

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАСЧЛЕНЕННОСТИ РЕЛЬЕФА ДНА НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО КРЫМА

А.И. Авдеев, Н.П. Булгаков,
В.Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Калитанская, 2
E-mail: belo@ukrcom.sebastopol.ua

На основе материалов подробной эхометрической съемки и программного обеспечения рассчитаны количественные морфометрические характеристики расчлененности рельефа для подводной окраины Западного Крыма. Приводятся результаты статистических расчетов, дается их геоморфологический анализ.

В настоящее время основным методом съемки подводного рельефа дна является эхолотирование, проводимое с применением различных систем эхолотов, с регистрацией измеряемых глубин, как в аналоговом (лента самописца), так и в цифровом виде. Частота измерений, в зависимости от назначения эхолота, меняется от долей секунды до нескольких секунд, что создает возможность получения непрерывной записи подводного рельефа в виде профиля дна. Точность отсчета глубин зависит от частоты посыльных импульсов и ширины ленты самописца. Применение в качестве прецизионного самописца глубин (ПСГ) фототелеграфного аппарата "Ладога" в качестве приставки к судовым эхолотам на экспедиционных судах МГИ НАНУ с 1964 г. позволяет при работе на диапазоне 0-750 м достигнуть отсчетной точности 1.6 м в 1 мм бумажной ленты. Рабочая ширина записи равна 460 мм.

С самого начала исследований рельефа дна в МГИ вопросам измерения глубин, их первичной обработке и автоматизации промерных работ придавалось большое значение. Продуктом полной обработки промерных данных являются профили рельефа дна и батиметрические карты. В процессе эхометрической съемки для разнесения глубин на карте или построения профилей выбирались глубины, соответствующие точкам перегиба профиля, экстремальные глубины форм подводного рельефа и глубины, ближайшие к стандартным изобатам. На эхограмму автоматически подавались 5-минутные отметки судового времени и расстояния через каждую пройденную милю.

Сложилась собственная методика измерений и обработки глубин, более рациональная по затратам времени и достигаемым результатам [1]. После установки в 1965 г. на НИС "М. Ломоносов" ЭВМ "Днепр-1" (первой ЭВМ на исследовательских судах СССР) совместно с сотрудниками Института кибернетики проведена отладка программ для решения таких задач как расчет обсервованных координат судна, расчет координат измеренных глубин и вероятнейших координат гидрофизических станций, измерений и т.д. Одновременно осуществлялась разработка принципов и схем блоков автоматизации измерительного процесса, что позволило в 1967 г. выполнить экспериментальный промер протяженностью более 2000 миль с регистрацией глубин на перфоленту и расчетам координат судна с интервалом каждые 5 мин. [1]. Все эти эксперименты, разработка новых схем и принципов автоматизации позволили создать (1969 г.) специальный автоматизированный промерный комплекс (АПК) "Рельеф-1" сбора и обработки информации о рельефе дна.

Созданный на основе разработок МГИ АПК обеспечивает выполнение в цифровом коде:

- автоматическое получение глубин от судовых эхолотов
- расчет текущих координат по данным судового лага и гирокомпаса с выдачей на печать
- оптимизация отбора глубин с целью составления карт
- регистрация информации, обработанной комплексом

Обработка материалов эхосъемки включает два основных процесса: построение профилей рельефа дна, обычно в соотношении масштабов 1:37 и построении батиметрических карт, осуществляемых вручную или, в случае детальных промерных работ, - на графопостроителе. Составление морских батиметрических карт, лишенное возможностей непосредственного обозрения местности, обычного при построении карт топографических, отражает осредненные черты расчлененности подводного рельефа, детали которого частично маскируются. Вследствие этого основным источником при изучении расчлененности служат профили рельефа дна, составленные по эхограммам.

Одним из приемов при анализе результатов промерных съемок еще на начальном этапе геоморфологических работ в океане, включал измерение основных параметров расчлененности подводного рельефа: средних и экстремальных глубин,

углов наклона склонов, уступов и т.д. Увеличивающиеся объемы экспедиционных исследований и необходимость обработки большого количества данных привели к необходимости использования математических методов обработки профилей рельефа дна и эхограмм с помощью вычислительной техники.

Как показала практика геоморфологических исследований [2], наиболее простой по процессу обработки материалов эхосъемки и интерпретации полученных результатов анализа является методика разделения кривой подводного рельефа на основные определяющие элементы: углы наклона, вертикальное и горизонтальное расщепление (ВР и ГР). Вычисляются также имеющие вспомогательное значение средние и экстремальные глубины, асимметрия, эксцесс и другие параметры.

Первые в МГИ исследования рельефа дна Черного моря с борта НИС "М. Ломоносов" были выполнены в 9-м экспедиционном рейсе в 1960 г. Планомерные исследования Черного моря начались после перебазирования МГИ в Севастополь (1961 г.). В первых черноморских рейсах глубины снимались с лент стандартных самописцев эхолотов (9, 16 рейсы "М. Ломоносов"), затем с эхограмм, прецизионного самописца глубин (ПСГ) ФТА "Ладога" (21, 22 рейсы "М. Ломоносов"). С появлением НИС "Академик Вернадский" и установкой на борту АПК "Рельеф" промер проводили в 7-м, 8-м (1973 г.), 14-м (1976 г.) и 15-м (1977 г.) рейсах. Количество черноморских рейсов возросло с вступлением в строй в 1981 г. НИС "Проф. Колесников". В последние годы съемки подводной окраины Крыма проведены в 37-м геологическом рейсе НИС "Акад. Вернадский", и 53-м рейсе НИС "М. Ломоносов".

Для получения широкого спектра морфометрических показателей и последующего их анализа выполнена обработка данных рельефа дна подводной окраины Западного Крыма, на основе массива материалов эхометрических съемок, проведенных НИС МГИ, другими организациями и ведомствами. Наиболее подробно они характеризуют рельеф подводной окраины, ограниченной параллелями 44-45° с.ш. и меридианами 31°30' -33°30' в.д. Общая протяженность 22 широтных промерных галсов составляет 2020 миль (Рис. 1). В пределах съемки - внешняя часть шельфа, материковый склон и западное материковое подножие Черного моря,

Непосредственный расчет на персональном компьютере осуществлялся комплексом программ, написанных на языке TurboPascal, обеспечивающем вывод информации в форматах, совместимых с широко распространенными Windows-пакетами типа Grapher и Surfer.

Исходным материалом для расчетов служат данные промера глубин, занесенных в отдельные файлы для каждого галса. Файлы содержат координаты начала и конца галса, контрольных или поворотных точек, глубин и их расстояний от контрольных точек.

Первый шаг обработки данных состоит в вычислении координат для каждой точки измерения на галсе и построении профиля рельефа дна. График служит для визуального контроля качества исходных данных и отметок на профиле точек перегиба рельефа. На этом шаге также происходит формирование общей батиметрической базы данных.

Второй шаг обработки заключается в расчете статистических характеристик и построения гистограмм повторяемости глубин, элементарных углов наклона (отрицательных и положительных), углов между точками перегиба рельефа, показателей вертикальной и горизонтальной расщепленности. Элементарные углы наклона рассчитываются через тангенсы углов между ближайшими точками галса, показатель вертикальной расщепленности - как вертикальное расстояние между ближайшими точками перегиба рельефа, показатель горизонтальной расщепленности - как горизонтальное расстояние между ближайшими точками перегиба. По каждому галсу или по группе галсов, например, меридиональных или широтных, рассчитываются средние значения, дисперсии, среднеквадратические отклонения, экстремумы, показатели асимметрии и эксцесса для выше перечисленных характеристик.

На третьем шаге производится построение карт и схем горизонтального распределения глубин, углов наклона, вертикальной и горизонтальной расщепленности для выбранных полигонов.

В результате обработки получены 2082 углов наклона элементарных участков, 1522 - для поверхностей между точками перегиба и такое же количество величин вертикальной и горизонтальной расщепленности. Результаты расчета углов и их распределения по 5° зонам приведены в Табл.1. Проведено разделение углов на положительные и отрицательные. Перечисленные выше морфометрические

показатели получены для материкового склона Крыма и западного материкового подножия Черного моря. Глубина внешнего края шельфа в пределах акватории полигона изменяется от 120 до 160 м. Участки материкового склона здесь по морфологическому облику довольно существенно отличаются один от другого. Прежде всего это склон в виде единого крутого уступа (галсы 3-7), более пологого уступа (галсы 18-20) и материковый склон в различной степени расчлененный подводными долинами и каньонами и осложненный ступенями (галсы 8-18, 21-22).

На Рис.3 видно, что в пределах изученного района сочленяются различные морфоструктуры дна: материковый склон Западного Крыма на востоке, ложе котловины глубиной порядка 2000 м и западное материковое подножие Черного моря, при этом сложность морфологического облика в целом отмечается в центре полигона.

Первые три галса (1-3) представляют слабохолмистый рельеф ложа котловины и наклонную поверхность западного материкового подножия, расчлененность и крутизна которого возрастают от южной к северной границе полигона. В северо-западном районе ширина подножия достигает 80-100 км, представленное конусами выноса реки Дунай, а также палеорек региона.

Материковый склон как единый крутой уступ отмечается на галсах 4-7 (Рис.3), при этом наибольшей крутизной характеризуется его верхняя часть, где углы наклона изменяются в пределах 7-10°. На глубинах 900 и 1700 м отмечены небольшие ступени, наклоненные в сторону ложа котловины.

Наиболее примечательным элементом расчленения рельефа являются подводные каньоны и долины, существенно осложняющие поверхность шельфа, материкового склона и подножия. По терминологии, принятой в морской геологии и геоморфологии под подводным каньоном понимается узкая глубокая депрессия с крутыми склонами, дно которой обладает постоянным уклоном. Подводная долина - неглубокая широкая депрессия незначительной протяженности, дно которой имеет постоянный уклон. В.И. Мельник выявил широкое распространение этих форм на материковом склоне западного и северного секторов Черного моря, провел их типизацию и рубрикацию [3]. Большинство эрозионных форм обладает как одними, так и другими характеристиками, сменяющими друг друга на протяжении этой формы. Поэтому им применено смешанное название - подводная долинно-каньонная сеть (ПДКС). Последняя

состоит из главных долин с подходящими к ним основными притоками и сетью более мелких притоков.

По номенклатурной рубрикации [3] на акватории полигона отмечаются две ПДКС: Ойбурская и Западно-Крымская, последняя является наиболее значительной, занимающей площадь 2250 км². Эта ПДКС состоит из главной одноименной долины (каньона) протяженностью 143 км и 13 основных правосторонних притоков длиной от 14 до 42 км. Западно-Крымский каньон начинается на глубине 145 м и заканчивается на 2200 м, что составляет перепад 13.25 м/км. Ширина каньона до глубин 1750 м изменяется от 150 м в верховьях до 1.5-5.0 км внизу этого участка, уклоны дна до 158 м/км.

Отметим, что Евпаторийский, Херсонесский, Казачий и некоторые другие каньоны начинаются на шельфе, глубины вреза до 380 м, ширина изменяется от 100-150 м до 3-5 км. Замыкает сеть правых притоков Сарычевский каньон протяженностью 42 км, также начинающийся на шельфе. Максимальная глубина его вреза составляет 720 м [3].

Для однородного крутого материкового склона и склона расчлененного в различной степени подводными каньонами и долинами были рассчитаны обобщенные гистограммы распределения основных морфометрических характеристик (Рис.4). Наиболее интересен склон, расчлененный каньонами. Полученные при расчете углы составляют непрерывный ряд от 0 до 24°. Среднее значение углов между точками перегиба - 4.4°, между углами элементарных площадок - 4.3°. Около 40% занимают углы наклона 1-2°; 4-6° - 7%, 10-12° - 1.5%. На отдельных участках склона преобладают углы: 2-4° для верхней, 4-6° для средней и 10-12° для нижней частей склона.

Для величин вертикального расчленения (ВР), прежде всего, выделяется высокое среднее значение, равное 150 м., что обусловлено существованием каньонов и долин (ПДКС) и два диапазона 0-50м - 42% и 50-100 м - 23%, что составляет в сумме 63% от всего спектра. Явное преобладание малых значений горизонтального расчленения (ГР) в пределах 1-2 мили и согласованность ВР и ГР между собой подтверждают мелкочастотный характер расчленения. Отдельные крупные врезы, достигающие нескольких сот метров, (721 м - Сарычевский каньон) приводят к заметному различию между экстремальными значениями глубин. Поверхность материкового склона между каньонами сглажена, превышения - в пределах 0-50 м и 50-100 м.

Таблица 1. Распределение углов наклона по 5°-градусным зонам

№ галсов	0-4°	5-9°	10-14°	15-19°	>19°	Итого	Отриц.
КГ-1	31 94	- 1	- -	- -	- -	31 95	72
КГ-1а	24 96	- -	- -	- -	- -	24 96	78
КГ-2	26 95	- -	- -	- -	- -	26 95	77
КГ-3	30 95	1 1	1 1	- -	- -	31 97	73
КГ-4	32 136	2 4	1 1	- 1	- -	35 142	100
КГ-5	24 98	- -	2 2	1 1	1 1	28 102	82
КГ-6	43 102	1 3	1 1	1 1	- -	46 107	80
КГ-7	28 92	3 4	2 3	- -	- -	33 99	75
КГ-8	43 113	4 3	- 4	- -	2 2	49 122	82
КГ-9	35 91	2 2	- -	1 1	1 1	39 95	76
КГ-10	35 90	3 7	2 2	- -	- -	40 99	75
КГ-11	32 81	7 9	4 5	1 1	- -	44 96	70
КГ-12	36 84	8 8	2 3	- 1	- -	46 96	65
КГ-13	39 79	4 6	1 2	3 3	- -	47 90	59
КГ-14	37 114	5 7	2 2	- -	- -	44 123	78
КГ-15	30 69	6 7	- 1	- -	- -	36 77	50
КГ-16	28 61	6 8	- -	- -	- -	34 69	43
КГ-17	29 65	2 2	- 1	- -	- -	31 68	41
КГ-18	20 68	1 2	- -	- -	- -	21 70	37
КГ-19	28 78	2 5	2 2	- -	- -	32 85	49
КГ-20	20 56	1 4	- -	- -	- -	21 60	34
КГ-21	21 39	2 5	1 1	- -	- -	24 45	25
КГ-22	20 42	2 3	2 -	2 -	- -	22 45	21
КГ-23	16 31	1 3	- -	- -	- -	17 34	18
ДКГ-1	30 54	10 12	3 3	1 2	- -	44 71	41
Итого	727 1927	73 106	23 34	8 11	4 4	835 2082	1501
%	87 92.6	8.7 5.1	2.8 1.6	1.0 0.5	0.5 0.2		

В числителе - углы между точками перегиба, в знаменателе - углы элементарных площадок

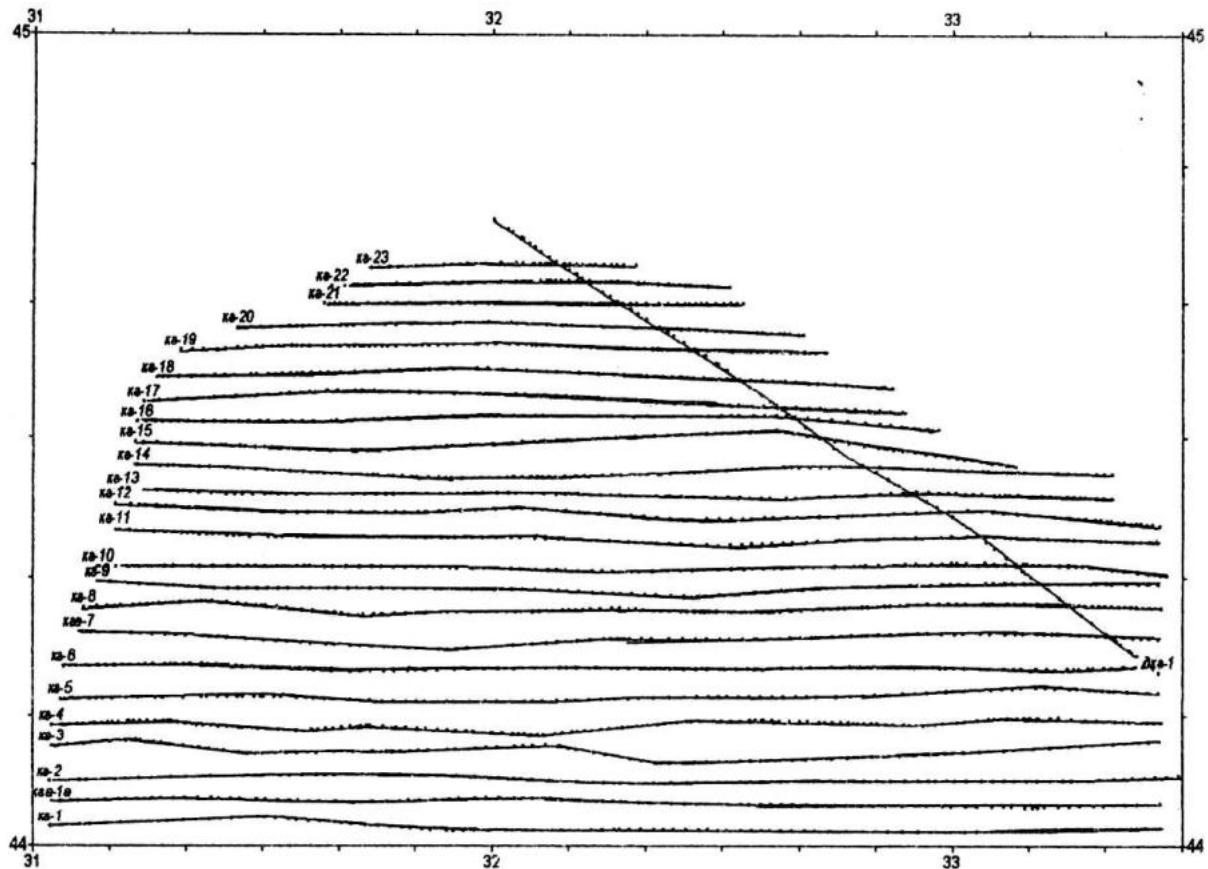


Рис.1 Схема расположения профилей дна подводной окраины Западного Крыма, по которым выполнен расчет морфометрических характеристик.

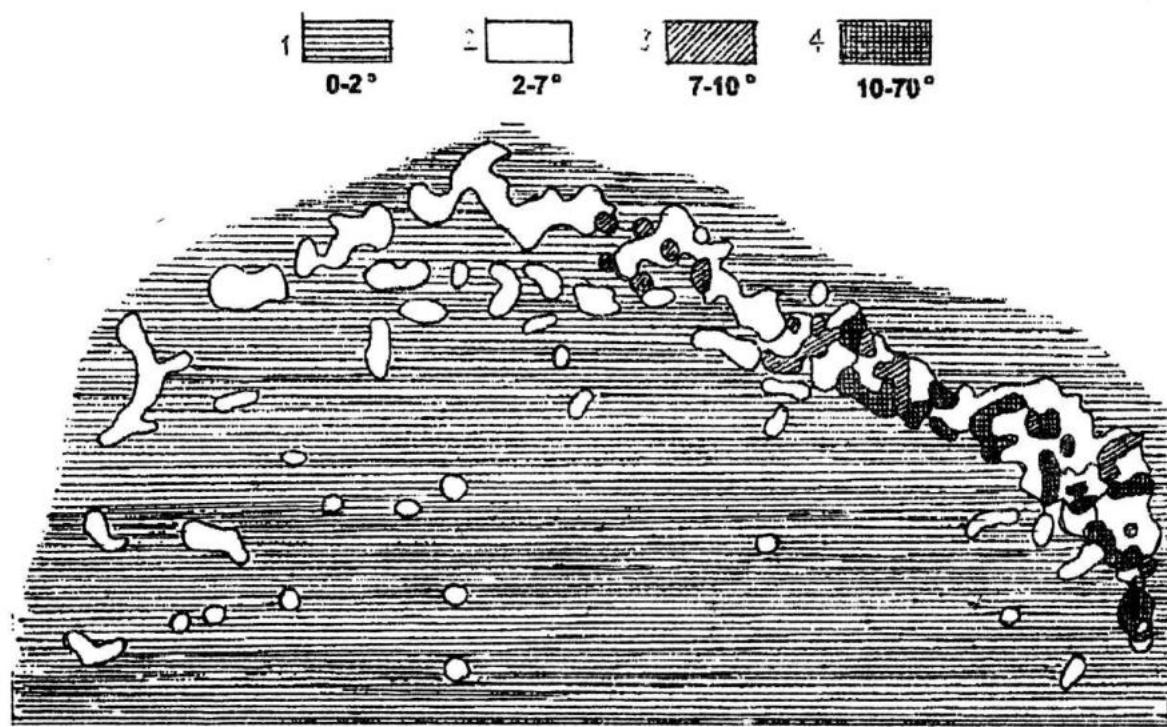


Рис.2 Карто-схема углов нахлона на полигоне подводной окраины Западного Крыма

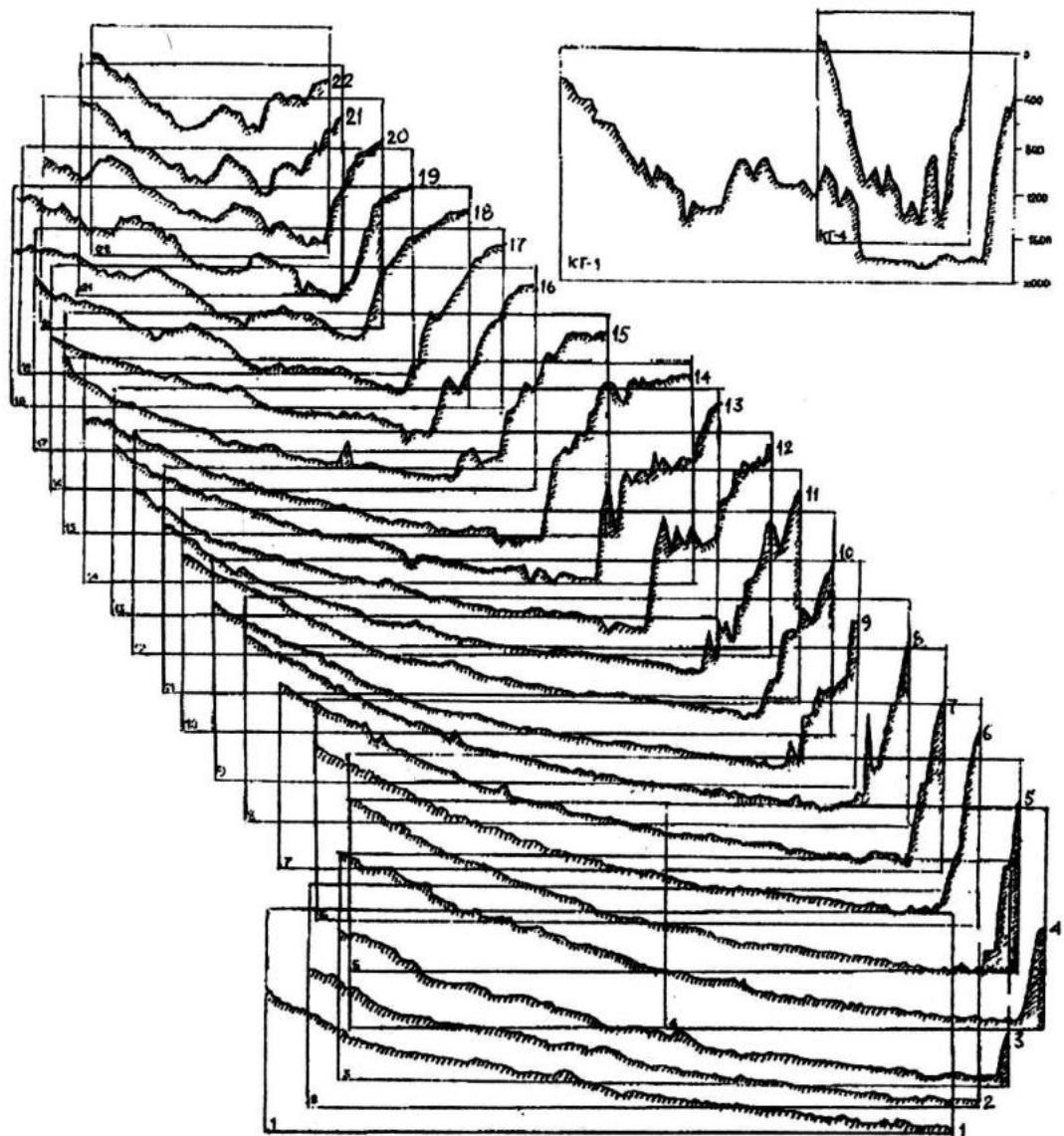


Рис.3 Профили рельефа дна широтных галсов полигона

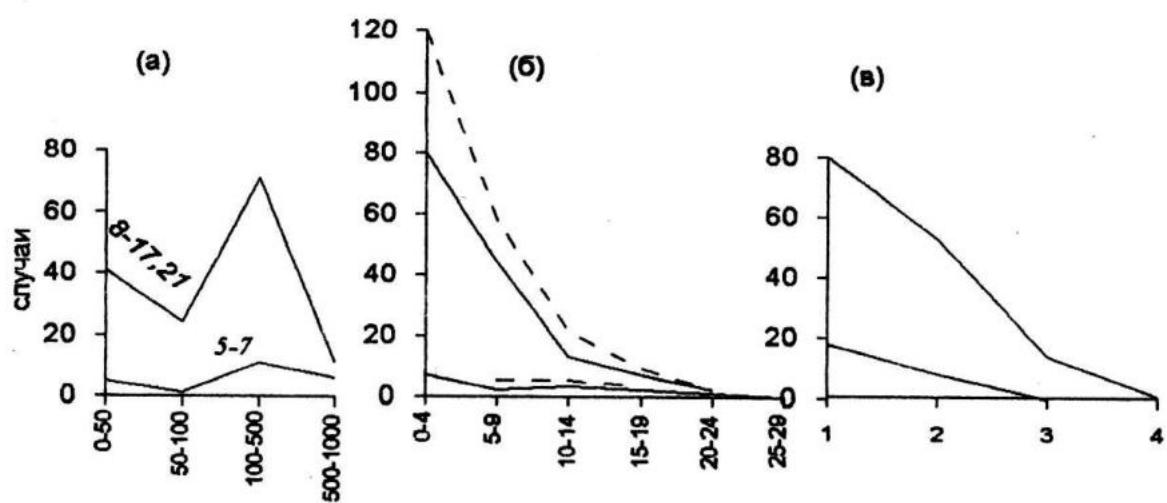


Рис.4 Обобщенные графики морфометрических характеристик материкового склона Западного Крыма: (а) вертикальное расчленение, м; (б) углы наклона, °, сплошные линии - углы между точками перегиба, пунктир - углы элементарных площадок; (в) горизонтальное расчленение, мили

Западное материковое подножие Черного моря, представленное на всех широтных профилях, является однородной поверхностью, занимающей 2/3 площади полигона. Рельеф его представляет мелковолнистую наклонную поверхность в сочетании с ровными участками, длина которых варьирует в пределах до 15 миль. Кроме небольших холмов (по 3-4 на профиль) высотой 40-80 м и шириной 1-2 мили, выделяются долины с глубиной вреза от 50 до 100 м, наиболее часто отмечаемые при четком сочленении материкового склона Западного Крыма и материкового подножия (Рис.3). Общей тенденцией является постепенное уменьшение средней глубины акватории полигона и количества малых углов (до 1°) наклона с 80 до 50% от общего их числа. Такой рельеф сохраняется до 16-го галса, где отмечается изменение поверхности дна. Появляются относительно крупные волны рельефа длиной 10-17 миль и амплитудой от 120 до 270 м при сохранении небольших холмов и каньонов, что связано, вероятно, с переходом материкового подножия в склон. Возрастает крутизна склона, количество углов от 2 до 4° составляет 30% - аналогичное сумме углов до 1°. Горизонтальное расчленение (ГР) характеризуется тремя группами величин: 0.9 мили - 18%, 1миля - 14% и 1.2 мили - 10%. Среднее значение вертикальной расчлененности (ВР) равно 27.8 м. При сопоставлении величин вертикального и горизонтального расчленения преобладающие значения ГР - 0.9 и 1.0 мили и мелкочастотный диапазон значений ВР являются основными параметрами рельефа и отражают мелковолнистый характер западного материкового подножия Черного моря.

На основе анализа величин углов на всех 22 широтных профилях рельефа дна полигона, составляющих непрерывный вариационный ряд от 0° до 34° выделяется четко выраженная группа углов 0-2°, составляющая 80%; 2-7° - 14%; 7-10° - 3% и 10-30° - 3%. В целом полигон охватывает довольно однородное поле углов, которое в общем спектре составляет 80%. На карто-схеме распределения углов наклона (Рис.2) отчетливо прослеживается

приуроченность этих групп к формам рельефа. На фоне основного поля углов 0-2°, характеризующих материковое подножие западной части Черного моря, выделяются отдельные участки больших значений (2-7°), относящиеся к северо-восточной, северной и северо-западной частям материкового склона Крыма. Следующие группы углов (7-10°) и 10-30° характеризуют среднюю и нижнюю части материкового склона Крыма. Кроме этого, углами выше 10° отмечаются склоны многих подводных каньонов и долин.

Рассмотренные морфологические особенности подводной окраины Западного Крыма, выраженные в трех основных и ряде вспомогательных морфометрических параметров, отражают значительную стяженность рельефа материкового подножия, выделяя заметную роль экзогенных процессов в его формировании. Осадки конуса выноса реки Дунай постепенно преобразуют мелковолнистый характер рельефа дна в наклонную равнину. Уступы, крупные горы и холмы, а также каньоны материкового склона возникли в результате неотектонических движений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев А.И., Сырский В.Н., Шермазан В.Ф. Аппаратура для автоматического сбора и преобразования информации к виду, удобному для ввода и обработки на ЭВМ. // Сб. "Гидрофизические исследования Тихого и Атлантического океанов в кругосветном плавании на НИС "Михаил Ломоносов" (20 рейс)". - Изд. МГИ АН УССР. - Севастополь. - 1967. - С.150-153
2. Литвин В.М., Руденко М.В. Расчлененность и морфометрические характеристики дна океанов. // Л: Издательство Ленинградского университета. - 1990. - 188 с.
3. Мельник В.И. Мезоформы рельефа материкового склона западного и северного секторов Черного моря. // Препринт АН Украины, Ин-т геологических наук. - 1993. - 49 с.