свойств осадков с глубиной залегания рассчитано по аналитическим формулам, приведенным в работе [8]. За счет уплотнения рыхлых осадков с глубиной залегания скорость продольной волны для данного типа осадков увеличивается на 900 м/с на 1 км. Нижележащие геологические слои – осадочный слой (на рис. 2 перпендикулярные черточки) и акустический фундамент в модели представлены результатами измерений с помощью метода МОГТ и определения скоростей продольной волны по глубине [13]. Поскольку прямых измерений акустических свойств пород

Рассчитанные акустические характеристики донных отложений

N	X	Y	Clay, %	sil, %t	sand, %	V_p, м/с	V_s, м/с	ρ, г/см³
1	112,5083	75,90667	39	54	7	1687	412	1,25
2	112,5083	75,90667	26,7	66	7,3	1659	400	1,23
3	112,5083	75,90667	51	44,2	4,8	1718	426	1,27
4	111,3333	74,01667	13,9	75,8	10,3	1625	386	1,20
5	111,3333	74,01667	18,8	67,4	13,8	1630	388	1,21
6005	130,499	72,5	51,8	39,1	9,1	1713	424	1,27
6006	130,499	72,707	0,1	69,3	30,6	1561	363	1,16
6007	130,5	73,123	0	79,3	20,7	1577	368	1,17
6008	130,5	72,911	0	73,2	26,8	1567	365	1,16
6009	130,374	73,115	0	71,5	28,5	1564	364	1,16
6013	130,276	73,593	0	76,9	23,1	1573	367	1,17
6016	129,189	74,908	0	79,3	20,7	1577	368	1,17
6027	127,797	76,892	0	84	16	1584	371	1,17
6045	125,829	76,775	1,2	86,7	12,1	1593	374	1,18
6053	128,453	76,739	0,4	83,6	16	1585	371	1,17
6056	127,317	76,679	0,2	71	28,8	1564	364	1,16
6058	125,419	76,396	7,7	80	12,3	1608	379	1,19
6065	126,424	77,103	2,4	82,1	15,5	1591	373	1,18
6068	120,614	77,246	0	84,8	15,2	1586	371	1,17
6505	129,141	75,186	5,9	32,1	62	1524	351	1,13
6527	120,655	77,301	0	73,1	26,9	1567	365	1,16

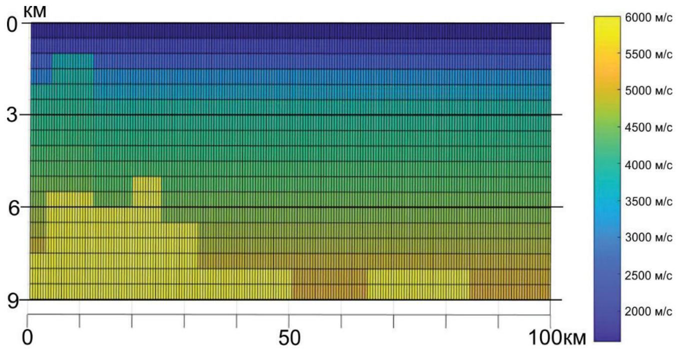

Рис. 3. Пространственное распределение скоростей продольной волны разреза BGR-97-01

не найдено в доступной литературе, использовали данные сейсмических исследований. Согласно МОГТ скорость продольной волны на глубине примерно 3 км равна 3900 м/с, что соответствует глубине залегания второго осадочного слоя. На глубине более чем 5 км скорость продольной волны осадочного слоя увеличивается до 4800 м/с. Верхняя кромка акустического фундамента со скоростью продольной волны в 6000 м/с находится на глубине более 7 км. В различных работах, например [12], скоростные характеристики акустического фундамента действительно превышают 6000 м/с согласно полученным расчетам на основе современных сейсмических исследований.

Заключение

Используя априорную информацию об акустических параметрах геологической среды, можно проводить моделирование распространения акустических сигналов приближенное к реальным условиям. Осадочный слой в ГАМ на поверхности дна имеет среднее значение скорости продольной волны – 1620 м/с, скорость поперечной волны – 357 м/с. С глубиной акустические характеристики увеличиваются по линейному закону, примерно на 900 м/с на 1 км глубины для скорости продольной волны. ГАМ имеет размерность 500х500 м, что дает возможность решать обратную задачу корректно для сигналов ниже 100 Гц. В прямой задаче ограничений по масштабам ГАМ нет, но чем больше детализация, тем лучше. При необходимости масштаб ГАМ можно уменьшить, а также добавить в верхнем осадочном слое высокую газонасыщенность в областях, где в фундаменте имеются разломы. К сожалению, прямых данных о газонасыщенных осадочных слоях на профиле нет, однако такие области встречаются на шельфах Северного Ледовитого океана [26]. Отметим также, что структура акустического поля может существенно измениться в областях с газонасыщенными осадками [27], поскольку скорость продольной волны в них ниже, чем у морской воды (от 1200 м/с) .

Работа выполнена по госзаданию номер: 124022100074-9 «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий».

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров С.Л., Павлидис Ю.А., Островский Д.Б., Селезнев И.А. Цифровая геоакустическая модель шельфа и ее использование для гидроакустических средств исследования моря // Технические проблемы освоения мирового океана. 2007. Т. 7. С. 262–268. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32399329_67811105.

2. Агеева Н.С. Распространение звука в мелком море. Акустика океана. М.: Наука, 1982. С. 107–118.

3. Santos R., Rodrigues A., Quartau R. Acoustic remote characterization of seabed sediments using the Angular Range Analysis technique: The inlet channel of Tagus River estuary (Portugal) // Marine Geology. 2018. Vol. 400. P. 60–75. DOI: 10.1016/j.margeo.2018.03.005.

4. Stoll R.D. Acoustic waves in saturated sediments // Physics of Sound in Marine Sediments. Plenum, 1974. P. 19–39.

5. Ding H., Xu S., Xu C., Tong L., Jiang Y., Lei Z. Influence factors on the nonlocal parameter and scale factor in strain gradient nonlocal Biot theory // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 166. P. 107779. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.107779.

6. Richardson M. D., Lavoie D. L., Briggs K. B. Geoacoustic and physical properties of carbonate sediments of the Lower Florida Keys // Geo-Marine Letters. 1997. Vol. 17. P. 316–324. DOI: 10.1007/s003670050043.

7. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor // J. Acoust. Soc. Am. 1980. Vol. 68. P. 1313–1340.

8. Hamilton E.L., Bachman R. T. Sound velocity and related properties of marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 1982. Vol. 72 (6). P. 1891–1904.

9. Wehra H., Chevrota S., Courriouxb G., Guillenb A. A three-dimensional model of the Pyrenees and their foreland basins from geological and gravimetric data // Tectonophysics. 2018. Vol. 734–735. P. 16–32. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.03.017.

10. Maxelon M., Renard P., Courrioux G., Brandli M., Mancktelowa N. A work flow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complexpol y-deformed geological units // Computers&Geosciences. Vol. 35. P. 644–658. DOI: /10.1016/j.cageo.2008.06.005.

11. Скворцов М.Б., Дзюбло А.Д., Грушевская О.В., Кравченко М.Н., Уварова И.В. Качественная и количественная оценка перспектив нефтегазоносности шельфа моря Лаптевых // Геология нефти и газа. 2020. № 1. С. 5–19. DOI 10.31087/0016-7894-2020-1-5-19.

12. Андиева Т.А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. № 3. С. 1–28.

13. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60–76.

14. Franke D., Hinz K., Block M., Drachev S.S., Neben S., Kos'ko M.K., Reichert C., Roeser H.A. Tectonics of the Laptev Sea Region in North-Eastern Siberia // Polarforschung. 2000. Vol. 68. P. 51–58.

15. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18, No. 10. P. 1083–1127.

16. Кошелева В.А. Донные осадки арктических морей России / В.А. Кошелева, Д.С. Яшин; ред. И.С. Грамберг. СПб, 1999. 286 с.

17. Шкрубо С.И., Заварзина Г.А. Стратиграфия и характеристика сейсмических комплексов осадочного чехла западной части шельфа моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6, № 2. http://www.ngtp.ru/rub/2/14_2011.

18. Здобин Д.Ю., Вербиженский В.Е., Худолей А.К., Тучкова М.И., Рогов М.А. Состав и свойства донных осадков бухт моря Лаптевых // Инженерная геология. 2015. № 5. С. 64–72. https://www.researchgate.net/publication/299437863.

19. Гершелис Е.В. Леонов А.А., Кашапов Р.С. и др. Исследование состава органического вещества донных осадков моря Лаптевых с применением метода Rock-eval // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 8. С. 189–198. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2780

20. Hamilton E.L. Vp/Vs and poisson's ratios in marine sediments and rocks // J. Acoust. Soc. Am. 1979. Vol. 66. P. 1093–1101.

21. Самченко А.Н. Геоакустическое моделирование на шельфе с помощью геоинформационных систем // Вестн. Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 4. С. 131–138. DOI: 10.5281/zenodo.1119189

22. Самченко А.Н., Ярощук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130–136.

23. Самченко А.Н., Ярощук И.О. Упругие характеристики дна акустического полигона в заливе Петра Великого (Японское море) // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 2 (44). С. 75–82. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_07

24. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoacoustic sediment model // Chinese Physics Letters. 2014. Vol. 31, Is. 12. P. 124301. DOI: 10.1088/0256-307X/31/12/124301

25. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2) // Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley. 1981. P. 21–36.

26. Chernykh D., Shakhova N., Yusupov V., Gershelis E., Morgunov B., Semiletov I. First Calibrated Methane Bubble Wintertime Observations in the Siberian Arctic Seas: Selected Results from the Fast Ice // Geosciences. 2023. Vol. 13. P. 228. DOI: 10.3390/geosciences13080228.

27. Sidorov D.D., Bodjona S.D., Petnikov V.G., Lunkov A.A. Estimation of water-like bottom lengthalong an acoustic track in shallow water // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Fizika, tehničeskie nauki. 2024. Vol. 515, No. 2. P. 85–90. DOI: 10.31857/S2686740024020137

Об авторах

САМЧЕНКО Александр Николаевич, к.г.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: геология и геофизика шельфа

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: samchenko@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-5184-0718

ЯРОЩУК Игорь Олегович, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3212-9752

Для цитирования:

Самченко А.Н., Ярощук И.О. ЦИФРОВОЕ ГЕОАКСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 4 (50). С. 4–10. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_01. EDN: CPKVGK.

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_01

DIGITAL GEOACOUSTIC MODELING OF THE GEOLOGICAL PROFILE IN THE LAPTEVA SEA

A.N. Samchenko, I.O. Yaroshchuk

The paper considers the creation of a digital geoacoustic model (GAM) of geological structures in the Laptev Sea based on the available geological and geophysical information of the region. The bottom NOISE provides a priori data on the acoustic characteristics of geological environments. Digital noise is mainly used in seismic and hydroacoustic modeling of signal propagation in the ocean. In the conditions of the shelf and the use of low-frequency signals, the acoustic characteristics of the bottom play a major role in their propagation.

The study of the Laptev Sea shelf is of great scientific and applied importance, since it is located in the far north. Where the northern sea route passes. Scientifically, it is interesting to study the propagation of acoustic signals in conditions where there is a thick layer of ice and low water temperatures. In addition, the sea shelf is a promising oil and gas bearing area. This is due to its good geological and geophysical knowledge. An extensive array of geological and geophysical research data has been collected by such organizations as NIIGA Research Institute of Oceanology, Sevmorgeo, Sevmorgeology and others. All possible seismic work has been carried out in the sea area using various methods. More than 30 thousand km of profiles have been traversed using the common depth point method alone.

Keywords: elastic characteristics of the bottom, seismoacoustics, granulometric composition of the sediment, geoacoustic model, Laptev Sea.

References

1. Nikiforov S.L., Pavlidis Ju.A., Ostrovskij D.B., Seleznev I.A. Cifrovaja geoakusticheskaja model' shel'fa i ee ispol'zovanie dlja gidroakusticheskih sredstv issledovanija morja. Tehnicheskie problemy osvoenija mirovogo okeana. 2007. Vol. 7. P. 262–268. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32399329_67811105. (In Russ.).

2. Ageeva N.S. Rasprostranenie zvuka v melkom more. Akustika okeana. M.: Nauka, 1982. P. 107–118. (In Russ.).

3. Santos R., Rodrigues A., Quartau R. Acoustic remote characterization of seabed sediments using the Angular Range Analysis technique: The inlet channel of Tagus River estuary (Portugal). Marine Geology. 2018. Vol. 400. P. 60–75. DOI: 10.1016/j.margeo.2018.03.005.

4. Stoll R.D. Acoustic waves in saturated sediments. Physics of Sound in Marine Sediments. Plenum, 1974. P. 19–39.

5. Ding H., Xu S., Xu C., Tong L., Jiang Y., Lei Z. Influence factors on the nonlocal parameter and scale factor in strain gradient nonlocal Biot theory. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 166. P. 107779. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.107779.

6. Richardson M. D., Lavoie D. L., Briggs K. B. Geoacoustic and physical properties of carbonate sediments of the Lower Florida Keys. Geo-Marine Letters. 1997. Vol. 17. P. 316–324. DOI: 10.1007/s003670050043.

7. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. J. Acoust. Soc. Am. 1980. Vol. 68. P. 1313–1340.

8. Hamilton E.L., Bachman R. T. Sound velocity and related properties of marine sediments. J. Acoust. Soc. Am. 1982. Vol. 72 (6). P. 1891–1904.

9. Wehra H., Chevrota S., Courriouxb G., Guillenb A. A three-dimensional model of the Pyrenees and their foreland basins from geological and gravimetric data. Tectonophysics. 2018. Vol. 734–735. P. 16–32. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.03.017.

10. Maxelon M., Renard P., Courrioux G., Brandli M., Mancktelowa N. A work flow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complexpol y-deformed geological units. Computers&Geosciences. Vol. 35. P. 644–658. DOI: /10.1016/j.cageo.2008.06.005.

11. Skvorcov M.B., Dzjublo A.D., Grushevskaja O.V., Kravchenko M.N., Uvarova I.V. Kachestvennaja i kolichestvennaja ocenka perspektiv neftegazonosnosti shel'fa morja Laptevyh. Geologija nefti i gaza. 2020. No. 1. P. 5–19. DOI 10.31087/0016-7894-2020-1-5-19. (In Russ.).

12. Andieva T.A. Tektonicheskaja pozicija i osnovnye struktury morja Laptevyh. Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika. 2008. No. 3. P. 1–28. (In Russ.).

13. Drachev S.S. O tektonike fundamenta shel'fa morja Laptevyh. Geotektonika. 2002. No. 6. P. 60–76. (In Russ.).

14. Franke D., Hinz K., Block M., Drachev S.S., Neben S., Kos'ko M.K., Reichert C., Roeser H.A. Tectonics of the Laptev Sea Region in North-Eastern Siberia. Polarforschung. 2000. Vol. 68. P. 51–58.

15. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift. Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18, No. 10. P. 1083–1127.

16. Kosheleva V.A. Donnye osadki arkticheskih morej Rossii. V.A. Kosheleva, D.S. Jashin; red. I.S. Gramberg. SPb, 1999. 286 p. (In Russ.).

17. Shkrubo S.I., Zavarzina G.A. Stratigrafija i harakteristika sejsmicheskih kompleksov osadochnogo chehla zapadnoj chasti

shel'fa morja Laptevyh. Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika. 2011. Vol. 6, No. 2. http://www.ngtp.ru/rub/2/14_2011. (In Russ.).

18. Zdobin D.Ju., Verbizhenskij V.E., Hudolej A.K., Tuchkova M.I., Rogov M.A. Sostav i svojstva donnyh osadkov buht morja Laptevyh. Inzhenernaja geologija. 2015. No. 5. P. 64–72. https://www.researchgate.net/publication/299437863. (In Russ.).

19. Gershelis E.V. Leonov A.A., Kashapov R.S. i dr. Issledovanie sostava organicheskogo veshhestva donnyh osadkov morja Laptevyh s primeneniem metoda Rock-eval. Izvestija TPU. Inzhiniring georesursov. 2020. Vol. 331, No. 8. P. 189–198. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2780. (In Russ.).

20. Hamilton E.L. Vp/Vs and poisson's ratios in marine sediments and rocks. J. Acoust. Soc. Am. 1979. Vol. 66. P. 1093–1101.

21. Samchenko A.N. Geoakusticheskoe modelirovanie na shel'fe s pomoshh'ju geoinformacionnyh sistem. Vestn. Inzhenernoj shkoly DVFU. 2017. No. 4. P. 131–138. DOI: 10.5281/zenodo.1119189. (In Russ.).

22. Samchenko A.N., Jaroshhuk I.O. Akusticheskie parametry ryhlyh donnyh otlozhenij zaliva Petra Velikogo (Japonskoe more). Vestn. DVO RAN. 2017. No. 5. P. 130–136. (In Russ.).

23. Samchenko A.N., Jaroshhuk I.O. Uprugie harakteristiki dna akusticheskogo poligona v zalive Petra Velikogo (Japonskoe more). Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2023. No. 2 (44). P. 75–82. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_07. (In Russ.).

24. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoacoustic sediment model. Chinese Physics Letters. 2014. Vol. 31, Is. 12. P. 124301. DOI: 10.1088/0256-307X/31/12/124301

25. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley. 1981. P. 21–36.

26. Chernykh D., Shakhova N., Yusupov V., Gershelis E., Morgunov B., Semiletov I. First Calibrated Methane Bubble Wintertime Observations in the Siberian Arctic Seas: Selected Results from the Fast Ice. Geosciences. 2023. Vol. 13. P. 228. DOI: 10.3390/geosciences13080228.

27. Sidorov D.D., Bodjona S.D., Petnikov V.G., Lunkov A.A. Estimation of water-like bottom lengthalong an acoustic track in shallow water. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Fizika, tehničeskie nauki. 2024. Vol. 515, No. 2. P. 85–90. DOI: 10.31857/S2686740024020137

Information about the authors

SAMCHENKO Aleksandr Nikolaevich, phD (geographical sciences), Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: geology and geophysics of the shelf
Phone: 8(423) 231-26-17
E-mail: samchenco@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-5184-0718

YAROSHCHUK Igor Olegovich, Prof. phD (physical and mathematical sciences), Head of the laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: ocean acoustics
Phone: 8(423) 231-26-17
E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-3212-9752

Recommended citation:

Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. DIGITAL GEOACOUSTIC MODELING OF THE GEOLOGICAL PROFILE IN THE LAPTEVA SEA. Underwater investigations and robotics. 2024. No. 4 (50). P. 4–10. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_01. EDN: CPKVGK.