

DOI.org/10.5281/zenodo.1119189
УДК 697.972

А.Н. Самченко

САМЧЕНКО АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ – к.г.н., старший научный сотрудник,
e-mail: samchenco@poi.dvo.ru

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Балтийская ул., 43, Владивосток, 690041

Геоакустическое моделирование на шельфе с помощью геоинформационных систем

Аннотация: Рассмотрен процесс геоакустического моделирования участка шельфа в геоинформационных системах (ГИС-системы) на примере залива Петра Великого Японского моря. ГИС-системы представлены пакетами ArcGIS для хранения и визуализации данных о горных породах дна шельфа; результаты измерений по водному слою представлены в программе Ocean Data View, кроме того, математическая обработка всего массива геоакустической информации производилась на базе пакета MatLab. Использование ГИС-систем упрощает работу с данными о геологическом строении и петрофизических свойствах горных пород, физических свойств водной среды. Кроме того, на базе пакетов ArcGIS можно создавать и визуализировать 2- и 3-D модели реальной среды. Используемые алгоритмы создания цифровой геоакустической модели залива Петра Великого применены впервые в Дальневосточном регионе.

Ключевые слова: геоакустическая модель, геоинформационные системы, залив Петра Великого.

Введение

Геоакустическое моделирование заключается в том, что на основе геолого-геофизических, батиметрических исследований и гидрологических данных формируется геоакустическая модель интересующего участка шельфа. В общепринятом понимании геоакустическая модель описывает слой воды, осадочную толщу и твёрдый фундамент. Она имеет два уровня представления – качественный описательный и количественный, в котором все характеристики формализуются в виде пространственно-временных зависимостей, например скорость звука в осадках представляется как функция координат глубины и места. Э. Гамильтон одним из первых систематизировал изучение акустических характеристик рыхлых осадочных пород на шельфе и ввел термин «геоакустическая модель» (1980 г.) [10]. Известно несколько примеров использования геоакустической модели в гидроакустических исследованиях. Так, ученые США и КНР провели совместные комплексные гидроакустические исследования с геоакустическим моделированием на участках шельфа в Мексиканском заливе и Восточно-Китайском море [8, 9, 11]. Лаборатория статистической гидроакустики ТОИ ДВО РАН также применяла международный опыт использования геоакустической модели в теоретических и натурных гидроакустических исследованиях [6]. На основе геолого-геофизической информации (в частности, отчетов научно-исследовательских рейсов ТОИ ДВО РАН) была построена геоакустическая модель залива Петра Великого. Модель дополнена при участии автора данной статьи [4]. Кроме того, были проведены батиметрические исследования акватории залива Петра Великого [2]. Гидрологические исследования в заливе Петра Великого проводятся регулярно в три сезона (весна, лето, осень) [5, 7]. По результатам гидрологических измере-

ний на глубинах от 30 до 100 м получены средние значения профиля скорости звука и температуры.

Залив Петра Великого – самый большой (его площадь около 9 тыс. км²) в Японском море. Он находится в северо-западной части моря между параллелями 42°17' и 43°20' с.ш. и меридианами 130°41' и 133°02' в.д. Внешняя его граница проходит по линии, соединяющей устье реки Туманная с мысом Поворотный. В заливе Петра Великого расположен действующий гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН, где активно проводятся гидроакустические исследования, поэтому результаты гидрологических и геолого-геофизических работ необходимы для корректного решения задач распространения звука в мелком море.

Цель данной работы заключалась в создании цифровой геоакустической модели акустических характеристик геологических объектов и водного слоя залива Петра Великого. Геоакустическая модель представляет собой набор данных о геологическом строении участка шельфа и его акустических характеристиках (скорость продольной волны (V_p , м/с), скорость поперечной волны (V_s , м/с), плотность (ρ , г/см³), затухание скорости продольной волны (K_p , дБ/м), затухание скорости поперечной волны (K_s , дБ/м)), статистические данные о скорости продольной волны в водном слое.

Цифровая геоакустическая модель

Геоакустическую модель шельфа, где уже известна геологическая обстановка, можно получить с помощью прямых методов исследования акустических характеристик на образцах горных пород в лабораторных условиях. Определить акустические характеристики среды можно и с помощью косвенных методов, к которым относятся различные сейсмоакустические методы.

Данных о бурении, а также полученных в процессе петрофизических исследований керна в заливе Петра Великого недостаточно для геоакустического моделирования на основе только прямых методов. Поэтому цифровая геоакустическая модель залива создана на основе как прямых измерений (данные бурения и литологического опробования дна трубками), так и по данным сейсмоакустических работ. На основе методики Э. Гамильтона автором рассчитано распределение акустических характеристик рыхлых донных отложений как по латерали, так и по глубине. Акустические свойства консолидированных пород получены на основе лабораторных измерений на образцах и по справочным данным.

Структура геоакустической модели исследуемого полигона следующая.

- Рельеф дна залива Петра Великого.
- Пространственное распределение акустических характеристик верхнего слоя донных осадков залива, которое связано с рельефом дна в цифровой модели.
- Условия залегания неконсолидированных и твердых пород на исследуемом полигоне в заливе и их акустические характеристики.
- Сезонные изменения профиля скорости звука водного слоя на изученной акватории (на глубинах 30–100 м). Пространственная изменчивость поля скорости звука.

Рельеф дна в геоакустической модели представлен в виде таблиц (формата .txt) батиметрических (исходных данных), цифровых данных GEBCO и Aster (данные о рельефе в море и на суше, соответственно), а также после их обработки. Исходные батиметрические данные совместно с цифровыми данными рельефа были проинтерполированы в геоинформационной среде ArcGIS, они представляют собой векторное поле (nn grid), с ячейкой 116×156 м. Кроме того, цифровая модель рельефа дна представлена в виде разложения по элементарным векторам, полученного с помощью сингулярного спектрального анализа (ССА), выполненного в среде MatLab (ПО MatLab R2010b лицензия № 642175) [2]. На рис. 1, а приведен цифровой рельеф дна залива Петра Великого, 3-D визуализация представлена в пакете ArcGIS ПО ArcScene. Верхняя кромка акустического фундамента в открытой части залива показана на рис. 1, б. Акустический фундамент представлен как гранитным слоем, так и базальтовыми внедрениями.

В геоакустической модели акустические свойства рыхлых донных осадков и их гранулометрический состав представлен также в виде исходных таблиц (с расширением .txt), где указаны

координаты места отбора пробы, процентное соотношение фаций и рассчитанные акустические свойства. Пространственное распределение акустических свойств в модели представлены в виде векторных полей (nn grid(x, y)) для каждого параметра $V_p(x, y)$, $V_s(x, y)$, $\rho(x, y)$, $K_p(x, y)$, $K_s(x, y)$ отдельно. Векторные поля (nn grid) получены в результате интерполяции исходных параметров донных отложений (данные представлены в таблицах) в геоинформационной среде ArcGIS. Значения x, y – выражены в пространственных координатах (широта и долгота в градусах).

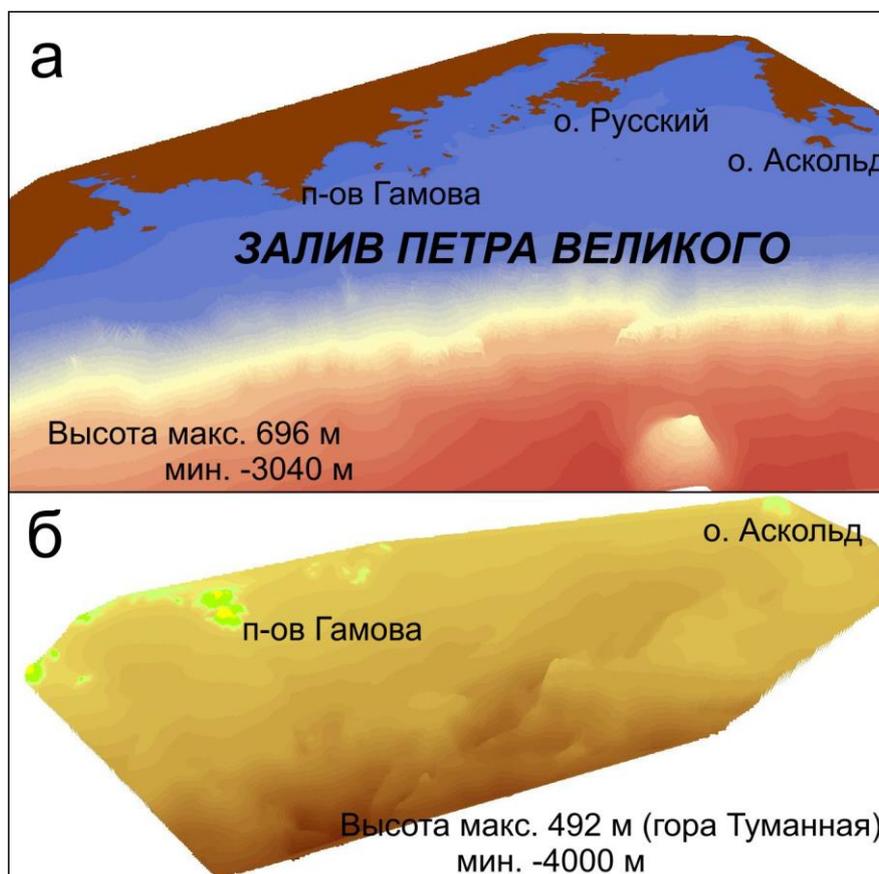


Рис. 1. а – рельеф дна залива Петра Великого, б – верхняя кромка акустического фундамента открытой части залива Петра Великого.

Распределение акустических свойств неконсолидированных пород по вертикали в геоакустической модели рассчитываются по формулам, описанным в работе [10]. Упругие свойства пород выражены в параметрах $V_p(x, y, z)$, $V_s(x, y, z)$, $\rho(x, y, z)$, $K_p(x, y, z)$, $K_s(x, y, z)$. В модели все параметры проинтерполированы по объему, где вертикальная составляющая соответствует ячейке 166×220 м, распределены по глубине (z_i) с дискретностью 1 м, где i – номер слоя, от поверхности до фундамента. Нумерация каждого слоя позволяет на любом горизонте i построить векторное поле (nn grid(x, y)) для каждого параметра $V_p(z_i)$, $V_s(z_i)$, $\rho(z_i)$, $K_p(z_i)$, $K_s(z_i)$ в геоинформационной среде ArcGIS. Акустические характеристики консолидированных пород приняты постоянными в модели (данные петрофизических исследований на образцах или справочные материалы). Мощность осадочного слоя достигает порядка 2 км в центральной части залива. На рис. 2 представлено распределение продольной скорости звука на поверхности рыхлых донных отложений, где параметр $i = 0$.

Водный слой в геоакустической модели представлен в виде натуральных данных фоновой гидрологической съемки за 2007–2012 гг., данных гидрологических разрезов с 2010 по 2017 г., а также некоторых статистических параметров (средние значения, отклонения от среднего, дисперсия и др.). В модели описаны изменения значений температуры и скорости звука с глубиной в весенний, летний и осенний сезоны года по профилям. Все результаты натурных гидрологических работ, а также обработанный материал содержатся в электронной базе данных, поддерживаемой ПО Ocean Data View.

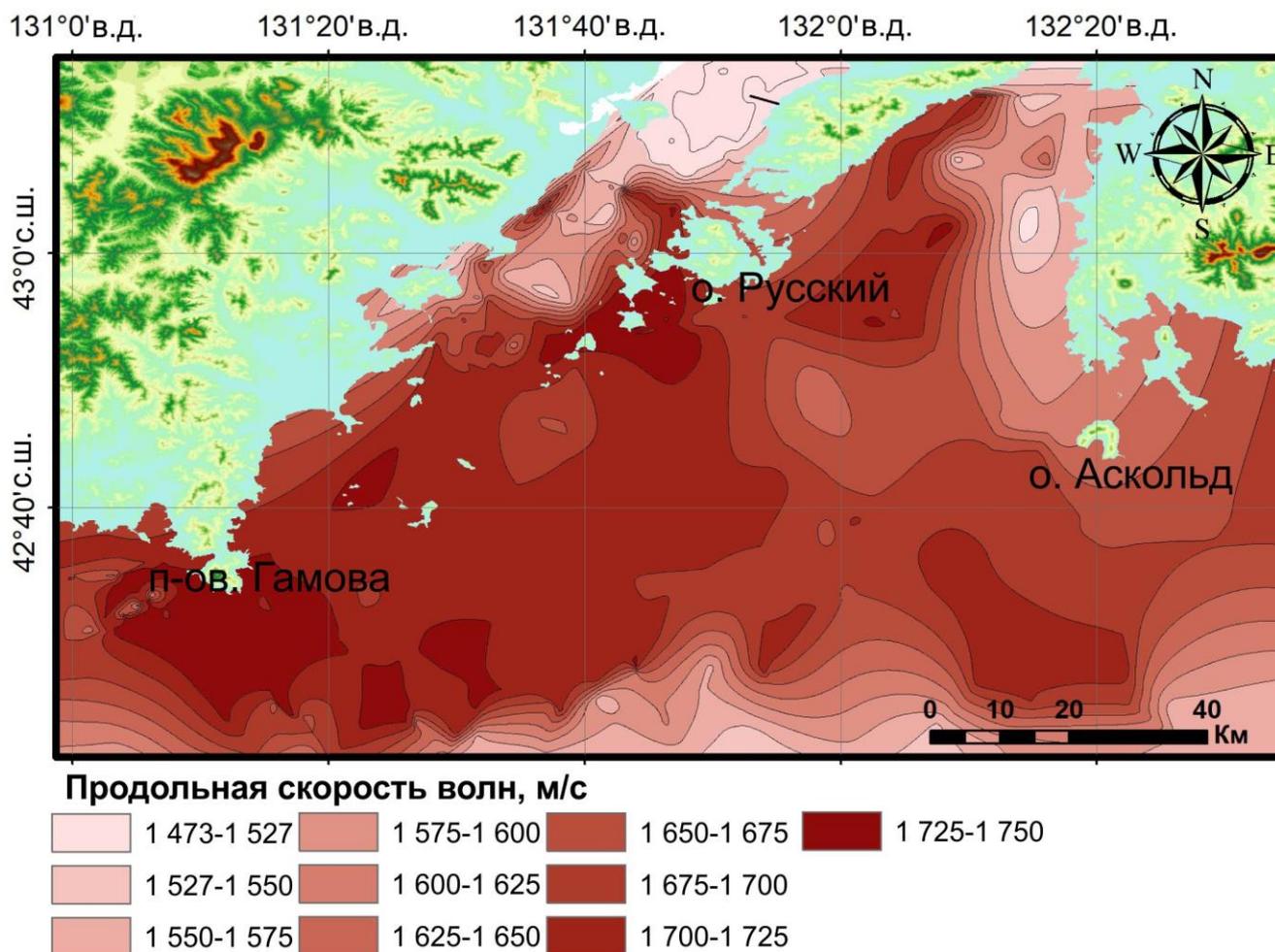


Рис. 2. Пространственное распределение скорости продольных волн на поверхности дна залива Петра Великого.

Применение геоакустической модели

Геоакустическая модель залива Петра Великого использовалась в теоретических и экспериментальных гидроакустических исследованиях. Применение геоакустической модели можно продемонстрировать на примере эксперимента с использованием моделирования распространения акустического сигнала на профиле от п-ова Гамова до о. Фуругельма (рис. 3). В эксперименте использовались сигналы 22 Гц с длиной волны только в воде порядка 68 м, при глубине моря 40–41 м. Каналом распространения низкочастотного сигнала в данном случае служат в основном рыхлые донные осадки. Таким образом, акустические параметры дна и его геометрия необходимы для корректного моделирования распространения акустического сигнала. Моделирование распространения акустического сигнала проводится в среде MatLab. Для работы в MatLab необходимо цифровую геоакустическую модель адаптировать, создать матрицы, где в узлах будут акустические параметры водного слоя и дна, распределенные по пространству с заранее выбранным масштабом. Расстояние между точками по профилю взято равным 100 м, с дискретностью по глубине в 1 м. Для водного слоя используются средние значения, вычисленные на глубинах порядка 40 м за семь лет наблюдений из ПО Ocean Data View в текстовый формат. В среде MatLab легко работать с текстовыми форматами, задавая одной переменной целый профиль с данными по акустическим параметрам, например $a = Vp_i$, где $i = 1, 2, \dots, 40 \sim 41$ м в зависимости от глубины места. Далее необходимо проинтерполировать одиночный вертикальный профиль средних значений акустических параметров водного слоя на весь акустический профиль с дискретностью 100 м. Получаем переменные с размерностью 41×122 символов.

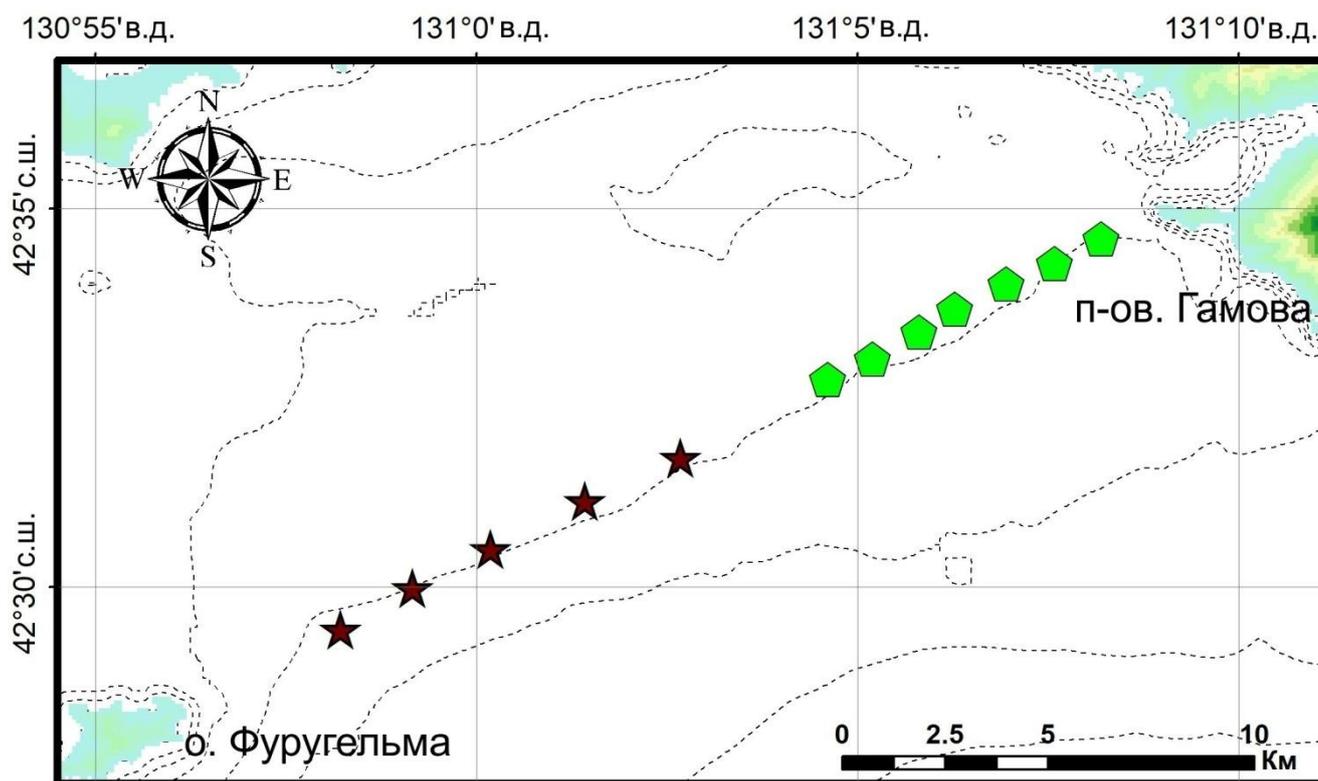


Рис. 3. Схема гидроакустического эксперимента. Пятиугольниками показаны автономные гидроакустические системы [3], звездочками – точки излучения сигналов 22 Гц [1].

Далее из ПО ArcGIS выбираем интересующий нас акустический профиль на базе пакета 3-D Analyst, который позволяет сформировать таблицы для каждого из акустических параметров рыхлых донных отложений. Расстояние по латерали между точками в ПО ArcGIS равно примерно 43 м, что не соответствует шагу интерполяции, принятой в моделировании акустического сигнала (100 м), а по вертикали – 1 м. Для дальнейшей работы необходимо переинтерполировать все акустические данные в ПО MatLab. Так как мощность осадочного слоя на профиле варьируется в пределах от 50 м до 400 м, получаем переменные (матрицы) в ПО MatLab с размерностью 400×122 символа.

В среде MatLab были созданы переменные, например «Model_Vp» размерностью 441×122, где ячейка – это скорость продольных волн по профилю, и так – для каждого акустического параметра. Изначально заполняем все ячейки нолями. Поскольку дискретность по вертикали равна 1 м, по латерали – 100 м, то переменная «Model_Vp» по факту описывает профиль длиной в 12200 м толщиной слоя 441 м. Ячейки в переменной «Model_Vp» заменяются на значения, полученные из ПО Ocean Data View и ArcGIS. Далее остаются поля с нулевыми значениями, которые должны соответствовать акустическим параметрам фундамента. Фундамент на акустической трассе представлен гранитоидами позднепермского возраста (γP_2). Скорость продольной волны для данного типа гранитов равна 5400 м/с. Поэтому нулевые значения в переменной «Model_Vp» меняем на 5400. Такие же манипуляции производим и для остальных переменных. После вышеперечисленных комбинаций можно приступать к моделированию распространения акустического сигнала.

На рис. 4 показан пример вертикального профиля в одной точке по акустическому разрезу модели «Model_Vp». Выделено четыре слоя: первый – водный, со скоростью продольной волны от 1492 м/с на поверхности до 1468 м/с у дна, второй слой – рыхлых донных отложений, состоящий из средне- и мелкозернистых песков, со скоростью продольной волны от 1698 м/с, с увеличением за счет уплотнения до 1731 м/с, третий слой – рыхлых донных отложений, состоящий из крупнозернистых песков, со скоростью продольной волны от 1800 м/с до 1925 м/с, и четвертый слой, состоящий из гранитов.

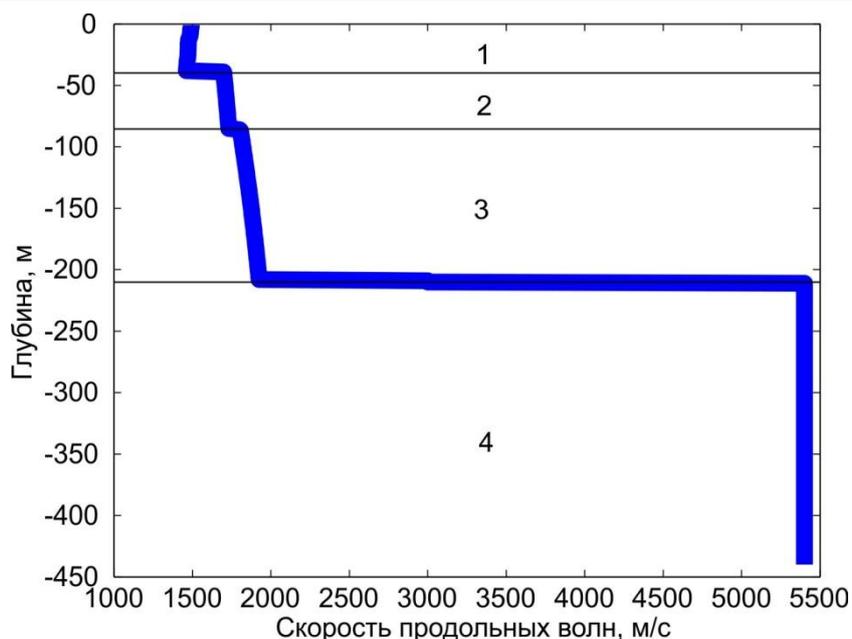


Рис. 4. Вертикальный профиль в одной точке на акустическом разрезе из модели распределения скорости продольных волн.

Заключение

Построенная геоакустическая модель суммирует имеющиеся геологические, геофизические, гидрологические и петрофизические данные и позволяет для заданных пространственных координат выбирать количественные значения параметров. Использование ГИС-систем позволяет оперативно создавать 2- и 3-D визуализации различных акустических параметров геологических структур интересующего участка шельфа, статистические данные по сезонам водной среды, а также упрощает дальнейшую работу с моделью, например в ПО MatLab. Последующая коррекция модели может быть выполнена в процессе решения обратных гидроакустических и сейсмических задач. При этом математическая обработка сейсмоакустических данных должна базироваться на численном моделировании процессов формирования звуковых волн в различных типах осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19–26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137–141.
2. Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярощук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии океанического дна залива Петра Великого Японского моря // Океанология. 2014. Т. 54, № 4. С. 538–545.
3. Леонтьев А.П., Ярощук И.О., Смирнов С.В. и др. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135.
4. 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.
5. Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Кошелева А.В. Результаты гидрологических и геолого-геофизических исследований залива Посьета // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1 (11). С. 64–68.
6. Самченко А.Н., Швырев А.Н., Пивоваров А.А., Коротченко Р.А. Распространение низкочастотного акустического сигнала в мелком море с учетом влияния неоднородностей в донных осадках // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2 (12). С. 52–56.

7. Ярощук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В. и др. Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 55–62.
8. Apel J.R., Badiéy M., Chiu C.-S., et al. An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. IEEE JOE. 1997(22);3:465-500.
9. Denner W.W., Simmen J.A. ASIAEX – the history and status. The 2nd intern. workshop on acoustical engineering and technology. Harbin, China. Oct. 1999. P. 1–10.
10. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. J. Acoust. Soc. Am. 1980(68):1313-1340.
11. Nordfjord S., Goff J.A., Austin J.A., Sommerfield C.K. Seismic geomorphology of buried channel system on the New Jersey outer shelf: assessing past environmental conditions. Marine Geology. 2005(214):339-364.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

Geoinformatics

DOI.org/10.5281/zenodo.1119189

Samchenko A.

ALEXANDER SAMCHENKO, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: samchenco@poi.dvo.ru

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS
43 Baltiyskaya Street, Vladivostok, Russia, 690041

The offshore geoacoustic simulation using geoinformation systems

Abstract: The article deals with the process of geoacoustic simulation carried out on a portion of shelf in geoinformation systems (GIS-systems) using the example of the Peter the Great Bay, Sea of Japan. The GIS-systems are represented by the *ArcGIS* packages used to store and visualise data on rocks of the shelf bottom. The data on the water layer are presented in the programme *Ocean Data View*, whereas the mathematical processing of the entire amount of the geoacoustic data was performed on the basis of the *MatLab* package. GIS-systems make it easier to work with the data on the geological structure and petrophysical properties of rocks, the physical properties of the aquatic environment and enable one to develop and visualise 2-D and 3-D models of the real environment. The developed algorithms for numeric geoacoustic model of the Peter the Great Bay were tried for the first time in the Russian Far East.

Key words: geoacoustic model, geoinformation systems, Peter the Great Bay.

REFERENCES

1. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., et al. A hydroacoustic system that radiates at frequencies of 19–26 Hz. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017(60);4:137-141.
2. Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. The spatiotemporal analysis of the bottom geomorphology in Peter the Great Bay of the Sea of Japan. *Oceanology*. 2014(54);4:538-545.
3. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., et al. A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017(60);1:128-135.
4. Samchenko A.N., Karnaukh V.N., Aksentov K.I. Geoscience top of the sedimentary cover and Geoacoustic model shelf on the Pos'eta Gulf (Sea of Japan). *Pacific Geology*. 2013(32);1:65-75.
5. Samchenko A.N., Pivovarov A.A., Kosheleva A.V. The results of the hydrological and geological and geophysical studies of the Gulf Pos'eta. *Underwater research and robotics*. 2011(11);1:64-68.
6. Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A., Korochenko R.A. Distribution of low-frequency acoustic signal in a shallow sea with the influence of irregularities in the bottom sediments. *Underwater research and robotics*. 2011(12);2:52-56.
7. Yaroshchuk I.O., Leont'ev A.P., Kosheleva A.V., et al. On intense internal waves in the coastal zone of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan). *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016(41);9:55-62.
8. Apel J.R., Badiey M., Chiu C.-S., et al. An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE JOE*. 1997(22);3:465-500.
9. Denner W.W., Simmen J.A. ASIAEX – the history and status The 2nd international workshop on acoustical engineering and technology. Harbin. China. Oct. 1999:1-10.
10. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980(68):1313-1340.
11. Nordfjord S., Goff J.A., Austin J. A., Sommerfield C.K. Seismic geomorphology of buried channel system on the New Jersey outer shelf: assessing past environmental conditions. *Marine Geology*. 2005(214):339-364.