

Е. В. Артемова, В. И. Халтурин

К ВОПРОСУ ОБ УМЕНЬШЕНИИ АМПЛИТУД ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН
ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ЧЕРНОМОРСКОЙ ВПАДИНЫ

Постановка задачи

Известно, что на трассах, пересекающих глубоководную (восточную) часть Черноморской впадины, резко уменьшаются амплитуды поверхностных волн. Особенно сильно этот эффект проявляется на расстояниях до 1,5-2 тыс. км в волнах типа Lg и Rg , которые полностью экранируются этой частью впадины [1-6]. При этом цуг поверхностных волн сильно трансформируется, практически рассыпается, длительность его резко возрастает, максимальные амплитуды приходятся на более поздние участки записи. Так, в работе [6] при рассмотрении сейсмограмм стандартных длиннопериодных приборов СКД было показано, что на трассах, пересекающих впадину, длительность цуга возрастает в 3-5 раз, максимальные амплитуды уменьшаются в 3-6 раз, групповые скорости, отвечающие относительному максимуму в группе поверхностных волн, понижаются до 1,8-2,5 км/с.

В то же время на трассах вне Черного моря цуг сохраняется достаточно коротким, групповые скорости близки к 3,0 км/с (при средних значениях периодов максимальных амплитуд на записях СКД от 8 до 14 с). Отметим, что эти наблюдения относились к промежуточной зоне эпицентральных расстояний и не выходили за пределы 2 тыс. км.

Наблюдаемое явление убедительно объясняется влиянием сильной горизонтальной неоднородности, которой служит Черноморская впадина. Как известно [7], она характеризуется земной корой субокеанического (переходного) типа, в которой нет "гранитного" слоя, присутствующего в континентальной коре окружающих территорий. Именно с этим слоем, как известно, связаны волны типа Lg и Rg^1 .

К наиболее простому и доступному инструменту изучения аномалий затухания и локализации структур, влияющих на амплитуды поверхностных волн, относится метод магнитудных отклонений, в котором для различных сейсмических трасс очаг - станция определяется разницей между

¹ Полученные в последнее время данные позволяют считать, что исчезновение группы Lg на записях для континентальных трасс связано в первую очередь не с отсутствием "гранитного" слоя, а с пониженной добротностью земной коры, обусловленной большим тепловым потоком из мантии [8].

значением магнитуды на данной станции $M_{\text{ст}}$ и средней по всей сети магнитудой \bar{M} :

$$\Delta M = M_{\text{ст}} - \bar{M}.$$

В этом подходе используются наиболее доступные материалы - каталоги землетрясений и станционные бюллетени, по которым систематизируются данные о магнитудных отклонениях на различных трассах. Именно на основе применения метода магнитудных отклонений в работе [6] было показано, что на трассах, пересекающих глубоководную впадину, станционные магнитуды занижены и ΔM составляет 0,5-0,8 магн. ед., тогда как на внешних трассах магнитудные отклонения обычно положительны или близки к нулю.

Очевидно, что в таких ситуациях точность определения магнитуды M ухудшается, само ее значение зависит от соотношения числа трасс того и другого типа, участвующих в оценке M .

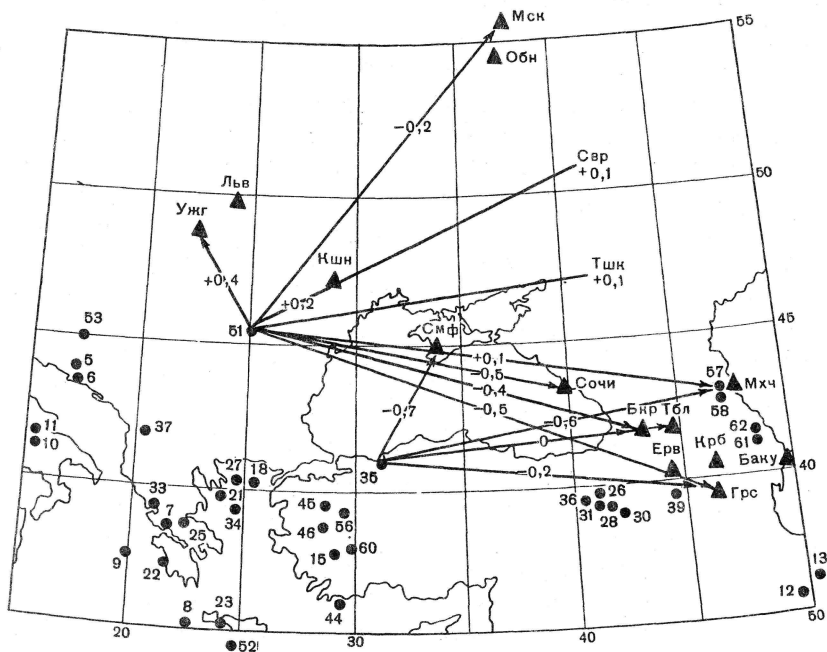
Исходя из общих представлений о волновом характере исследуемого процесса, следует ожидать возникновения дифракционного эффекта. Он может проявиться в ослаблении амплитудных потерь при удалении от экранирующей структуры как источника, так и пункта наблюдения.

Используя традиционную методику магнитудных отклонений, мы попытались детализировать эффект уменьшения амплитуд поверхностных волн в Черноморской впадине, оценивая его отдельно для близких и удаленных станций, а также для близких и удаленных источников. Полученные результаты могут быть полезными для понимания природы магнитудных поправок и для оценки дифракционных эффектов при распространении поверхностных волн в реальной среде.

Материалы и методика

Основным источником данных служил "Сейсмологический бюллетень" ЕССН. Оттуда были почерпнуты сведения об амплитудах и периодах максимальной фазы поверхностных волн для 72 землетрясений, каждое из которых записано 6-12 станциями, расположенными на пересекающих Черноморскую впадину и внешних трассах. Из этой группы землетрясений 39 относились к Альпийскому поясу - региону Средиземноморья, Балкан, Турции, Кавказа, Ирана (см. рис. 1). Эпицентры этих землетрясений (назовем их условно ближними) находились на расстояниях не более 1000 километров от впадины. Во вторую группу входили 33 землетрясения более удаленной зоны - восточная и южная части Ирана, Красное море, Восточная Африка (см. рис. 3).

Магнитудные отклонения определялись для двух групп станций - ближних (расположенных в Крыму, Карпатах и на Кавказе), находящихся на расстоянии не более 800 км от впадины, и удаленных, когда расстояния составляли 1300-3000 км). В первой группе были станции Го-



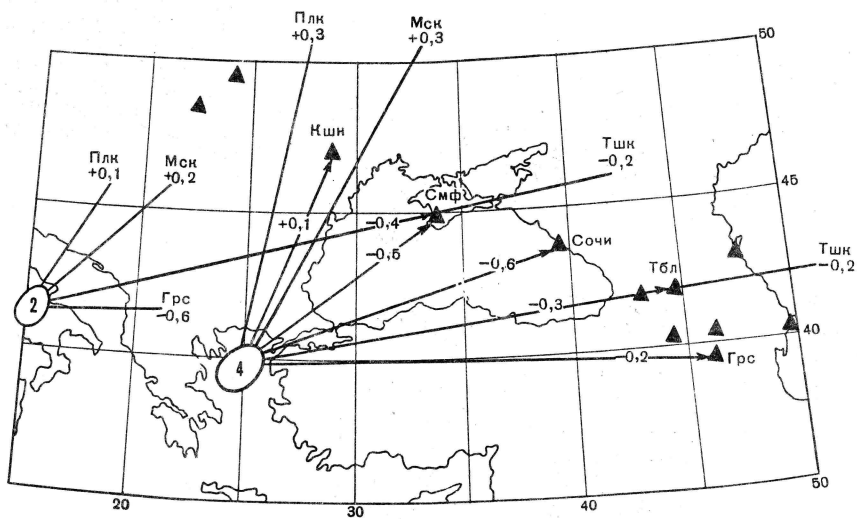
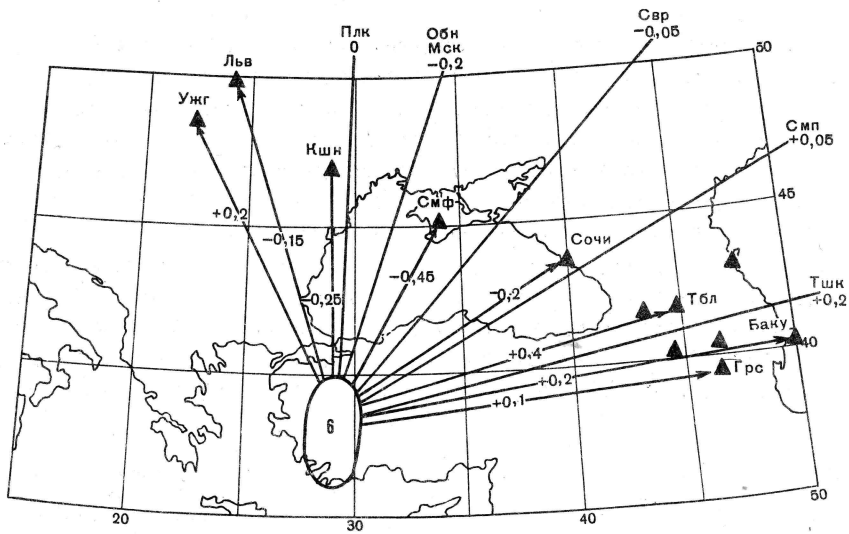
Р и с. 1. Карта землетрясений Альпийского пояса, для которых определены магнитудные отклонения на различных станциях по данным бюллетеня ЕССН. Для двух землетрясений (N 35 и 51) показаны трассы и значения ΔM на этих трассах для нескольких опорных станций ЕССН.

рис (Грс), Кировабад (Крб), Ереван (Ерв), Тбилиси (Тбл), Баку, Бакуриани (Бкр), Сочи, Махачкала (Мхч), Симферополь (Смф), Ялта (Ялт), Кишинев (Кшн), Львов (Льв), Ужгород (Ужг). Ко второй группе относились станции Обнинск (Обн), Москва (Мск), Пулково (Плк), Апатиты (Апт), Екатеринбург (Ект), Семипалатинск (Смп) и Ташкент (Тшк).

По максимальным амплитудам и их периодам определялась $M_{ст}$ и затем магнитудное отклонение. Далее значения станционных отклонений осреднялись по небольшой (4-10 шт.) группе близрасположенных очагов и приписывались трассе, соединяющей станцию и очаговую область.

Примеры выделения таких очаговых областей (обведенных на рис. 2-4 толстой линией, внутри которой показано число эпицентров) и трасс, на которых указано значение ΔM , приведены на рис. 1 и 2 для близких очагов и на рис. 3 и 4 для удаленных очагов.

Если же станции расположены достаточно далеко от очаговой зоны, то на рис. 3, 4 указано направление луча, выходящего на данную станцию, с учетом искажений, вносимых проекцией.



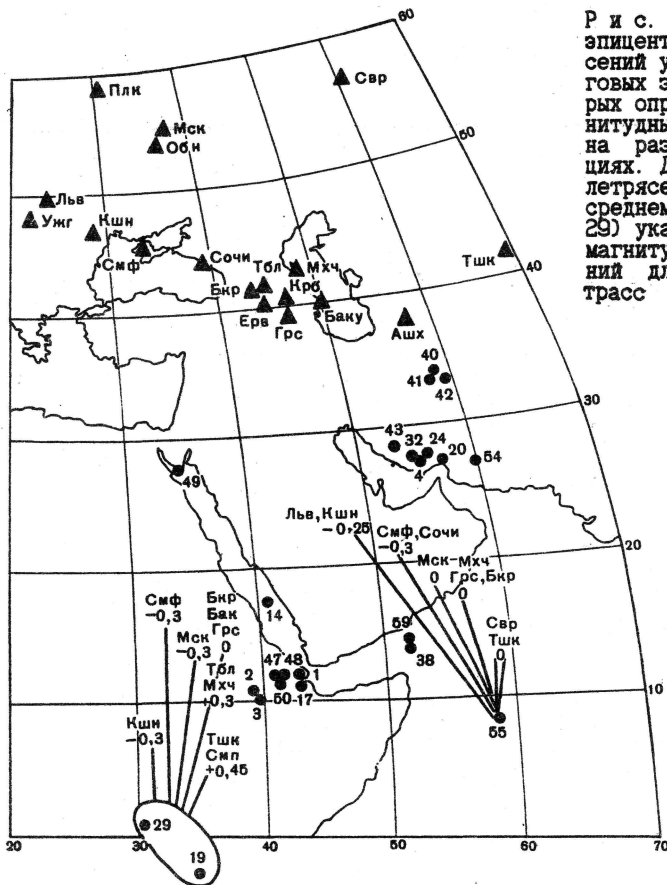
Р и с. 2. Карта сейсмических трасс и средних значений магнитудных отклонений на этих трассах для шести землетрясений западной Турции (вверху) и четырех землетрясений Эгейского моря и двух землетрясений Италии (внизу)

Результаты

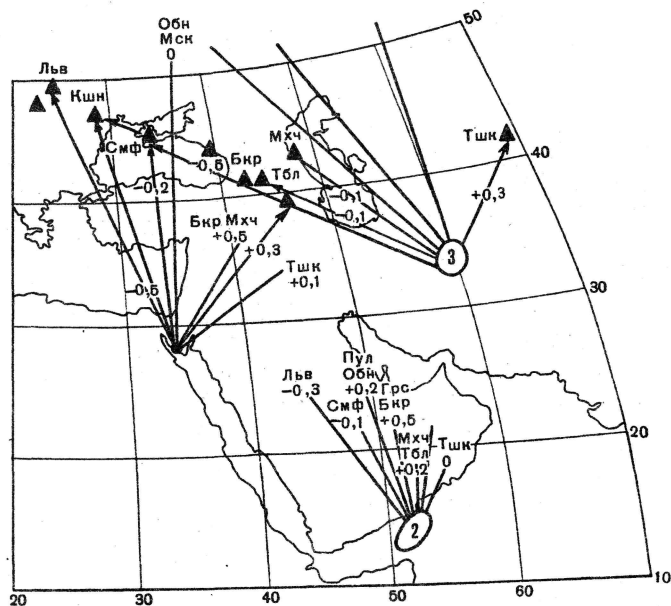
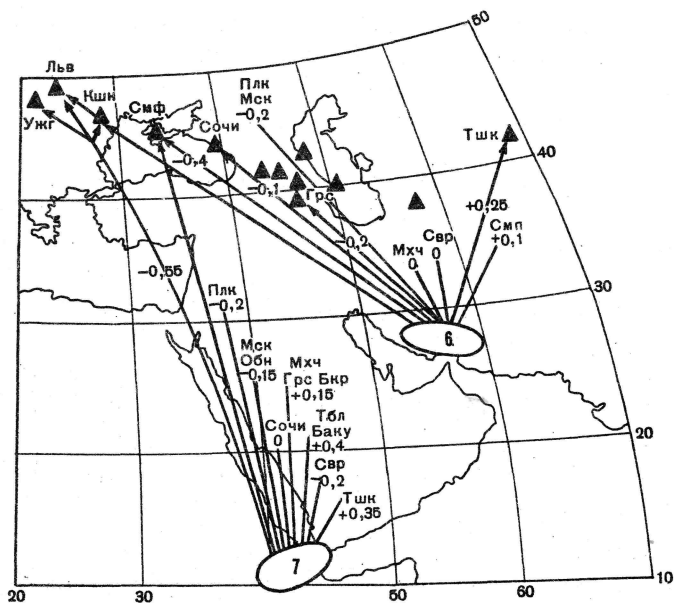
Из данных станционных бюллетеней следует, что пересечение Черного моря практически не влияет на периоды максимальных амплитуд.

Что же касается самих амплитуд, то даже из тех немногочисленных примеров, которые приведены на рис. 1 и 2, устойчиво виден основной эффект - устойчивое занижение магнитуд на трассах, пересекающих Черное море. Это занижение составляет 0,5-0,7 для ближних станций и 0,2-0,3 магн. ед. - для удаленных. Большие значения потерь соответствуют пересечениям восточной части акватории и продольным (близширотным) трассам. На трассах вне Черноморской впадины магнитудные отклонения положительны и в среднем составляют 0,1-0,2 магн. ед.

На рис. 3 и 4 представлены векторные диаграммы магнитудных отклонений для землетрясений дальней зоны, очаги которых расположены



Р и с. 3. Карта эпицентров землетрясений удаленных очаговых зон, для которых определены магнитудные отклонения на различных станциях. Для трех землетрясений (N 55 и в среднем для N 19 и 29) указаны значения магнитудных отклонений для нескольких трасс



Р и с. 4. Карта сейсмических трасс и средних значений магнитудных отклонений на этих трассах для шести землетрясений южного Ирана и семи землетрясений Красного моря (вверху); для трех землетрясений Кавказа, двух - Аравийского моря и одного - из района Суэца (внизу)

сравнительно далеко от Черного моря. Из рассмотрения приведенных на рис. 3 и 4 диаграмм и других аналогичных графиков видно, что на черноморских трассах занижение составляет 0,3-0,4 магн. ед., а на остальных континентальных трассах отклонение положительно (от 0 до 0,3).

Средние значения магнитудных отклонений для различных типов трасс представлены в табл. 1. Здесь данные сгруппированы по признаку положения трассы относительно Черного моря. Трассы, проходящие вне Черного моря, разбиты на пять подгрупп - проходящие западнее, севернее, южнее, восточнее (пересекая Большой Кавказский хребет) и восточнее (минуя Большой Кавказский хребет). Разделение восточных трасс на две подгруппы обусловлено тем, что при пересечении Большого Кавказского хребта также наблюдаются амплитудные потери в поверхностных волнах [4,6].

Трассы, пересекающие Черное море, разбиты на четыре подгруппы: проходящие по западной части акватории, по его центральной части, по восточной (глубоководной) части и продольные (близширотные). Трассы, скользящие вдоль береговой линии, разделены на три группы: вдоль северного (шельфового) участка акватории, вдоль западного (мелководного) и вдоль южного (глубоководного). Помимо значений ΔM , в таблице для каждой подгруппы приведено N - число индивидуальных определений, участвующих в осреднении.

Из табл. 1 видно, что для внешних трасс магнитудные отклонения примерно одинаковы как для ближних, так и для далеких станций. На

Т а б л и ц а 1. Средние значения магнитудных отклонений для различных трасс (для землетрясений Альпийского пояса)

Положение трасс	Ближние станции		Дальние станции	
	ΔM	N	ΔM	N
Трассы, проходящие вне Черного моря				
Западнее	+0,10	8	+0,20	20
Севернее	+0,05	5	+0,05	4
Южнее	-0,05	15	-0,05	4
Восточнее (через Большой Кавказский хребет)	-0,30	6	-0,15	6
Восточнее (минуя Большой Кавказский хребет)	0	13	0	16
Трассы, пересекающие Черное море				
Западная часть моря	-0,40	14	-0,20	6
Центральная часть моря	-0,55	15	-0,35	3
Восточная часть моря	-0,55	13	-0,30	4
Вдоль моря (широтные)	-0,55	8	-0,25	3
Трассы, скользящие вдоль береговой линии				
Северная (по шельфу)	-0,10	3	-	-
Западная	-0,30	4	-	-
Южная	-0,50	3	-	-

западных трассах отклонения положительны и несколько растут с расстоянием, т.е. затухание амплитуд слабее стандартного ($A \sim \Delta^{-1,5}$), что вполне естественно, так как эти трассы проходят по Русской платформе. Для южных и восточных (вне Большого Кавказского хребта) трасс отклонения примерно равны нулю и не зависят от расстояния. Четко прослеживается влияние Южного Кавказского хребта, при пересечении которого амплитуды уменьшаются примерно вдвое.

Иная картина на трассах, пересекающих Черное море. Здесь на трассах, задевающих глубоководную впадину, ΔM на ближних станциях в среднем равно $-0,55$, а на западных (мелководных) - несколько меньше ($-0,40$).

Особого внимания заслуживает эффект уменьшения потерь на одной и той же трассе по мере удаления сейсмической станции от основного препятствия - Черноморской впадины. При удалении на 1,5-2 тыс. км магнитудное отклонение уменьшается по абсолютной величине на 0,2-0,25 магн. ед.

Отдельно рассмотрены величины магнитудных отклонений для эпицентральных зон, отстоящих от Черноморской впадины на 2-5 тыс. км. Здесь можно выделить только две группы трасс (рис. 3 и 4): проходящие вне Черного моря (восточнее его) и пересекающие Черноморскую впадину. Результаты осреднения этих данных показаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Средние значения магнитудных отклонений для удаленных очаговых зон

Положение трасс	Ближние станции		Дальние станции	
	ΔM	N	ΔM	N
Восточнее Черного моря	+0,1	20	+0,1	20
Пересекающие Черное море	-0,3	20	-0,1	20

Здесь повторяются те же тенденции, которые мы видели при рассмотрении табл. 1: вне Черного моря магнитудные отклонения положительны и одинаковы на ближних и дальних станциях, а при пересечении впадины потери амплитуд уменьшаются при переходе от ближних станций к дальним. Кроме того, и сами значения ΔM на 0,20-0,25 магн. ед. меньше ΔM , соответствующих ближним эпицентральных зонам. Таким образом, потери амплитуд уменьшаются при увеличении расстояний до Черноморской впадины как станций, так и эпицентров.

Обобщение магнитудных отклонений в форме табл. 1 и 2 удобно для геофизической интерпретации этих данных. Для практики магнитудных определений нужно иметь систему поправок для каждой сейсмической станции с детализацией по отдельным эпицентральных зонам и подзонам. Ориентировочные значения таких поправок приведены в табл. 3. Знак поправки - обратный знаку соответствующего магнитудного откло-

Т а б л и ц а 3. Ориентировочные значения магнитудных поправок для опорных станций ЕССН и некоторых очаговых зон

Сей- сми- чес- кая ст.	Эпицентральные зоны								
	Пер- сид- ский залив	Иран	Кавказ	Турция			Эгей- ское море	Греция	Алба- ния, Юго- славия
				Восточ- ная	Цент- раль- ная	Запад- ная			
Смф	+0,5	+0,6	+0,7	+0,7	+0,7	+0,45	+0,4	+0,5	+0,3
Сочи	+0,1	0	-	+0,3	-	+0,2	+0,6	+0,4	-
Льв	+0,4	-	+0,1	+0,5	-	+0,15	-0,2	0	-
Кшн	+0,4	+0,5	0	+0,5	-	+0,25	-0,1	+0,1	-
Ужг	-	-	0	-	-	-0,2	-	-	-
Плк	+0,2	-	0	0	-	0	-0,2	-0,2	-0,1
Мск	+0,2	+0,1	+0,1	0	-	+0,2	-0,2	-0,1	-0,1
Обн	+0,5	+0,2	+0,1	0	+0,7	+0,2	-0,2	0	-
Ект	0	+0,2	+0,2	-0,1	-	0	-	-	-0,2
Тол	-	-	+0,2	+0,1	-	-0,4	+0,2	+0,1	-
Бкр	-0,2	-	+0,2	+0,1	0	-0,1	+0,1	+0,2	+0,6
Грс	+0,2	-	-	+0,1	-	-0,2	+0,2	+0,1	+0,7
Тшк	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	-	-	+0,2	-	+0,1

нения. Поправку следует прибавлять к значению магнитуды, определенному для отдельных землетрясений по записям станции. Приведенные в табл. 3 поправки получены по недостаточно представительному материалу. Они пока ориентировочны и не могут быть рекомендованы к применению в сейсмической службе.

Обсуждение результатов

Локализация области, ответственной за уменьшение максимальных амплитуд поверхностных волн. В сравнительно большом охваченном наблюдениями регионе Черноморская впадина служит горизонтальной неоднородностью, оказывающей наибольшее влияние на амплитуды поверхностных волн. Полученные нами данные подтвердили высказанное ранее мнение [6] о том, что поверхностные волны резко ослаблены на глубоководном участке Черноморской впадины, точнее, в области, в которой по всему комплексу геофизических данных установлено отсутствие "гранитного" слоя.

Об этом свидетельствует то, что в западной мелководной части акватории ослабление волн незначительно. Потери скачкообразно возрастают при незначительном смещении к западу трасс, расположенных немного восточнее моря, когда они начинают "задевать" глубоководный участок. Аналогичное скачкообразное уменьшение амплитуд отмечается и при смещении к северу трасс, скользящих вдоль южной береговой линии.

На трассах, пересекающих в поперечном направлении восточную и центральную части впадин, потери примерно одинаковы. На западном участке потери устойчиво меньше.

Механизм амплитудных потерь. Тот факт, что потери одинаковы для

продольных и поперечных трасс, заставляет считать, что они не зависят от длины пути внутри области с отсутствием "гранитного" слоя. По-видимому, основные явления разыгрываются на границах области. Иначе говоря, ведущим эффектом должно быть отражение и преломление на границе впадины, ведущее к расфазировке цуга и к потере его энергии на отражение и рассеяние. Поглощение вряд ли играет при этом заметную роль, так как иначе вело бы к заметному уменьшению амплитуд зависимости от длины пути в глубоководной части Черного моря.

Более объективной мерой для количественного описания амплитудных потерь не должны быть отклонения от средней магнитуды. В оценке средней магнитуды участвуют станции морских трасс, и, следовательно, она является смещенной оценкой относительно "истинной" магнитуды. Для оценки потерь лучше использовать разность между магнитудами на морских и континентальных трассах. Поэтому сделанные нами оценки ΔM можно рассматривать как нижний предел.

Исследование сейсмограмм поверхностных волн [6] и наши данные о запаздывании максимальных амплитуд показывают, что влияние Черноморской впадины складывается из двух эффектов. Это уменьшение амплитуд колебаний в момент, соответствующий приходу волны R_g с групповой скоростью 3,0 км/с, и формирование некоторого нечеткого максимума в последующей части записи.

Можно высказать гипотезу, что эти более поздние колебания формируются за счет отражений от каких-либо крупных структурных неоднородностей земной коры. Такими отражающими структурами могут быть, в частности, Кавказский хребет, полосы выклинивания "гранитного" слоя, южная граница Малой Азии, крупные разломы. Тот факт, что на пересечении Кавказского хребта наблюдаются заметные потери амплитуд, подтверждает возможность появления волн, отраженных от этой структуры.

Эффект отражения поверхностных волн в литературе широко известен. Так, в работах Д. И. Сихарулидзе [5,9] показано, что в некоторых случаях наблюдаются очень четкие отражения с хорошей повторяемостью формы прямой и отраженной поверхностных волн. Удаётся даже выделить отражающую границу. Однако в большинстве случаев, видимо, имеет место наложение нескольких отраженных волн разной интенсивности и с разным запаздыванием, которые формируют нечеткий, растянутый цуг с малыми амплитудами.

Уменьшение амплитудных потерь за счет отражений и дифракции. Отраженные или рассеянные волны имеют возможность обогнуть Черноморскую впадину и уменьшить ее экранирующий эффект. Масштабы этого эффекта, естественно, будут зависеть от взаимной конфигурации источника, отражателя и станции. Для близких очагов и станции различия в путях пробега прямой и отраженной волн будут весьма велики, различаясь в 2 или даже в 3 раза. Не имея намерения входить в количествен-

ные расчеты, укажем лишь, что размеры глубоководной части примерно 700-800 км по широте и 300-400 км по долготе. Расстояния до возможных отражателей лежат в интервале 800-1200 км. Таким образом, приведенные выше различия путей прямой и отраженной волн весьма правдоподобны.

В тех же случаях, когда очаговая зона или станция расположены далеко от препятствия - области отсутствия "гранитного слоя", различия в длине путей прямой трассы и огибающих Черное море отраженных волн оказываются сравнительно небольшими. Путь поверхностных волн меньше растягивается, а значит, и его амплитуда становится не слишком маленькой по сравнению с амплитудами прямых волн на континентальных трассах.

С другой стороны, могут иметь место и чисто дифракционные эффекты - проникновение дифрагированных волн в зону "тени" и перемещение энергии упругих волн не только по лучу, но и вдоль волнового фронта с постепенным заполнением зоны "тени".

Очевидно, что дифракционные эффекты практически не проявятся для близких очагов и близких станций, когда экранирующая структура "видна" под углом от 20-30 до 60-70°. Иначе обстоит дело для удаленных очагов, для которых эти углы не превышают 8-10°. Заметим, что наши данные показывают, что в таких случаях заполнение зоны "тени" становится значительным (ослабление амплитудных потерь в 2-2,5 раза) на расстояниях порядка двух-трех "видимых" размеров экранирующей структуры.

Л и т е р а т у р а

1. Саваренский Е. Ф., Вальднер Н. Г. Волны Lg и Rg от землетрясений Черноморского бассейна и некоторые соображения об их природе // Сейсм. исслед. 1960. N 4. С. 55-77.
2. Сихарулидзе Д. И. Природа волн Lg и Rg и изучение строения земной коры // Тр. Ин-та геофизики АН СССР. 1961. Т. 21. С. 67-88.
3. Коридалин Е. А. Некоторые характеристики волн типа Lg и Rg и региональные особенности их распространения // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. N 8. С. 1191-1198.
4. Печ К. Континентальные волны в Центральной Европе // Строение Земли по поверхностным волнам. М.: Мир, 1965. С. 106-127.
5. Сихарулидзе Д. И. Строение Земли по поверхностным волнам. Тбилиси: Мецниереба, 1978. 247 с.
6. Антонова Л. В., Рузайкин А. И., Халтурин В. И. и др. Экспериментальные сейсмические исследования недр Земли. М.: Наука, 1978. 158 с.
7. Строение Черноморской впадины. М.: Наука, 1966. 215 с.
8. Копничев Ю. Ф., Аракелян А. Р. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км // Вулканология и сейсмология. 1988. N 4. С. 77-92.
9. Сихарулидзе Д. И., Баграмян А. Х. Выявление эффекта отражения и преломления поверхностных сейсмических волн в условиях Кавказа // Сообщ. АН СССР. 1969. Т. 53, N 2. С. 31-42.