

АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ЗАЛИВЕ ПОСЬЕТА ЯПОНСКОГО МОРЯ

Самченко А.Н., Ярошук И.О.

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

При создании геоакустической модели (ГАМ) участка шельфа Японского моря была выбрана концепция в соответствии с описанной в статье Гамильтона [6]. Кроме того, использовались аналитические решения расчета акустических параметров рыхлых донных отложений от соотношения их гранулометрического состава [5] при схожем химическом составе. В построенной ГАМ участка учтено уплотнение рыхлых отложений с глубиной в соответствии с исследованиями, описанными в работе [4]. Данный подход не является современным, однако он достаточно простой и универсальный. Достоверность ГАМ проверялась на небольшом участке с помощью акустических методов. Выбор создания ГАМ на базе исследований Гамильтона, был обусловлен следующими факторами:

- Унификация ГАМ позволяет на основе уже полученных аналитических решений проводить перерасчет акустических характеристик донных отложений;
- Можно использовать данные гранулометрического состава рыхлых донных отложений от всех ранее проведенных исследований на интересующей акватории, что позволяет расширять ГАМ на большие площади;

Выбор данного участка шельфа для построения цифровой ГАМ не случаен, в заливе расположен гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН [1] (Рис. 1). На гидрофизическом полигоне активно проводятся гидроакустические и океанологические исследования. На мысе Шульца расположена береговая база института, где разрабатывается и проходит апробацию современное гидрофизическое оборудование, а также установлен деформограф [2]. Изучение акустических характеристик водной толщи и геологических образований на акватории залива Посьета имеет прикладное значение, для интерпретации результатов гидрофизических исследований.

Рыхлые донные отложения в ГАМ представлены следующими характеристиками: продольная, поперечная скорости звука, поглощение звука и плотность. В идеальном случае, указанные выше характеристики среды определяются в лаборатории на образцах, однако такого рода дан-

ных крайне мало. Изучению акустических характеристик морского грунта в последние годы уделяется большое внимание [8]. Необходимо отметить, что все упругие свойства материалов имеют зависимость друг от друга. Далее предлагается находить скорости продольных волн в рыхлых донных отложениях. Поскольку, зная скорость продольной волны, можно рассчитать скорость поперечной волны, плотность и другие характеристики [5, 6]. Прямой зависимости поглощения от скорости продольной волны нет. Поглощение в осадках можно определить только косвенно. На основе справочных данных по известному гранулометрическому содержанию проб рыхлого осадка.

Исходя из исследований, проведенных Гамильтоном [6], что на продольную скорость звука в основном влияет размер частиц в донных отложениях при равных значениях обводненности и глубины. Необходимо учитывать процентное содержание каждой из фракций, входящих в состав пробы. В международной классификации выделяется 3 фракции, различающиеся размерами зерна — песок («Sand»), ил («Silt») и глина («Clay»). Продольная скорость звука для донного осадка с различным процентным содержанием фракций получено с помощью следующего соотношения:

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

где L_1 , L_2 , L_3 – долевое содержание фракции песка, ил и глины соответственно в пробе донного осадка. Коэффициент k зависит от химического состава проб и рассчитан на образцах близких по составу [3]. В нашем случае с учетом зернистости фракции «Sand» коэффициент $k_1 = 1836$, $k_2 = 1610$, при различных размерах зерна фракции «Clay», $k_3 = 1450$. Продольная скорость звука для варианта, где фракция «Sand» составляет 100 %, будет 1750 м/с, с учетом, что среднезернистый песок имеет размер зерен 2.5 ф единиц, при содержании фракции «Silt» 100 % – 1560 м/с, для 5.4 ф единиц, со 100 % содержанием в осадке фракции «Clay» – 1450 м/с, при 8.5 ф единиц (зернистость в ф единицах = $-\log_2$ [зернистость в мм]). При размере зерен крупнозернистого песка (Coarse sand) 0.92 ф единиц продольная скорость звука составляет 1836 м/с. Продольная скорость звука для фракции «Clay», при 4.5 ф единиц, равно 1610 м/с.

Всего на всей территории залива Петра Великого Японского моря (куда территориально входит залив Посъета) было проанализировано 462 пробы донного осадка с известным гранулометрическим составом и вычислены упругие характеристики. Вычисленные значения упругих свойств донных отложений залива Петра Великого легли в основу сформированной ГАМ. На акватории залива Посъета проанализированы 53 пробы донных отложений. Распределение продольной скорости звука

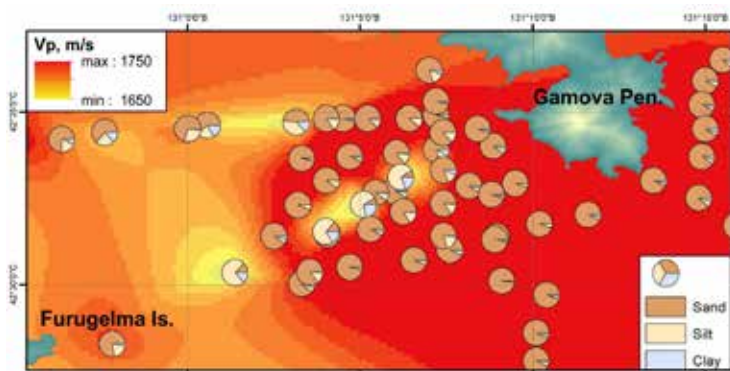


Рис. 1. Распределение продольной скорости звука, рассчитанное по данным гранулометрического состава осадка и точки отбора проб донных отложений

на акустическом полигоне рассчитано с помощью стандартного метода «Естественной окрестности» в геоинформационной системе ArcGis, показано на рис. 1.

На площади 130,5 км² на акустическом полигоне проведены акустические исследования с помощью двух частотного эхолота. В результате акустических измерений получены данные по интенсивности обратного рассеяния при нормальном падении луча на частотах 50 и 100 кГц. Существует зависимость упругих свойств осадков дна моря и отражающей способностью через коэффициент отражения Релея:

$$R = \frac{\rho_1 \rho_2 - \sqrt{C_1^2 C_2^2 - \sin^2 \theta} \left(\sqrt{1 - \sin^2 \theta} \right)^{-1}}{\rho_1 \rho_2 + \sqrt{C_1^2 C_2^2 - \sin^2 \theta} \left(\sqrt{1 - \sin^2 \theta} \right)^{-1}}, \quad (2)$$

где R – отношение амплитуды отраженной волны к падающей волне, ρ_1 и C_1 – плотность и скорость звука в придонной воде, ρ_2 и C_2 – плотность и скорость звука в осадках. Угол отражения или падения – θ . На рис. 2 показано вычисленное распределение скоростей продольных волн в поверхностном слое донных отложений по известным данным отражающих свойств на основе модели Био-Столла [5]. Эффективная плотность рыхлых осадков в высокочастотной области находится следующим выражением, согласно [6]:

$$\rho_{eff} = \rho_f \frac{\alpha(1-\beta)\rho_s + \beta(\alpha-1)\rho_f}{\beta(1-\beta)\rho_s + (\alpha-2\beta + \beta^2)\rho_f}, \quad (3)$$

где ρ_f это плотность воды и равно 1000 кг/м^3 , ρ_s – плотность песчинок, составляющий донные отложения, соответствует 2650 кг/м^3 для алевритового песка. α – проницаемость среды, можно определить как $1/15 \sim 1/25$ от среднего диаметра зерна песчинок, β – пористость. Для расчета пористость взята равной 0.4.

Согласно [8, 9], если исключить проницаемость, но учитывать внутреннее трение в рыхлых осадках в формуле (3) получим эффективную плотность, которая используется в расчете коэффициента отражения при нормальном падении по формуле (2). Величина скорости продольной волны в данном случае не вещественная, а комплексная. А плотность донных отложений - это эффективная плотность двухфазной среды. Используя данную методику расчета скоростей продольных волн верхнего слоя донных отложений по данным акустического зондирования качественная картина не отличается от расчета по модели Био-Столла (рис. 2). Уменьшился диапазон значений скоростей продольных волн на 80 м/с и минимальное значение скорости продольной волны уменьшилось на 20 м/с .

Как показали исследования на акустическом полигоне, наиболее близкие значения скоростей продольной волны получены на основе метода Гамильтона-Бачмана [4], что и послужило основой ГАМ для рыхлых донных отложений. Рассчитанные скорости продольной волны акустическими методами качественно, но не количественно близки к методу Гамильтона-Бачмана. Исходя из того, что максимальные значения скоростей продольной волны, полученных акустическими методами, выходят за пределы возможного, существует ошибка определения упругих свойств пород. Возможно, ошибка определения скоростей продольной волны обусловлена использованием высокочастотного излучателя. В работе [10] отмечается, что метод Био-Столла на высоких частотах может работать некорректно. Кроме того, неровности морского дна могут вно-

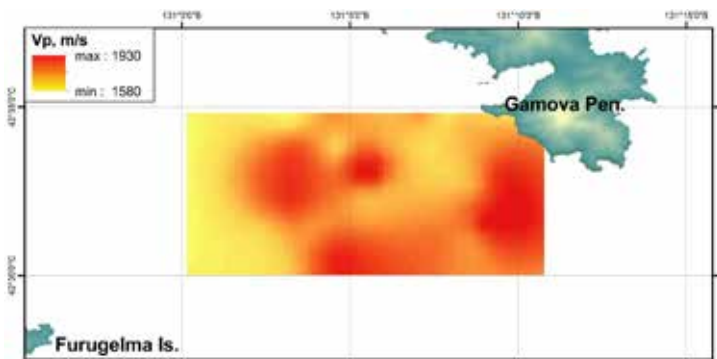


Рис. 2. Распределение скорости продольной волны, рассчитанное по данным акустических исследований.

сильно погрешность в измерениях, так как часть энергии, переданной под разными углами, возвращаясь к преобразователю рассеивается. Однако имеется важное преимущество акустического метода определения упругих характеристик донных отложений это детализация измерений. Также возможно уточнение зон со сложным геологическим строением, в местах выходов коренных пород и переслаиванием различных по составу геологических слоев.

С глубиной акустические параметры в рыхлых донных отложениях увеличиваются, пропорционально глубине [7]. Мощность рыхлых осадков в ГАМ определено с помощью НСП [3]. В глубокой части залива Посьета выделены три осадочных слоя, которые выклиниваются к береговой черте. Верхний слой песка мощностью 20-50 м у берега уменьшается до 5 м к выходу из залива.

Уточнение параметров слоистой структуры донных осадков и накопление статистических данных об океанологических характеристиках позволит в дальнейшем на более высоком уровне моделировать распространение звука в условиях мелкого моря, а также способствовать решению задач томографии и построения гидродинамических моделей шельфовых областей.

Литература

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В. Геофизический полигон «мыс Шульца» // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 165-169.
2. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н. и др. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // ДАН. 2007. Т. 412. № 1. С. 104-106.
3. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посьета (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 1. С. 65-75.
4. Hamilton E.L., Bachman R. T. Sound velocity and related properties of marine sediments. J. Acoust. Soc. Am. 1982. 72(6). P. 1891-1904.
5. Hamilton E.L. Vp/Vs and poisson's ratios in marine sediments and rocks // J. Acoust. Soc. Am. 1979. Vol. 66. P 1093-1101.
6. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor // J. Acoust. Soc. Am. 1980. Vol. 68. P. 1313-1340.
7. Hamilton E.L., Sound Velocity as a Function of Depth in Marine Sediments // J. Acoust. Soc. Am. 1985. 78. P. 1348-1355.
8. Lisutin V.A. Lastovenko O.R. Evaluation of the effect of internal and viscous friction on the dispersion and attenuation of sound in unconsolidated marine sediments // Acoust. Journal. 2020. V. 66. No. 4. P. 420-436. DOI: 10.31857/S0320791920040061.
9. Schock S.G. A Method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data // IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. V. 29(4). P. 1200-1217.
10. Schock S.G. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the Biot model // IEEE J. of Ocean. Eng. 2004. V. 29 (4). P. 1218-1230.