

АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Самченко А.Н., Ярощук И.О.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
samchenco@poi.dvo.ru*

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 [1]. 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 [2]. Модель Био-Столла часто используется в исследованиях и в настоящее время [3]. Например, в работе [4] 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 лабораторных исследований. Более простой метод определения упругих свойств, предложен Гамильтоном и Бачманом [5, 6]. 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 [7]. В целом создание геологических 3D цифровых моделей являются актуальными различных геологических объектов [8]. 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.

Выбранный профиль находится в арктической зоне, что обуславливает научный и практический интерес (рис. 1). Арктическая зона, а в частности море Лаптевых является перспективным нефтегазоносным районом [9]. В связи с чем на шельфе моря Лаптевых активно проводятся геолого-геофизические исследования [10]. В исследовании геологического строения шельфа моря применялись различные виды сейсмоакустических работ, в том числе методом общей глубиной точки (МОГТ) пройдено более 30 тыс. км [11]. В геоакустическом моделировании использовался сейсмогеологический разрез по профилю МОГТ выполненном в рейсе BGR-97-01 [12, 13]. Глубина проникновения сигнала по профилю превысило 15 км, что значительно превышает необходимую мощность изученного геологического слоя для сейсмоакустического моделирования (рис. 2).

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 и выполнялась и аэросъемка, однако в масштабе 1:1000000. Отбор проб донных осадков проводился систематически различными организациями начиная с 1950х гг. Согласно [14], примерно 1600 станций отбора проб было поднято на акватории моря. Геологическое строение шельфа моря хорошо изучено различными сейсмическими и сейсмоакустическими методами [15].

Шельф моря Лаптевых преимущественно представляет собой слабохолмистую поверхность с глубинами порядка 50 м, ограни-

ченную 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 рек 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 [16]. Авторами работы [16] 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 [17] (рис. 1).



Рис. 1. Море Лаптевых. Красным отмечен сейсмический разрез по профилю BGR-97-01 [12, 13]. Кружками отмечены места отбора проб донного осадка [16, 17]

ГАМ построена на основе исследований Гамильтона, который опубликовал серию работ посвященных её созданию и определения зависимостей акустических параметров среды от гранулометрического состава и глубины залегания пород, например [5, 6, 18]. Все этапы и модификации создания ГАМ шельфа описаны в статьях авторов [19-21], где были созданы обобщенные и детали-

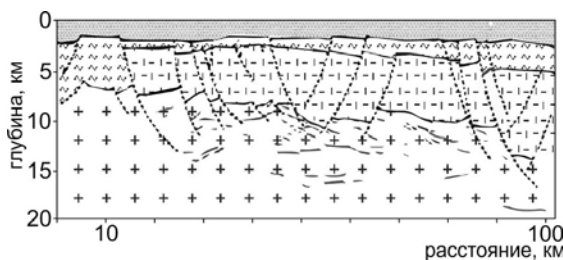


Рис. 2. Сейсмогеологический разрез. Исходный сейсмический разрез по профилю BGR-97-01 опубликован в работах [12, 13]

зирования модели в заливе Петра Великого Японского моря. ГАМ залива Петра Великого используется при моделировании распространения акустических сигналов и помогает при интерпретации натуральных сейсмоакустических экспериментов [22].

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 [16, 17]. В таблице 1 выписаны номера и координаты отобранных проб. Гранулометрический состав проб приведен к стандартам, принятым в США по Шепарду [5]. Расчет скорости продольной волны рыхлых донных отложений осуществлялся по формуле 1, приведенной в работе [21].

$$V_p = k_1 L_1 + k_2 L_2 + k_3 L_3, \quad (1)$$

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 [18]. Для скоростей продольной волны от 1555 м/с до 1650 м/с соотношение имеет вид: $V_s = 1.137V_p - 1485$. Для скорости продольной волны более 1650 м/с: $V_s = 991 - 1.136V_p + 4.7V_p^2 \cdot 10^{-4}$. Так как на самом профиле данных гранулометрических исследований нет, рассчитанные акустические характеристики были проинтерполированы по акватории моря Лаптевых методом Natural Neighbor

Interpolation [23]. 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 [6]. 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 [11]. Поскольку прямых измерений акустических свойств пород не найдено в доступной литературе поэтому 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 [10], скоростные характеристики акустического фундамента действительно превышают 6000 м/с согласно полученным расчетам на основе современных сейсмических исследований.

Используя априорную информацию об акустических параметрах геологической среды, можно проводить моделирование распространения акустических сигналов приближенной к реальным

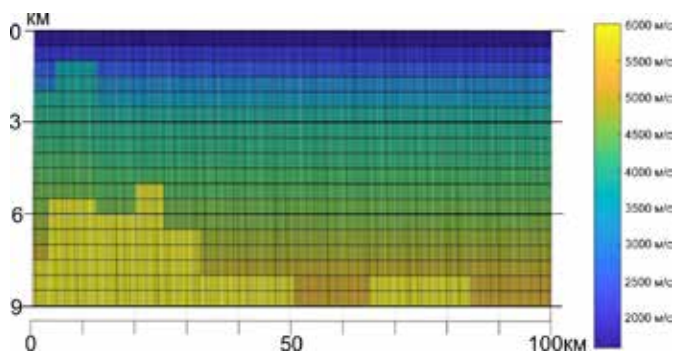


Рис. 3. Пространственное распределение скоростей продольной волны разреза BGR-97-01

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 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 Северно-Ледовитого океана [24].

Литература

1. 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. 400. P. 60-75. DOI: 10.1016/j.margeo.2018.03.005.
2. Stoll R.D. 1974. Acoustic waves in saturated sediments. In L. Hampton, editor, *Physics of Sound in Marine Sediments*. Plenum, 19-39.
3. 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. 166. 107779. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.107779.
4. 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. 17. P. 316-324. DOI: 10.1007/s003670050043.
5. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor // *J. Acoust. Soc. Am*. 1980. Vol. 68. P. 1313-1340.
6. 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.
7. Wehra H., Chevrot S., Courrioux G., Guillenb A. A three-dimensional model of the Pyrenees and their foreland basins from geological and gravimetric data // *Tectonophysics*. 2018. V. 734-735, P. 16-32. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.03.017.
8. Maxelon M., Renard P., Courrioux G., Brandli M., Mancktelowa N. A work flow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complex pol y-deformed geological units // *Computers&Geosciences*. 2009. 35. P. 644-658. DOI: /10.1016/j.cageo.2008.06.005.
9. Скворцов М.Б., Дзюбло А.Д., Грушевская О.В., Кравченко М.Н., Уварова И.В. Качественная и количественная оценка перспектив нефтегазонасности шельфа моря Лаптевых // *Геология нефти и газа*. 2020. № 1. С. 5-19. DOI 10.31087/0016-7894-2020-1-5-19.

10. Андиева Т.А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. (3). С. 1-28.
11. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60-76.
12. 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.
13. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18. № 10. P. 1083-1127.
14. Кошелева, В.А. Донные осадки арктических морей России / В.А. Кошелева, Д.С. Яшин; ред. И.С. Грамберг. – СПб. 1999. – 286 с.
15. 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.
16. 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. 64-72. <https://www.researchgate.net/publication/299437863>.
17. 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.
18. Hamilton E.L. Vp/Vs and poisson's ratios in marine sediments and rocks // J. Acoust. Soc. Am. 1979. Vol. 66. P. 1093-1101.
19. Самченко А.Н. Геоакустическое моделирование на шельфе с помощью геоинформационных систем // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 4. С. 131-138. DOI: 10.5281/zenodo.1119189.
20. Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестник ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130-136.
21. Самченко А.Н., Ярошук 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.
22. 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. Is. 12. Vol. 31124301. DOI: 10.1088/0256-307X/31/12/124301.
23. Sibson R.A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). In V. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley. 1981. P. 21-36.
24. 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. 13. 228. DOI: 10.3390/geosciences13080228.