

УДК 534.631; 550.83(26)

АКУСТИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

© С.И. Донченко, 2004

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г.Запорожье

У роботі розглянуто акустичні і механічні властивості донних структур. Приведено опис літолого-стратиграфічного розрізу донних відкладів Чорного моря. Показано ефективність високопродуктивних панорамних гідроакустичних систем дистанційного зондування дна для одержання даних про особливості і детальність донних відкладів акваторій під час проведення інженерної розвідки, геологічних, археологічних, екологічних досліджень і пошукових робіт, а також при оцінці стану гідротехнічних споруд на дні водойм і річок.

В работе рассмотрены акустические и механические свойства донных структур. Приведено описание литолого-стратиграфического разреза донных осадков Черного моря. Показана эффективность высокопроизводительных панорамных гидроакустических систем дистанционного зондирования дна для получения данных об особенностях и деталях дна акваторий при проведении инженерных изысканий, геологических, археологических, экологических исследований и поисковых работ, а также при оценке состоянии гидротехнических сооружений на дне водоемов и рек.

In this paper, acoustic and mechanical properties of bottom structures are considered. The description of the lithologic-stratigraphical section of the Black Sea bottom deposits is given. High-performance panoramic hydroacoustic remote sensing systems to get bottom characteristics data and components of water space to realize engineering survey, geological, archaeological, ecological investigations and prospecting work in addition to the state value of hydroengineering constructions at the bottom waters and rivers is shown.

Дно Чорного моря було предметом спеціальних досліджень ще со времен античності. В итоге современных промеров в акватории моря выделяется на дне три главных геоморфологических элемента: шельф, материковый склон, глубоководная впадина [1].

Шельф Чорного моря – это прибрежная часть морского дна до глубин 90-110 м. Геологические структуры шельфа являются продолжением структур суши [1].

Материковый склон соответствует узкой зоне крутого перегиба морского дна от внешнего шельфа до глубин 1830 м [1].

Глубоководная впадина Чорного моря (36% акватории) вытянута с запада на восток в форме овала, слегка наклонена к югу, дно ее относительно ровное, глубины повсеместно более 2000 м [1].

Полезные ископаемые Чорного и Азовского морей были одним из наиболее важных объектов исследования в последние годы и наибольший интерес представляют нефтяные и газовые месторождения. Потенциально нефтегазоносна вся акватория Чорного моря, где широко развиты грязевые вулканы и газовые факелы, и вероятно обнаружение залежей газогидратов [1].

На шельфе Чорного моря, в Азовском море выявлены месторождения строительных песков, с которыми тесно связаны россыпные проявления ильменита, рутила, циркона, магнетита, россыпи тонкого и дисперсного золота. На шельфе обнаружены железомарганцевые конкреции, неогеновые оолитовые железные руды, обнаружены точки высачивания пресных вод, в отшнурованных заливах шельфа – лиманах – месторождения солей и лечебных грязей.

В глубоководной части Чорного моря большой интерес представляют минерализация сульфидов в кристаллических породах, сапропели, газогидраты метана [1].

Морские отложения – закономерно построенные комплексы осадочного материала различного генезиса, формирующиеся на дне морей и океанов в результате разноса, дифференциации и осаднения материала [2].

Существует общепринятая классификация морских отложений (табл. 1) по Безрукову П.Л., Петелиной В.П. и Алексиной И.А. [2].

Таблица 1. Классификация донных отложений.

Группы	Подгруппы	Типы осадков
I. Терригенные	Терригенные осадки	
II. Биогенные	1. Кремнистые	- диатомовые - диатомово-радиоляриевые - кремнегубковые
	2. Карбонатные (подразделяются на планктогенные и бентогенные)	- фораминиферовые и кокколито-фораминиферовые (нанопланктонный ил или кокколитовый ил) - птероподово-фораминиферовые - кораллово-водорослевые - ракушечные - мшанковые
	3. Кремнисто-карбонатные	- диатомово-фораминиферовые - радиоляриево-фораминиферовые
III. Полигенные	Глубоководные красные глины	
IV. Пирокластические	Пирокластические (вулканогенные)	
V. Аутигенные		- железомарганцевые конкреции и коры - фосфориты - оолиты

Основы стратиграфического расчленения четвертичных отложений Черного моря разработаны Н.И. Андрусовым, А.Д. Архангельским, Н.М. Страховым, П.В. Федоровым, Л.А. Невеской [3], Е.Ф. Шнюковым [1], П.Ф. Гожиком, В.Н. Семеновым, В.И. Старостенко, В.Н. Еремеевым.

Сводный разрез глубоководных донных осадков Черного моря по литературным данным и исследованиям Института геологических наук НАН Украины, Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, Морского гидрофизического института, Отделения морской геологии и осадочного рудообразования Национального научно-природоведческого музея НАН Украины [3] таков:

1. Современный слой осадков представляет собой поверхностный слой осадков мощностью до 1 м (максимальная мощность 1,09 м), состоящий из чередования тончайших прослоев (0,5-3 мм) илистого материала с включением кокколитов.

2. Древнечерноморские осадки характеризуются повышенным количеством органического вещества. Этот комплекс состоит из трех слоев:

Верхний переходной слой, обогащенный органическим веществом, представлен мягкопластичными серыми, а в местах скопления сапропелевого материала - бурыми микрослоистыми илами. Мощность этого слоя около 0,20 м (максимальная 0,60 м). Верхняя граница комплекса четко фиксируется почти постоянным присутствием в его кровле турбидитоглинистых прослоев.

Средний слой представлен однородным, плотным, резиноподобным, оливково-зеленым до черного сапропелем. Его мощность в среднем составляет 0,40-0,50 м при максимальном значении 0,80 м.

Нижний слой представлен пелитовым темно-серым с зеленоватым оттенком илом, для которого характерно повышенное содержание органического вещества. При этом часто они разделены и прослоем турбидита.

3. Новозвксинские осадки вскрыты не на полную мощность (до 3 м от их кровли). Вскрытый разрез новозвксинских осадков представлен тремя пачками [3]:

Верхняя пачка сложена известковыми светло-серыми илами мощностью до 0,40 м. Вверху на границе с сапропелевым горизонтом часто отмечается турбидитовый прослой. Такой же прослой (до 0,1-0,11 м) есть и на нижней границе этих илов.

Ниже расположена пачка терригенных пелитовых илов, пластичных голубовато-серых с примазками и прослоями гидротроилита в нижней части. Иногда в толще этой пачки присутствует турбидитовый горизонт (до 0,12 м), в основании которого представлены прослои мелкозернистого песка, сменяющегося кверху илистыми осадками, а также включения плотной желтовато-бурой глины.

Самая нижняя из вскрытых в районе пачек новозвксинского возраста представлена черными гидротроилитовыми илами, иногда с небольшими прослоями терригенного голубовато-серого ила.

В глубоководной части Черного моря выделяются три генетических типа осадков: терригенные, биогенные и терригенно-биогенные. Текстура осадков слоистая, иногда скрытослоистая или неслоистая, текучей или мягкой консистенции [3].

Биогенные илы представлены кокколитовыми, сапропелевыми, сапропелевидными и сапропелево-кокколитовыми разностями.

Терригенные илы - это алевроитовые или алевроитово-пелитовые илы с неявно выраженной слоистостью. Залегают терригенные илы в виде линз, прослоек среди других разностей или же образуют самостоятельные горизонты различной мощности.

По гранулометрическому составу илы - пелитовые, алевроитово-пелитовые и алевроитовые. Особенностью данных отложений является нахождение в них фаунистических остатков.

По физико-механическим свойствам илы представлены разновидностями от жидких до текучих и мягкопластичных. В табл. 2 приведена зависимость скорости звука от физико-механических характеристик двух типов грунта [7].

Таблица 2. Зависимость скорости звука от физико-механических характеристик грунта.

Влажность, %	Скорость звука, м/с	Плотность, г/см ³	Модуль сдвига, кН/см ²	Коэффициент Пуассона
Тонкозернистый песок				
34,6	1570	2,12	49,8	0,12
29,0	1570	2,22	52,1	0,13
19,6	1680	2,37	62,5	0,23
17,1	1740	2,41	65,9	0,36
15,2	1800	2,44	75,4	0,18
13,8	1800	2,46	75,1	0,23
Алеврит				
22,0	1580	2,36	57,1	0,09
14,3	1600	2,45	59,0	0,19
11,3	1700	2,55	59,7	0,28
7,0	1700	2,62	60,7	0,32
7,2	1700	2,62	59,4	0,38
5,7	1700	2,64	60,7	

По акустическим свойствам донные осадки описываются такими характеристиками, как скорость распространения упругих колебаний (скорость звука), коэффициенты отражения, рассеяния на границах слоев осадка, затухания акустических сигналов в осадке [4]. В табл. 3 приведены некоторые характеристики акустических свойств морских осадков.

Скорость продольных волн возрастает с уменьшением пористости и увеличением размера зерен.

Таблица 3. Акустические свойства морских осадков [4]

Осадок	Глубина, м	Ср. диаметр фракции, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Скорость, м/с	Затухание, дБ/м	Частота, кГц
Песок:							
Грубый	32	0,5704	2,060	38,0	1817	3,4	7,0
						6,6	14,0
	20	0,5783	2,090	38,3	1752	53,1	100,0
		0,4931	2,008	39,2	1798	1,5	3,5
						3,8	7,0
						6,8	14,0
	19	0,2517	2,000	40,9	1630	47,3	100,0
		0,3686	2,004	39,1	1737	9,4	26,6
		0,3510	2,000	40,1	1714		
		0,3660	2,000	39,2	1740		
		0,4010	1,990	40,8	1815		
Тонкий	8	0,1708	1,967	45,6	1686	1,7	3,5
						8,2	7,0
						7,2	14,0
	9	0,2365	1,973	44,0	1645	9,4	25,0
	10	0,8817	1,926	46,7	1684	52,1	100,0
		0,1780	1,960	43,9	1693	9,6	26,0
		0,1770	1,990	41,0	1742		
		0,1900	1,940	46,4	1680		
		0,1870	1,930	46,5	1703		
очень тонкий	13	0,1015	1,933	47,0	1708	1,5	3,5
						3,5	7,0
						7,0	14,0
	16	0,1119	1,938	47,4	1667	55,9	100,0
		0,1210	1,950	43,3	1716		
		0,1070	1,970	47,3	1725		
Песчано-илистая глина	4	0,0130	1,512	72,3	1483	0,7	14,0
	17	0,0120	1,750	59,3	1527		
		0,0302	1,721	58,0	1490	59,7	100,0
Глинистый ил	1300	0,0055	1,27	83,8	1453	1,0	14,0
	1110	0,0058	1,300	82,5	1457	0,6	14,0
	1087	0,0058	1,374	77,8	1450	1,2	7,0
						2,3	14,0
	1012	0,0060	1,349	79,1	1441	2,4	14,0
	951	0,0055	1,380	78,9	1449	4,0	2,5
	22	0,0146	1,600	65,6	1464	18,0	100,0
		0,0126	1,605	65,5	1508	2,8	23,2
		0,0550	1,336	80,0	1495	1,6	22,8
			1,200	69,2	1530		
			1,150	92,1	1525		
		0,0050		80,0			
				75,0	1463	26,2	250,0
					1621	0,2	1,0
		0,0060	1,370	78,6	1450		
		0,0060	1,360	78,5	1450		
Песчаный ил	13	0,0533	1,860	51,2	1617	74,3	100,0
	20	0,0286	1,702	60,9	1572	8,0	25,0
		0,4210	1,737	57,4	1541	11,8	23,6
Илистый песок	17	0,0298	1,680	61,3	1537	60,9	100,0
		0,1259	1,796	53,2	1551	20,6	23,9
			1,320	82,2	1540		
Ил	15	0,0216	1,690	60,9	1465	15,9	100,0
		0,0259	1,653	61,5	1548	7,8	24,2
		0,0250	1,900	46,6	1622		
Илистая глина			1,130	93,3	1525		
Взвесь («грязь»)		0,0060	1,320	76,0	1480		
Глина		0,0010	1,450	74,5		31,9	368,0
					1615	54,0	250,0

Поскольку между размером зерен и пористостью существует почти обратно пропорциональная зависимость, изменение скорости связано с пористостью следующим образом: скорость медленно увеличивается с уменьшением пористости, а затем, при пористости около 50 %, несколько возрастает (рис. 1). На рис. 1 также приведены кривые, рассчитанные для глинистых минералов и для кварца согласно уравнению Вуда.

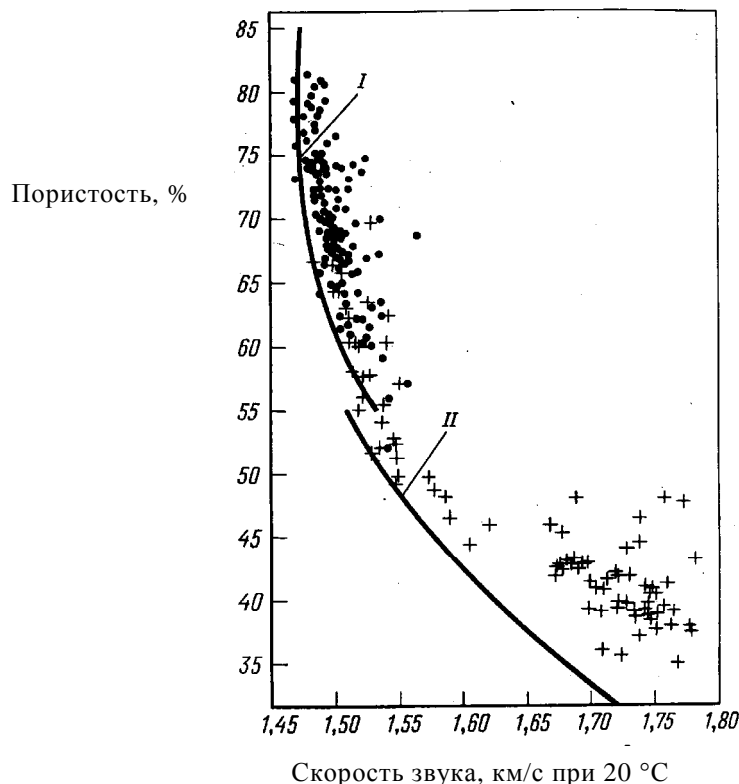


Рис. 1. Зависимость скорости звука от пористости осадков.
Кривые — результаты расчетов по уравнению Вуда
для случая мелкозернистых (I) и крупнозернистых (II) осадков [2].

Изменения скорости звука в зависимости от частоты настолько малы, что о них трудно судить.

Все осадки обладают сдвиговой жесткостью (в них могут распространяться поперечные волны), и, по-видимому, эта жесткость максимальна у мелкозернистых песчаных осадков, хотя последнее нельзя утверждать с уверенностью [7]. Не наблюдается связи между прочностью на сдвиг и акустическими характеристиками грунта (за исключением слабо выраженной зависимости от акустического импеданса).

В результатах исследований некоторых авторов сделана попытка учета при оценке скорости звука в рыхлых осадках пористости как функции плотности упаковки зерен твердого скелета [4]. Коэффициенты отражения на границах рыхлых осадков и коренных пород приведены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты отражения на границах рыхлых осадков и коренных пород

Породы	Осадки		
	Газосодержащие илы	Пески	Галечники
Галечники	0,11–0,72	0,02–0,63	0,09–0,45
Известняки	0,31–0,83	0,21–0,77	0,02–0,64
Сланцы кристаллические	0,63–0,83	0,49–0,78	0,29–0,65
Граниты	0,63–0,81	0,49–0,77	0,29–0,60
Базальты	0,70–0,83	0,57–0,78	0,40–0,65

Характеристики отражения акустических волн различными объектами имеют первостепенное значение для расчета гидролокационных систем, для выбора их параметров и получения гидролокационной информации о рельефе и строении дна (рис. 2).

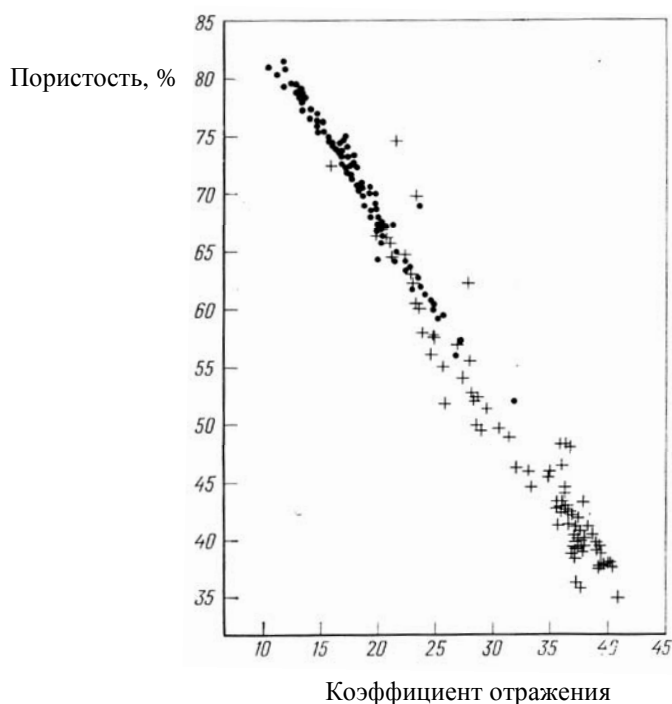


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от пористости осадков [7].

Анализ многочисленных экспериментальных данных по отражению и рассеянию звука дном океана показывает, что на частотах ниже нескольких кГц акустические свойства дна глубокого океана определяются в основном характеристиками верхних слоев, слагающих подводный грунт, их толщиной, скоростью звука и поглощением в них. На более высоких частотах отражение и рассеяние звука в основном определяются характером неровностей дна.

При натуральных измерениях распространения звука низкой частоты в алевритах, песках и скальных породах поглощение звука линейно зависит от частоты. Точные же лабораторные исследования на высоких частотах (0,1 - 1,0 МГц) показывают, что эта зависимость носит степенной характер, а показатель степени лежит в пределах 0,5 - 2,0. По-видимому, корреляции между величиной показателя степени и механическими характеристиками осадков не имеется; однако при очень малом диаметре зерен (менее 1 мкм) и высокой пористости (более 80 %) имеет место зависимость $\sim f^2$.

При фиксированной частоте и размере зерен поглощение уменьшается с ростом температуры.

Самым продуктивным является подход, основанный на положениях теории упругости, которая успешно используется в сейсмологии [6].

Метод Био позволяет учесть движение жидкости в порах осадков относительно твердых частиц либо пренебречь этим движением. Основное положение метода Био состоит в том, что необходимо учитывать не только свойства отдельных составляющих осадков, но и взаимодействие между ними.

На рис. 3 показана зависимость изменения модуля сдвига от пористости, которая получена при исследовании распространения сдвиговых волн (как в натуральных, так и в лабораторных условиях) в небольшом числе образцов [6].

Можно оценить модуль сдвига каждого образца, если известны средний размер его зерен, пористость или плотность. Наиболее надежную оценку можно получить, зная средний размер зерен, так как отклонение экспериментальных данных от линии регрессии для зависимости модуля сдвига от размера зерен меньше, чем для зависимостей от двух других параметров.

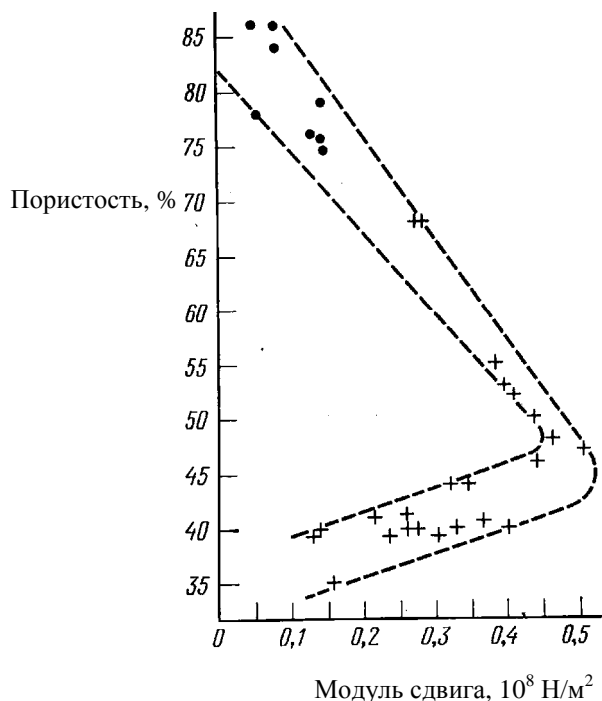


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига от пористости осадков

Затухание звука происходит посредством двух механизмов:

- а) потери на контактное трение в осадках с соприкасающимися зернами, характеризующиеся линейной зависимостью коэффициента затухания от частоты;
- б) вязкие потери при взаимодействии жидкой и твердой фаз, характеризующиеся зависимостью $\sim f^{1/2}$.

По мере уменьшения среднего диаметра частиц возрастает процентное содержание зерен, размеры которых характерны для глин, и начинает действовать другой механизм взаимодействия частиц друг с другом. Последнее обстоятельство приводит к ослаблению относительного движения твердых частиц и жидкости и, следовательно, к уменьшению вязких потерь[2].

Коэффициент затухания представляет собой величину уменьшения давления, выраженную в децибелах на единицу расстояния.

Затухание продольных волн максимально в песчаных осадках и уменьшается как с увеличением, так и с уменьшением размеров зерен.

На рис. 4 показана зависимость коэффициента затухания от среднего размера зерен, рассчитанная для частоты 50 кГц. Здесь же для сравнения приведены результаты натуральных измерений.

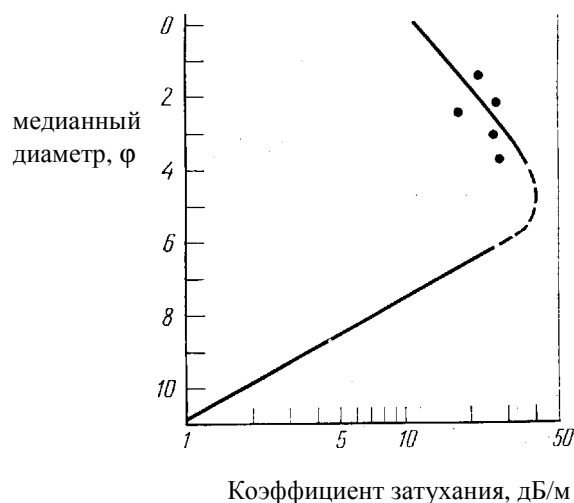


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания на частоте 50 кГц от размера зерен. Точки — данные натуральных измерений, кривая — линия регрессии, соответствующая данным лабораторных измерений.

Отмечается, что зоны Черного и Азовского морей находятся под влиянием целого комплекса негативных факторов, включающих загрязнения разного рода химическими соединениями, газовыделения [2, 8] и др. При этом происходит смена скорости и соотношения этих деструктивных процессов в сторону их усиления. Вследствие этого резко ухудшается качество водной среды, снижается потенциал процессов самоочищения, происходит деградация биологических ресурсов.

Необходимость детального исследования гидроакустическими средствами района активного газовыделения обусловлена освоением дна в народнохозяйственных целях (нефте- и газопроводы). Наличие газовых факелов можно обнаружить гидроакустическими средствами. Активное газовыделение, в т.ч. утечки газопроводов, не может не влиять на изменение многих параметров, составляющих системное окружение экосистем и влияющих на их существование. Резкое изменение активности газовыделений может вызвать необратимые изменения состояния экосистем и экологические катастрофы.

На рис. 5 приведен результат, полученный при использовании сейсмического метода высокого разрешения 3D (Diaconescu e.a., 2001), который позволяет определить нижнюю и верхнюю границы гидратонасыщенных пород, а также концентрацию гидрата в породах, на основании чего можно оценивать ресурсы газа, выбирать место бурения геологоразведочных скважин для первичной оценки залежи.

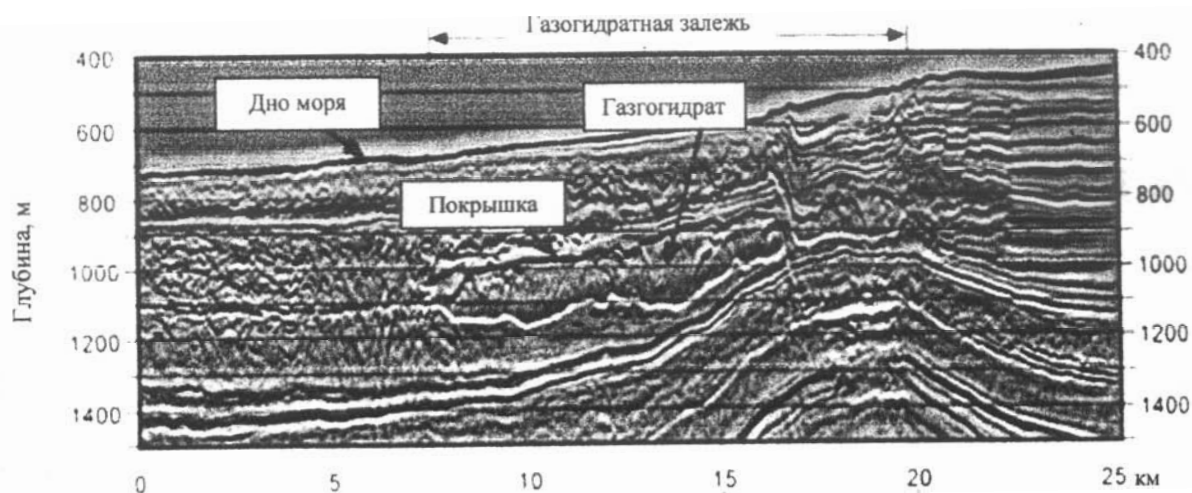


Рис. 5. Сейсмограмма разреза дна.

Доказанное наличие газогидратов в поверхностном слое осадков Черного моря свидетельствует о связи выявленных акустических аномалий с нижней границей зоны гидратообразования. Мощность зоны, в которой возможно гидратообразование, не превышает в Черном море сотен метров, поэтому применение гидроакустических методов представляется вполне возможным.

Высокопроизводительные панорамные гидроакустические комплексы дистанционного зондирования дна, обладающие высокой вероятностью, достоверностью обнаружения элементов донной реверберации и затонувших объектов эффективно используются для получения данных об особенностях и деталях дна акваторий [4].

По результатам экспериментальных данных, полученных в 57-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» (2002), были выполнены исследования звукорассеивающих свойств морских грунтов с различной плотностью с целью определения возможности прогнозирования их определения в зависимости от плотности грунта и параметров аппаратуры.

С помощью узконаправленных антенн ГБО, позволивших исключить влияние побочных отражений и реализовать пространственную избирательность по координатам исследуемой поверхности в пределах периода посылки, получены уровни сигналов донной реверберации в рабочем диапазоне углов скольжения акустического луча ГБО для грунтов типа илистый песок, ил с примесью ракушки, песчанистый ил, ил с плотностью от 1,275 до 1,870 г/см³ при различных параметрах аппаратуры (φ_{Γ}, τ) и различных глубинах места, по которым оценены коэффициент обратного рассеяния $m_{обр}$ и эквивалентный радиус донной реверберации $R_{др}$ по формулам [4]:

$$R_{др} = \sqrt{\frac{c \tau m_{обр} N \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}}{\cos \theta}} \quad (1)$$

$$m_{обр} = \frac{U_c^2 32 \pi R_H^3 e^{0,968 R_H} \operatorname{ctg} \theta}{\gamma_{\Pi}^2 \rho c^2 P_a \tau (2\lambda / 3d) R^4(\theta) k} \quad (2)$$

где $m_{обр}$ – коэффициент обратного рассеяния;

U_c – уровень эхо-сигнала, мкВ;

R_H – наклонное расстояние (дальность) от объекта до антенны, м;

$R(\theta)$ – характеристика направленности антенны в вертикальной плоскости;

γ_{Π} – чувствительность антенны в режиме приема, мкВ/Па;

τ – длительность зондирующего импульса, с;

H – глубина под антенной, м;

φ_{Γ} – ширина ХН антенны в горизонтальной плоскости, град;

P_a – акустическая мощность;

λ – длина звуковой волны, м;

ρ – плотность среды распространения звука (воды), кг/м³ ;

k – волновое число, $k = 2\pi/c$;

c – скорость звука в среде (воде), м/с;

$R_{др}$ – радиус донной реверберации, м;

θ – угол наблюдения, град.

Тип и плотность грунта в местах определения $m_{обр}$ и $R_{др}$ определены по грунтовым пробам. Эти данные дают возможность по известным $R_{др}$, глубине H и плотности грунта ρ на

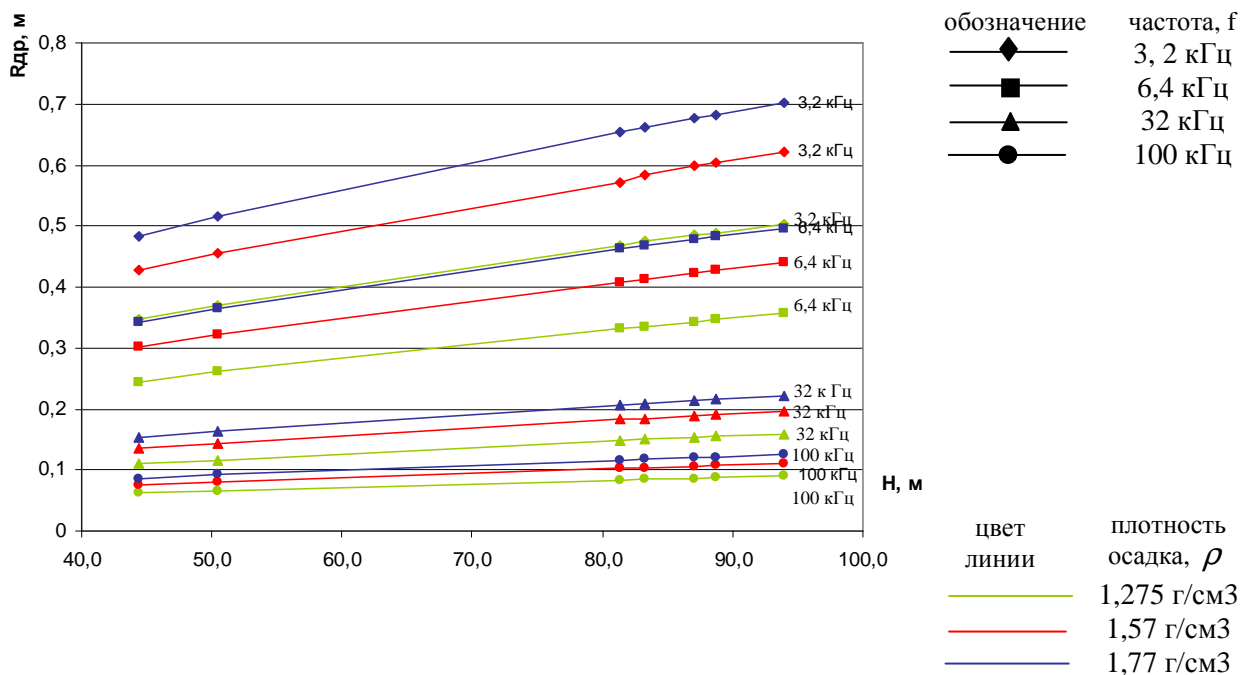
известной глубине производить оценку величины $R_{др}$ при любой глубине под акустическими антеннами и соответствующих энергетических параметрах аппаратуры [4].

Перерасчет производится по формуле

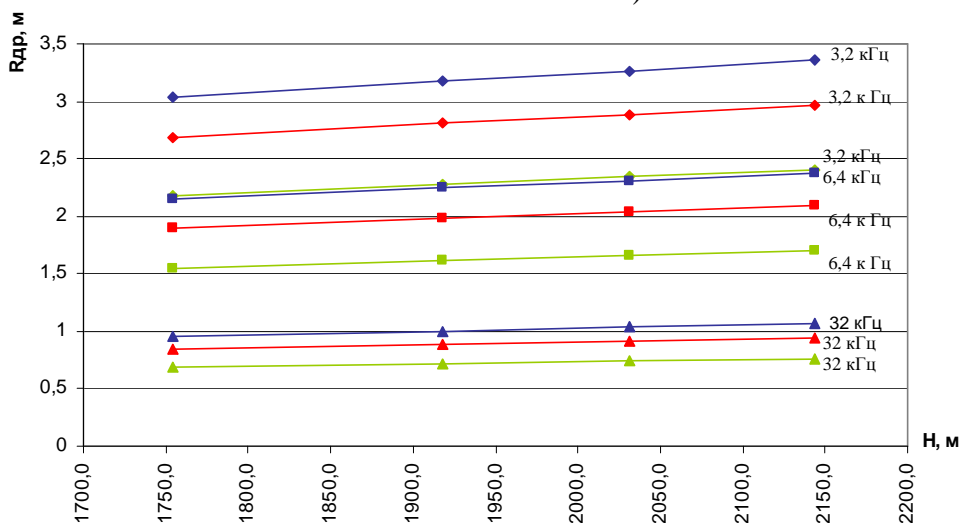
$$\frac{R_{др1}}{R_{др0}} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \sqrt{\frac{\tau_1 H_1 \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma_1}}{\tau_0 H_0 \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma_0}}} \quad (3)$$

где индекс «0» относится к известному $R_{др}$, индекс «1» – к определяемому $R_{др}$ на глубине H_1 при плотности грунта ρ_1 , длительности зондирующего импульса τ_1 и ширине характеристики направленности в горизонтальной плоскости φ_{Γ_1} .

Зависимость $R_{др}$ от глубины H , рабочей частоты f и плотности грунта ρ приведена на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. а), б) – экспериментальная зависимость радиуса донной реверберации от глубины для различных частот

Параметры эхо-сигналов, возникающих в результате взаимодействия зондирующего акустического сигнала с дном, существенно зависят от характера рельефа дна, стратификации и акустических свойств донных осадков [4].

Учитывая стратегическую необходимость и масштабность разведки сырьевых ресурсов дистанционными методами [5] комплексная обработка данных позволяет получить детальную информацию об особенностях рельефа, динамике изменения донных отложений, типах грунтов и лежащих на дне экологически опасных объектах.

В настоящее время имеющихся данных достаточно для прогнозирования как механических, так и акустических свойств морского дна, если известны некоторые параметры осадков (в особенности пористость и размер зерен). Эти параметры можно оценить по результатам акустических измерений.

Полученные пересчетом значения $R_{др}$ могут быть использованы при выборе основных параметров панорамных гидро- и геоакустических комплексов для масштабных исследований акваторий по разведке сырьевых и биологических ресурсов, обнаружению деталей донного рельефа, затонувших объектов (надводных кораблей, подводных аппаратов, подводных лодок, трубопроводов, кабельных трасс и других технических объектов) с высокой вероятностью обнаружения.

Литература

1. Е.Ф. Шнюков, А.П. Зиборов. Минеральные богатства Черного моря// Отделение морской геологии и осадочного рудообразования ННПМ НАН Украины. – Киев, 2004.-280 с.
2. Леонтьев О.К. Морская геология (Основы геологии и геоморфологии дна Мирового океана): Учебник для географ. и океанолог. спец. ун-тов. - М.: Высшая школа, 1982. - 344 с., ил.
3. Геологическая оценка трасс линий связи Севастополь-Евпатория, Севастополь-Керчь, Севастополь-Поти. - К., 2003. - 178 с.
4. А.И. Гончар. Проблема создания высокоэффективных многоцелевых гидролокаторов бокового обзора// НТЦ ПАС НАН Украины. – Запорожье, 1998. – 145 с.
5. Гидроакустические методы и средства исследования дна Мирового океана. Под редакцией А.И.Гончара. - НТЦ ПАС НАН Украины. - Запорожье, 2002. -222 с.
6. Физика океана. Под редакцией А.С. Моница. Т. 2. М., «Наука», 1978. - 456с.
7. Акустика морских осадков. Под редакцией Л.Хэмптона. - М.: Изд-во «Мир», 1977. - 534 с.
8. Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. Сб. научн. тр. /НАН Украины, МГИ. Редкол.: Еремеев В.Н. (отв. ред.) и др. – Севастополь, 2000. – С.173. Ил. 40. Табл. 11.