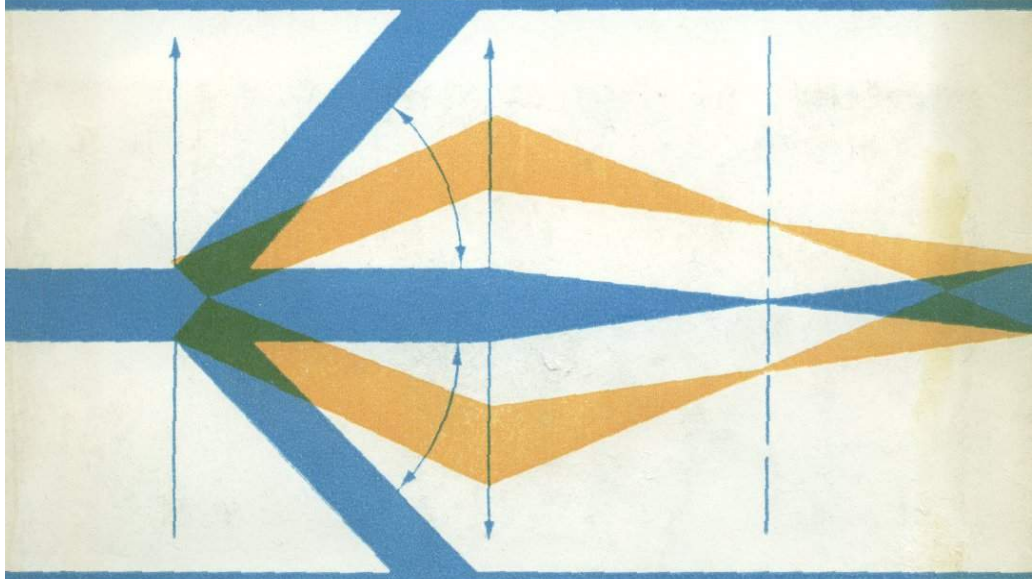


О. А. ПОТАПОВ

ОПТИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ



О. А. ПОТАПОВ

ОПТИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ



МОСКВА «НЕДРА» 1977



Потапов О. А. Оптическая обработка геофизической и геологической информации. М., «Недра», 1977, 184 с.

Описаны результаты работ, проведенных с целью разработки способов и методики обработки геолого-геофизических материалов при помощи когерентных и некогерентных оптических систем. Основное внимание уделено обработке сейсмо-разведочных данных.

Кратко излагаются принципы оптических преобразований и основы построения специализированной оптической и оптико-цифровой аппаратуры. Рассмотрены алгоритмы и разработанные на их основе способы оптической обработки информации. Даны теоретические основы и практические приемы оптической фильтрации, двумерного и одномерного спектрально-корреляционного анализа геолого-геофизических материалов: описана методика получения интервальных, мгновенных, текущих спектров и коррелограмм. Большое внимание уделено вопросам количественного анализа исходной информации.

Рассмотрены наиболее характерные примеры применения оптических систем при комплексной машинной обработке и интерпретации сейсморазведочных, гравиразведочных, аэромагнитных и некоторых геологических материалов. Приведены примеры использования результатов оптического анализа первичной информации для районирования территорий с целью организации последующих работ.

Книга предназначена для широкого круга геофизиков и геологов, занимающихся машинной обработкой геофизической и геологической информации. Она может также представлять интерес для работников геолого-геофизических научно-исследовательских организаций и для студентов вузов геофизической специальности.

Ил. 75, табл. 5, список лит. — 129 назв.

П 20804—146
043 (01)—77 90—77

© Издательство «Недра», 1977

ИБ № 1485

ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПОТАПОВ

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ

Редактор издательства Т. И. Борушко
Обложка художника А. Е. Григорьева
Художественный редактор В. В. Шутько
Технический редактор В. В. Максимова
Корректор Э. Г. Агеева

Сдано в набор 2/ХІ 1976 г. Подписано в печать 8/ІІ 1977 г. Т-02973.

Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага № 1. Печ. л. 11,5.

Уч.-изд. л. 12,27. Тираж 1750 экз. Заказ 1374/5531-3. Цена 1 р. 84 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198006, Ленинград, Московский пр., 91.

В последние годы постоянно усложняются задачи поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, решение которых невозможно без применения ЭВМ. Используемые ЭВМ второго поколения, характеризующиеся небольшой оперативной памятью и относительно низким быстродействием, не удовлетворяют современным требованиям и не в состоянии оперативно обработать увеличивающиеся объемы поступающих материалов. Например, одна сейсмограмма, зарегистрированная 24-канальной сеймостанцией, длительностью 5 с при динамическом диапазоне 70 дБ, верхней частоте спектра 120 Гц и шаге дискретизации $\Delta t = 2$ мс содержит $66 \cdot 10^4$ бит информации. Емкость оперативной памяти ЭВМ БЭСМ-4 составляет $36 \cdot 10^4$ бит, а БЭСМ-6 — $450 \cdot 10^3$ бит, т. е. даже наиболее мощная из отечественных ЭВМ позволяет размещать в оперативной памяти не более шести сейсмограмм одновременно.

Одним из путей прогресса в области машинной обработки материалов может служить использование когерентных оптических вычислительных устройств, характеризующихся быстродействием, экономичностью и гибкостью изменения программно-алгоритмического комплекса [2, 11, 22, 24, 28, 29, 30, 46, 56—79, 82, 99, 100, 110—113, 121].

Когерентные оптические системы или интерференционные оптические вычислительные машины (ИОВМ) отличаются от аналоговых и цифровых машин тем, что элементарными операциями для них служат не арифметическое суммирование и простейшее логическое сравнение, а умножение, интегрирование, прямое и обратное преобразования Фурье и Лапласа, преобразования свертки и автокорреляции. Осуществление таких сложных операций основано на использовании физических явлений интерференции и дифракции когерентного света [5, 12, 14, 66]. Когерентные оптические системы являются двумерными и позволяют с быстродействием 10^{13} операций в 1 с (в миллион раз быстрее, чем на самых современных цифровых ЭВМ) производить обработку геофизических и геологических материалов одновременно по всей области задания исходной информации.

Исследования возможностей применения когерентных и некогерентных оптических систем в геологии и геофизике ведутся как в нашей стране, так и за рубежом. Объемы информации, обрабатываемой с помощью оптических устройств, постоянно увеличиваются. Например, только по Центральному геофизическому тресту объемы обрабатываемых геофизических материалов на лазерной установке превышают 30 тыс. км.

В СССР одна из первых установок для оптического анализа аэрофотоснимков создана в 1955—1959 гг. В начале 60-х годов

Ю. Д. Шариковым разработан способ дифракционного анализа аэрофотоснимков. С 1966 г. Г. Р. Миркиным и А. Н. Королевым проводятся исследования во ВНИГРИ. В аппаратуре для регулируемого направленного приема, разработанной под руководством Л. А. Рябинкина, оптическая система применялась для фотоэлектрического суммирования сейсмических записей. Оптические системы для обработки сейсморазведочных данных использовались Ю. В. Тимошиным, В. Д. Завьяловым и др.

Начиная с 1966 г. в Центральном геофизическом тресте под руководством и при участии автора проводятся исследования возможностей когерентных оптических систем, результаты которых позволили внедрить оптическую обработку в практику геолого-геофизических работ, а также разработать новую аппаратуру.

Работы, выполненные в 1961 г. Джексоном и Добриным в США, легли в основу дальнейших исследований по применению когерентных оптических систем для обработки геологоразведочных данных за рубежом. Большой вклад в эту область внесли Пинкус, Фонтанель, Гро, Шевалье, Бауэр и др.

Разрозненность опубликованных к настоящему времени материалов по оптической обработке существенно затрудняет ознакомление широкого круга инженерно-технических работников геофизической и геологической службы с возможностями и перспективами дальнейшего применения когерентных оптических систем. Опубликованные монографии [5, 9, 14, 17, 20, 26, 27, 43, 45, 49, 53, 54, 86, 88] не могут восполнить существующий пробел в геофизической литературе, так как работы в основном носят теоретический характер и весьма специфичны.

Предлагаемая работа является первой попыткой обобщить имеющийся опыт применения когерентных оптических систем в геологии и геофизике. При ее подготовке основное внимание уделено вопросам методики, описанию оптических способов и результатам их применения. Изложение материала базируется в основном на исследованиях, выполненных автором и руководимым им коллективом.

Автор считает своим долгом поблагодарить В. В. Федынского, М. К. Полшкова, И. И. Гурвича, А. М. Епинагьеву, А. К. Урупову, Ю. Н. Грачева за постоянное внимание к исследованиям автора; В. В. Ансимова, А. П. Слопогузова, В. Т. Троянского, О. К. Глотова, И. Г. Дидуру, Д. П. Касаткина, Е. А. Копилевича, А. А. Шевченко, Г. В. Рябчикова за поддержку нового направления в области машинной обработки геофизических материалов в Центральном геофизическом тресте; Б. В. Шальнова, С. М. Кофсмана, Л. А. Шальнову, В. А. Лихтермана, Г. Р. Миркина, К. Г. Тараянца, Г. А. Шехтмана, Р. А. Хазахову и других, принимавших участие в исследованиях; А. Б. Беклемишева, С. А. Васильева, В. А. Гродзенского, В. П. Голосова, Л. В. Петрова и других за полезное обсуждение отдельных разделов работы.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ — НОВЫЙ ВИД
ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Теория оптических преобразований достаточно полно изложена в работах [14, 27, 66, 86], поэтому ниже даны лишь некоторые теоретические положения, необходимые для понимания принципиальных основ оптической обработки геолого-геофизических материалов. В оптических вычислительных устройствах носителем информации является не электрический ток, а световое (электромагнитное) поле, в параметрах которого могут быть закодированы исходные данные. Связь параметров в пространстве и времени для плоской волны может быть записана в следующем виде:

$$A(t, x) = A_0(x) e^{i(\omega t - kx)}, \quad (1.1)$$

где $A_0(x)$ — начальная амплитуда распространения волны; ω — частота колебаний; t — время распространения волны; k — волновое число; x — расстояние от источника до приемника.

Два источника излучают волны, когерентные во времени и пространстве, если начальная разность фаз φ неизменна во времени и разность фаз kx неизменна для каждой точки пространства.

До появления лазеров радиотехнический излучатель в отличие от оптического всегда давал электромагнитную волну с определенной начальной фазой, т. е. когерентную волну. С появлением лазеров эти отличия сгладились. В лазерах удалось заставить все атомы активного вещества, излучающего свет, давать электромагнитные волны с такими определенными начальными фазами, что на выходе образуется одна электромагнитная волна с одной заданной начальной фазой, т. е. когерентная электромагнитная волна.

Известно, что в радиотехнике широко используется нелинейное преобразование сигналов. Умножение, детектирование и суммирование частот — элементарные радиотехнические операции. После изобретения лазеров нелинейные преобразования стали доступны и для оптических устройств.

Обработка информации при помощи когерентных оптических систем основана на использовании явлений дифракции и интерференции световых электромагнитных волн, возникающих при прохождении первичной световой волны через фототранспарант (микрокопию). Поместим в пучок когерентного монохроматического света фототранспарант, пропускающий свет интенсивностью $T(x, y)^2$ и имеющий оптическую толщину $d(x, y)$. На выходе

фототранспаранта образуется амплитудный сигнал, определяемый комплексной функцией двух переменных [27]:

$$T_E(x, y) = \sqrt{|T(x, y)|^2} e^{id(x, y)} = T(x, y) e^{id(x, y)}. \quad (1.2)$$

Величину $T_E(x, y)$ называют комплексным амплитудным коэффициентом пропускания.

За фототранспарантом образуются вторичные волны, которые преобразуются линзой, обладающей свойством таутохронизма. В связи с тем, что скорость распространения электромагнитных световых волн в стекле меньше, чем в воздухе, то свет, распространяющийся по разным лучам к изображению точечного источника, претерпевает временные задержки, но времена пробега волны по разным лучам одинаковы. Временные задержки, вводимые линзой, пропорциональны толщине линзы в каждой точке. И несмотря на то, что абсолютные значения временных задержек малы, они оказывают большое влияние на форму фронта волны, прошедших через линзу. При этом значительное влияние оказывает и форма самой линзы. В случае сферической линзы свет, проходящий по лучу через центр линзы, претерпевает наибольшую временную задержку и наименьшее отклонение луча от первоначального направления. По краям линзы волны претерпевают наименьшую временную задержку, но наибольшее отклонение от первоначального направления. В этом отношении с помощью линзы можно решать те же задачи изменения кривизны фронта волны, которые решаются в сейсморазведке путем введения кинематических поправок на аналоговых и цифровых машинах.

Распределение поля $E(x, y)$ за линзой [14] имеет вид

$$E_1(x, y) = E(x, y) \exp[ikn\Delta] \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right], \quad (1.3)$$

где n — показатель преломления линзы; Δ — максимальная толщина линзы; x, y — координаты точек линзы.

Первый член уравнения (1.3) представляет собой амплитудное пропускание, второй член — постоянный фазовый сдвиг проходящей электромагнитной волны, третий член аппроксимирует в квадратичном приближении сферическую волну.

Если фокусное расстояние f положительно, то сферическая волна сходится на оси линзы в точке, расположенной на расстоянии f за линзой. Если же фокусное расстояние отрицательно, то сферическая волна расходится из точки, расположенной на фокусном расстоянии f перед линзой [66].

Преобразования Фурье, выполняемые линзой

Оптическая система, состоящая из одной или нескольких линз, является простейшим устройством, способным выполнять математические операции на основе явлений интерференции и дифрак-

ции света. Она позволяет осуществлять преобразования Фурье от функции двух переменных, заданных на фотопленке.

Рассмотрим фототранспарант, представляющий собой решетку. Поглощение света фототранспарантом происходит вдоль оси x (рис. 1, a). Выясним особенности распределения интенсивности света на большом расстоянии от решетки при условии $P = \sqrt{\lambda f/d} \gg 1$, где P — параметр, характеризующий дифракцию Фраунгофера. Используем законы интерференции и принцип Гюйгенса — Френеля, согласно которому каждая точка фронта падающей волны может рассматриваться как новый элементарный источник с определенными фазой и амплитудой.

Вторичные элементарные волны, образованные на непрозрачных участках решетки, имеют относительные начальные фазы, определяемые временем прихода фронта падающей волны. В нашем случае фронт падающей световой волны плоский и параллелен решетке, следовательно, фазы всех элементарных источников одинаковы.

Образованный элементарными источниками фронт результирующей вторичной волны согласно принципу Гюйгенса — Френеля есть огибающая фронтов от каждого источника. Можно построить несколько огибающих фронтов элементарных источников, при этом фазы колебаний источников окажутся одинаковыми на прямых, расположенных под углом α к фронту падающей волны.

Энергия волны, проходящей через прозрачные участки решетки, будет складываться не только по первоначальному направлению E_0 , но и по двум другим направлениям (например, E_1) при условии, что разность хода лучей, идущих через соседние прозрачные участки решетки, равна длине волны.

Таким образом, решетка, подобная изображенной на рис. 1, a , преобразует плоскую волну в одну или несколько вторичных волн, распространяющихся как по первоначальному направлению, так и под углом к направлению падающей волны. Согласно геометрической оптике вторичные волны, отклонившиеся от первоначального направления распространения, принято называть дифрагированными.

Если поместить достаточно далеко от решетки экран P , то можно наблюдать картину сложения элементарных колебаний от источников (дифракционную картину), т. е. определить углы отклонения волн от первоначального распространения. С целью сокращения расстояния от фототранспаранта до экрана расположим собирающую (сферическую) линзу за фототранспарантом на расстоянии r и рассмотрим параллельный пучок света, падающий на линзу под углом α с фронтом E'_1 . Пучок окажется собранным в точке M экрана P , расположенного на фокусном расстоянии f от линзы. Таким образом, с помощью линзы выполнено интегрирование (суммирование в одной точке) всех амплитуд колебаний, соответствующих разным точкам решетки, а также преобразование направлений падающих на нее пучков в координаты

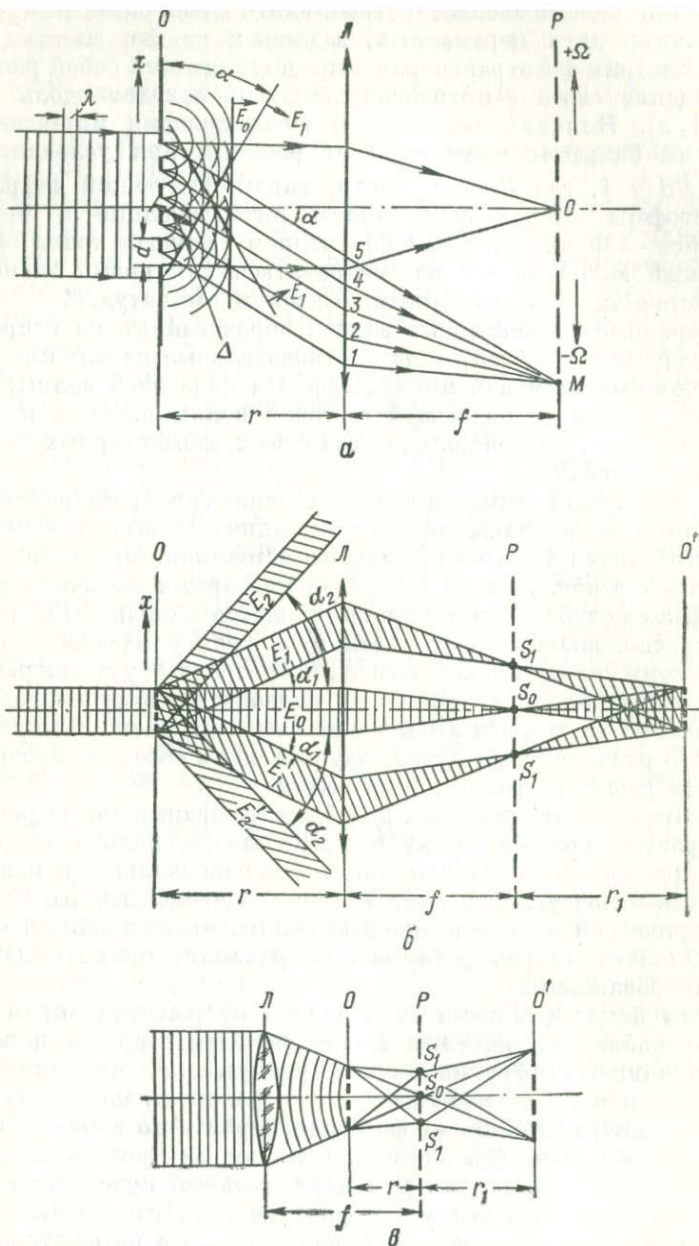


Рис. 1. Преобразования Фурье, выполняемые линзой.

a — схема преобразования Фурье функции, описывающей распределение света на дифракционной решетке: λ — длина падающей световой волны, d — период решетки, r — расстояние от линзы до решетки, E_0 , E_1 — фронты дифрагированных волн нулевого

наты точек в плоскости экрана. Каждой точке оси Ω на экране будет соответствовать своя величина угла α , на который отклоняются дифрагированные волны.

Амплитуда колебаний на экране в функции от координат Ω определяется по формуле [66, 98]

$$\begin{aligned}
 A = \cos \omega t \int_0^x T(x) \cos(kx \sin \alpha) dx + \\
 + \sin \omega t \int_0^t T(x) \sin(kx \sin \alpha) dx = \cos \omega t \int_0^t T(x) \cos \Omega x dx + \\
 + \sin \omega t \int_0^t T(x) \sin \Omega x dx.
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Коэффициенты при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ представляют преобразование Фурье от функции (X) , заданной на фотопленке.

При регистрации фотографическим (на фотопленку) или фотоэлектрическим (при помощи ФЭУ) способом полученной в плоскости P картины суммирования дифрагированных волн происходит потеря фазовой информации, так как регистрируются только амплитуды (интенсивности) компонент преобразования Фурье. Картина на экране представляет собой спектр функции, заданной на фототранспаранте, поэтому плоскость экрана называют частотной плоскостью или плоскостью спектра Фурье. Если электромагнитная волна без всяких препятствий за частотной плоскостью распространяется дальше, то потери фазы не происходит и на определенном удалении от нее восстанавливается исходное изображение решетки (рис. 1, б, в).

В оптических устройствах, как мы видим, интегрирующим элементом служит собирающая линза. В случае, если интегрирование необходимо произвести по одной координате, используется цилиндрическая линза, в случае интегрирования по двум координатам — сферическая.

Через апертуру линзы могут проходить не все дифрагированные волны (см. рис. 1, б), что влияет определенным образом на результат преобразования Фурье и восстановленного изображения. Транспарант может располагаться и за линзой, т. е. в пучке сходящегося света (см. рис. 1, в). Все эти случаи имеют для

и первого порядков дифракции, α — угол отклонения фронта дифрагированной волны, $\Delta = x \sin \alpha$ — разность хода лучей, $I-\delta$ — лучи дифрагированных волн от элементов дифракционной решетки, O — плоскость решетки, L — линза, P — фокальная плоскость или плоскость дифракционного изображения решетки (спектра), M — точка наблюдения, O' — плоскость восстановленного изображения; б, в — схемы двойного преобразования Фурье соответственно в плоскостях параллельном и сходящемся световых пучках; E_0, E_1, E_2 — дифрагированные волны нулевого, первого и второго порядков, S — максимумы дифракционной картины

практики существенное значение [66, 75]. Необходимо отметить, что линза осуществляет преобразование, несколько отличающееся от преобразования Фурье, особенно при больших углах отклонения лучей от оптической оси линзы. В области малых значений углов (до 7°) преобразование, осуществляемое линзой с достаточной для практики точностью, совпадает с преобразованием Фурье.

Формирование дифракционного и восстановленного изображений исходной геолого-геофизической информации

Исходная геологическая и геофизическая информация, как правило, представляется на плоскости в системе координат x, y . Если это аэрофотоснимок или карта, то они характеризуют какую-то поверхность. Если это сейсмическая запись, зарегистрированная по определенной линии разведочного профиля, то это сейсмический временной разрез в системе координат x, t . Результаты гравиметровой, магнитной, аэромагнитной, гаммаспектроскопической, геохимической и других съемок также представляются на плоскости, т. е. геолого-геофизическая информация является, как правило, двумерной, а микрокопия этой информации, помещенная в пучок когерентного монохроматического света, будет играть для него роль сложной дифракционной решетки. Следовательно, проходящий через микрокопию свет будет дифрагировать и таким образом будет осуществляться преобразование Фурье исходной информации. Рассмотрим на примере сейсмического временного разреза процесс формирования спектра и восстановленного изображения.

Если микрокопию сейсмического разреза, у которой свойства пропускания света меняются от точки к точке, поместить в однородный пучок когерентного света, то пропускаемый через нее световой пучок будет дифрагировать. Непосредственно за микрокопией комплексная амплитуда проходящей световой волны согласно (1.2) равна

$$T_E(x, t) = T(x, t) e^{i\varphi(x, t)}. \quad (1.5)$$

На основании теории Фурье сейсмический разрез может рассматриваться как суперпозиция бесконечного числа волн, каждая из которых может быть охарактеризована ориентацией, пространственной частотой и амплитудой. Разложим функцию $T(x, t)$ в компоненты Фурье по формуле [6, 49]

$$T(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\omega_x, \omega_t) e^{2\pi i(x\omega_x + t\omega_t)} d\omega_x d\omega_t. \quad (1.6)$$

Каждая компонента в разложении Фурье — бесконечная пространственная волна с периодом ω_x и ω_t в направлении x и t . Функция $T(\omega_x, \omega_t)$ определяет амплитуду каждой из компонент Фурье.

Ориентация, частота и амплитуда дифрагированных волн зависят от параметров решетки, вследствие чего дифрагированные волны, соответствующие каждой компоненте преобразования Фурье, распространяются в направлениях, определяемых косинусами α и β , где α и β — углы, составленные фронтом дифрагированной волны соответственно с осями x и t . В то время как картина распределения освещенности за разрезом меняется очень быстро, так что он становится неразличимым, модули преобразования Фурье фототранспаранта $T(\omega_x, \omega_t)$ не меняются вообще. Это ясно из того, что каждая точка преобразования Фурье разреза с координатами ξ, η плоскости P соответствует определенному направлению распространения световой волны, которое в свободном пространстве не меняется. Поместив на некотором расстоянии r от разреза линзу конечных размеров, мы потеряем часть информации, заключенной в компонентах преобразования Фурье высших порядков, так как часть дифрагированных волн пройдет за пределами зрачка линзы. Волны, прошедшие через линзу, интерферируют в ее фокальной плоскости $P(\xi, \eta)$ (см. рис. 1, а) и образующаяся при этом дифракционная картина описывается выражением [14, 49, 54]

$$T(\xi, \eta) = C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(x, t) e^{2\pi i \left(\frac{\xi x}{f} + \frac{\eta t}{f} \right)} dx dt, \quad (1.7)$$

где C — постоянная.

В случае, если углы α и β достаточно малы, можно записать

$$\xi = f \cos \alpha, \quad \eta = f \cos \beta.$$

Вследствие двумерного преобразования исходной сейсмической записи временные частоты сейсмических колебаний преобразуются в пространственные частоты оптических колебаний в системе пространственных координат F, k . Оси F и k параллельны соответственно осям t и x исходного сейсмического разреза. Приняв $k = \xi/f$ и $F = \eta/f$, получим соотношение, представляющее распределение освещенности в фокальной плоскости линзы,

$$T(F, k) = C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(x, t) e^{2\pi i (Ft + kx)} dx dt. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) является двумерным преобразованием Фурье или двумерным спектром сейсмического разреза по частоте F и волновому числу k .

Так как преобразование Фурье линейно и к нему применим принцип наложения (суперпозиции), то независимо от места сейсмических колебаний на микрокопии соответствующие им вторичные

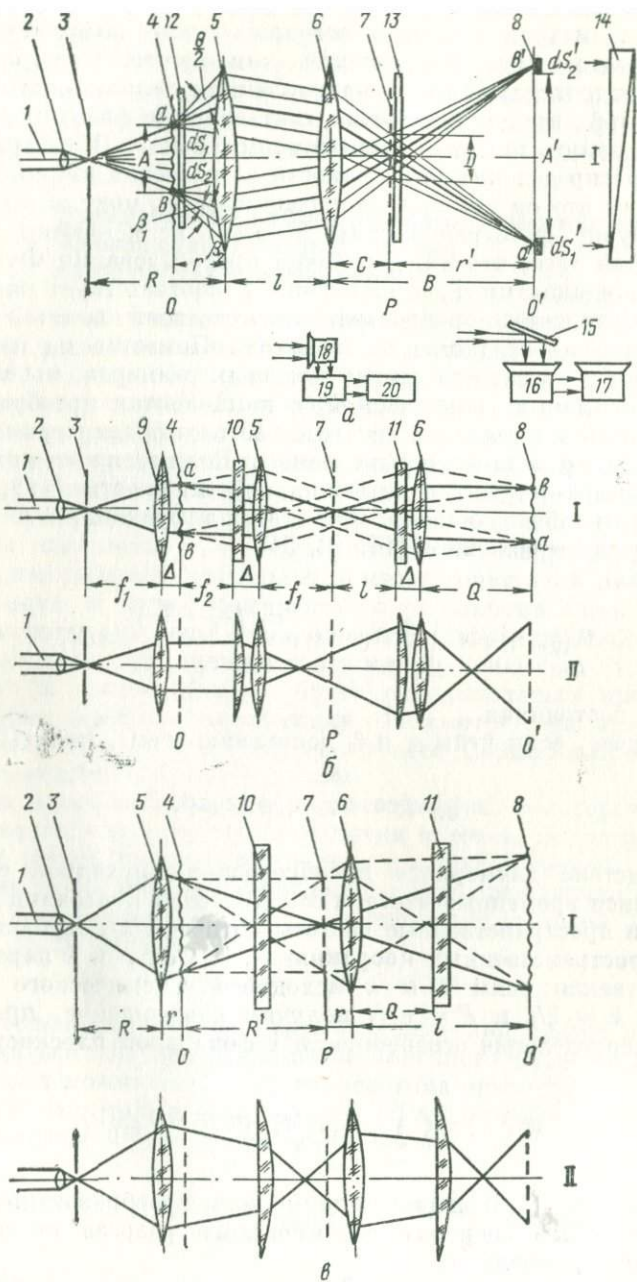


Рис. 2. Схемы лазерной установки «Когерент» для преобразования Фурье в расходящемся (а), плоскопараллельном (б) и сходящемся (а) пучках когерентного монохроматического света.

волны при одинаковой частоте и направлении будут интерферировать в одной точке двумерного спектра, т. е. все лучи, отклонившиеся на одинаковый угол α , соберутся в одной точке фокальной плоскости оптической системы S_1 (см. рис. 1, б). Таким образом, каждая точка двумерного спектра, определяющая значение пространственной частоты оптических колебаний, соответствует определенной временной частоте сейсмических колебаний. Каждому направлению осей синфазности на микрокопии сейсмического разреза соответствуют ортогональные направления светящихся точек в плоскости двумерного спектра.

Элементарная оптическая система может одновременно формировать спектр и восстанавливать изображение исходной информации (см. рис. 1, б, в). Образование восстановленного изображения осуществляется благодаря двойному преобразованию Фурье от распределения световых колебаний $T(x, t)$ в освещенной микрокопии сейсмического разреза. Распределение освещенности в плоскости восстановленного изображения входной информации по аналогии с (1.8) можно записать в виде

$$T(x', t') = C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(F, k) e^{-2\pi i(t'F + x'k)} dF dk. \quad (1.9)$$

Для уменьшения расстояний от исходного разреза до плоскости восстановления обычно применяют вторую линзу (систему линз), размещение которой зависит от задач оптических преобразований информации [66, 67, 69].

В связи с тем, что первое и второе преобразования Фурье в оптической системе прямые, то восстановленное изображение имеет обратное направление осей координат, т. е. изображение получается перевернутым (рис. 2, а).

Если в плоскость микрокопии сейсмического разреза дополнительно ввести фототранспарант с записью определенной функции модуляции света, то будет осуществлено перемножение сигналов сейсмического разреза и функции пропускания фототранспаранта. Введение фототранспаранта, играющего роль фильтрующей заслонки, в плоскость спектра даст перемножение спектра сейсмических сигналов на функцию пропускания фототранспаранта. Подбором функций пропускания фототранспарантов можно получить нужную переходную характеристику оптической системы в целом.

1 — плоскопараллельный пучок когерентного света от газового лазера; 2 — короткофокусный объектив; 3 — диафрагма для ограничения микрокопии; 4 — микрокопия исходной информации; 5, 6 — сферические линзы; 7 — плоскость формирования спектра; 8 — плоскость восстановленного изображения исходной информации; 9 — линза-коллиматор; 10, 11 — цилиндрические линзы; 12 — диафрагма для ограничения анализируемой информации; 13 — система пространственных фильтров-заслонок; 14 — фотоаппарат; 15 — выдвигаемое зеркало; 16 — приемное устройство телевизионной установки; 17 — телевизор; 18 — фотозащелка или ФЭУ; 19 — усилитель фототоков; 20 — регистратор фототоков; I — вид сбоку; II — вид сверху

Если микрокопия сейсмического разреза дана в виде случайного распределения почернения фотопленки с пространственным спектром $\Phi(\omega_x, \omega_t)$, на фоне которого ожидается сигнал со спектром $S(\omega_x, \omega_t)$, то для оптимального выделения сигнала можно воспользоваться восстановленным изображением этого разреза оптической системой, в фокальной плоскости которой помещен пространственный оптический фильтр. Распределение пропускания по поверхности фильтра должно подчиняться закону [101]

$$h_{\text{опт}}(\xi, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\omega_x, \omega_t)}{\Phi(\omega_x, \omega_t)} e^{i(\omega_x \xi + \omega_t \eta)} d\xi d\eta. \quad (1.10)$$

Результаты оптической фильтрации мгновенно просматривают на экране телевизора и оптимальный вариант фильтрации фотографируют.

Таким образом, можно написать соотношение между объектом и его восстановленным изображением при оптимальной оптической фильтрации

$$O(\omega) = H(\omega) O'(\omega), \quad (1.11)$$

где $H(\omega) = h(\omega) + h'_{\text{опт}}(\omega)$ — передаточная функция оптической системы и оптимального пространственного оптического фильтра.

Аппаратура для оптической обработки геолого-геофизических данных

В практике геолого-геофизических исследований применяют специально разработанные лазерные установки отечественного и зарубежного производства [74, 75, 77, 94, 108, 110, 111, 121]. Наибольшее распространение имеет лазерная установка «Когерент» [74]. В зависимости от задач обработки лазерные установки собирают по схемам, показанным на рис. 2.

Установкой, собранной по схеме рис. 2, а, осуществляют двумерную оптическую фильтрацию и двумерный спектрально-корреляционный анализ геофизических и геологических данных. Работает такая установка по известному принципу преобразования исходной информации в спектр Фурье и обратно. Фильтрацию осуществляют путем установки заслонок определенной формы в плоскости спектра (рис. 3).

Благодаря использованию в этой установке расходящегося света и двух сферических линз можно легко менять размер спектра и восстановленного изображения, приспособив их к формату регистрирующей аппаратуры и удовлетворяя требованиям необходимой разрешающей способности двумерной оптической

фильтрации [58, 63]. Параметры оптической системы связаны соотношениями [75]

$$l = \frac{f^2(1+M) - 2Mrf}{M(f-r)}, \quad (1.12)$$

$$B = f(1+M) - Mr, \quad (1.13)$$

$$C = \frac{f[fR - A(R-f)]}{2fR - A(R-f) - f^2}, \quad (1.14)$$

где l , B , C , R , r — параметры системы, показанные на рис. 2, а; M — масштаб восстановления исходного изображения после двумерной оптической фильтрации.

Обычно величина $R - r = 1200$ мм, а расстояние r от микрокопии до линзы определяется конструктивными особенностями узлов лазерной установки и не превышает 200 мм. Например, при $M = 1,8$, $f = 800$ мм, $r = 200$ мм и $R = 1400$ мм получим $A = 1130$ мм, $B = 1885$ мм, $C = 382$ мм.

Установка, собранная по схеме рис. 2, б, позволяет выполнять одномерную оптическую фильтрацию и получать спектры и корреляционные функции одновременно для нескольких сотен сейсмических трасс или других сигналов [67, 70]. В отличие от схемы двумерной фильтрации здесь используется плоскопараллельный когерентный свет и оптическая система, состоящая из сферических и цилиндрических линз. В плоскости одномерного (много-трассового) спектра $\tilde{\gamma}$ может быть выполнена различная частотная фильтрация исходных данных с использованием линейных, полосовых или гребенчатых фильтров (заслонок). В основном эта установка применяется в практике геолого-геофизических исследований для реализации различных алгоритмов спектрально-корреляционного анализа исходной информации.

Разрешающая способность такой установки определяется качеством изготовления линз и точностью их размещения на оптической скамье относительно других узлов. Масштаб восстановления изображения исходной информации в этой установке должен быть равен единице. Это можно сделать при выполнении следующих условий [75]:

$$l = \frac{f_2(\Delta^2 - \Delta f_2 + f_2^2)}{(\Delta - f_2)^2}, \quad (1.15)$$

$$Q = f - \Delta, \quad (1.16)$$

где l , Q , Δ — параметры установки, изображенной на рис. 2, б.

Если линзы β и II (см. рис. 2, б) поменять местами, то l должно равняться фокусному расстоянию линзы β , а восстановленное изображение будет формироваться в фокальной плоскости линзы II .

Особенность установки, собранной по схеме рис. 2, в, состоит в том, что уменьшенное изображение исходных данных помещают

в сходящемся пучке света, в связи с чем при переходе от двумерной фильтрации к одномерной требуется только установить две дополнительные цилиндрические линзы, не трогая остальных элементов схемы. Эти преимущества, имеющие важное практическое значение, не влияют на разрешающую способность установки и допуски на рабочие параметры фильтров-заслонок, сохраняя их такими же, как и в установках, собранных по схемам

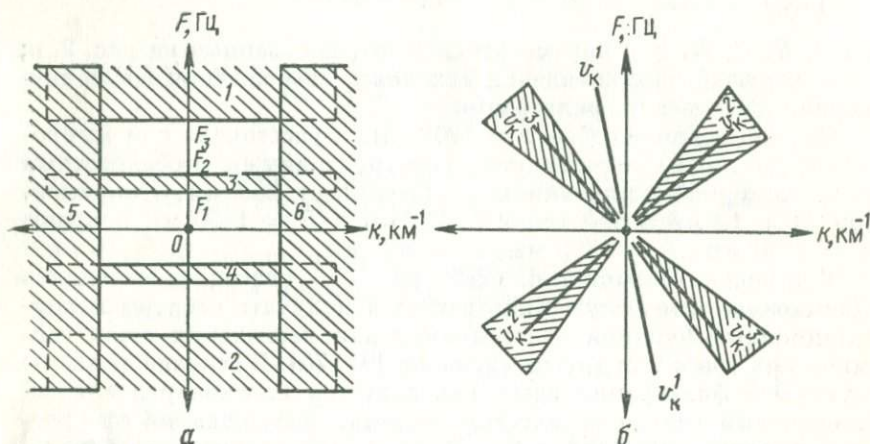


рис. 2, а и б [75]. Плоскость спектра 7 в этой схеме совпадает с плоскостью изображения точечного источника света, сформированного линзой 5, при выполнении условия

$$R' \gg \frac{\sin^2 \beta m^2}{2\lambda}, \quad (1.17)$$

где β — угол дифракции, определяющий частоту в плоскости спектра; R' — расстояние от микрокопии до плоскости спектра; m — размер микрокопии.

На рис. 2, в показано сечение оптической системы вдоль оси частот исходных сигналов. В этом сечении работают только сферические линзы 5 и 6. Линза 5 формирует спектр, а линза 6 восстанавливает отфильтрованное изображение исходной информации. Для принятых значений R , R' , r фокусное расстояние линзы 5 определится из выражения [75]

$$f_1 = \frac{R(r-R')}{r+R'+R}. \quad (1.18)$$

Для обычно применяемого масштаба увеличения $M = 1,8$ расстояние от линзы 6 до плоскости восстановленного изображения 8 и фокусное расстояние линзы 6 определяются по формулам

$$l = (r + R')M, \quad (1.19)$$

$$f_2 = \frac{M(r+R')}{M+1}. \quad (1.20)$$

При одномерном преобразовании, кроме сферических линз 5 и 6, работают цилиндрические линзы 10 и 11. Цилиндрическая линза 10 формирует изображение спектров трасс в плоскости 7 с линейным увеличением, равным единице, а система, состоящая из сферической линзы 6 и цилиндрической линзы 11, восстанавливает исходное изображение трасс в плоскости 8 с линейным увеличением, равным единице. Из этих условий фокусные расстояния

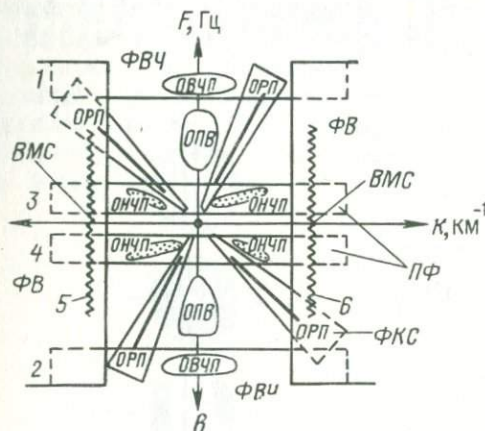


Рис. 3. Схематическое изображение двумерной оптической фильтрации.

a — фильтрация по частоте F (1—4) (1, 2 — фильтры, срезающие частоты выше F_3 , 3, 4 — фильтры, вырезающие полосу частот от F_1 до F_2) и h (5, 6); *b* — фильтрация по кажущейся скорости для выделения волн с v_k ; *в* — комплексная оптическая фильтрация: ОПВ, ОРП, ОНЧП, ОВЧП — области спектра соответственно полезных волн, регулярных, низкочастотных и высокочастотных волн-помех, ВМС — вторичные максимумы спектра, ПФ — полосовой фильтр, ФНЧ — фильтр низких частот, ВКС — фильтр по кажущейся скорости, ФВ — фильтр по волновому числу

цилиндрических линз 10 и 11 и их фокусные расстояния определяются [75] по формулам

$$\frac{R'}{2} = 2f_3, \quad (1.21)$$

$$Q = \frac{(l-r)f_2}{r}, \quad (1.22)$$

$$f_4 = \frac{f_2(l-Q)}{r}. \quad (1.23)$$

Анализ геолого-геофизических материалов (аэрофотоснимков, карт изогипс, штриховых карт и т. д.) иногда требует нескольких плоскостей формирования спектра преобразования Фурье, в каждой из которых осуществляют определенный вид фильтрации, измерений или регистрации данных.

На рис. 4 приведена схема лазерной установки, имеющей по данным экспериментальных исследований хорошие эксплуатационные качества [77]. Если в этой схеме сферические линзы, стоящие после фототранспаранта 6, заменить на астигматические системы, состоящие из сферических и цилиндрических линз, то вместо двумерных спектров можно получить одномерные, а следовательно, выполнить некоторые виды одномерного спектрально-корреляционного анализа материалов. Для осуществления оптической фильтрации используют определенной формы непрозрачные заслонки, некоторые из которых схематически показаны на рис. 4, I—VII.

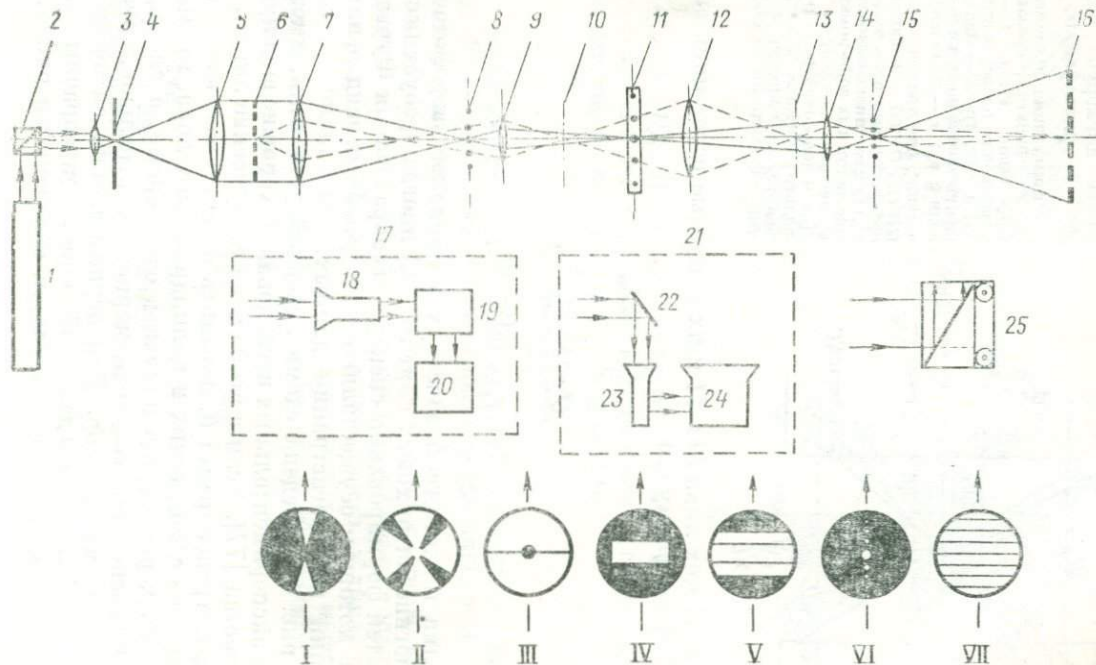


Рис. 4. Схема лазерной установки для комплексной обработки и анализа геолого-геофизических материалов.

1 — газовый лазер; 2 — призма; 3 — короткофокусный объектив; 4 — точечная пространственная когерентность монохроматического света; 5 — линза-коллиматор; 6 — фототранспарант исходной информации; 7, 9, 12, 14 — сферические линзы оптической системы; 8, 11, 15 — плоскости формирования преобразования Фурье исходной информации; 10, 13, 16 — плоскости восстановления изображения исходной или фильтрованной информации; 17 — приставка для осуществления количественного анализа исходной информации; 18 — фотоумножитель, 19 — усилитель фототоков, 20 — регистратор фототоков; 21 — промышленная телевизионная установка для мгновенного просмотра результатов оптической обработки информации; 22 — выдвигаемое зеркало, 23 — приемная система, 24 — телевизор; 25 — фотокамера для регистрации спектров и результатов оптической обработки информации; I — VII — схематическое изображение некоторых заслонок, применяющихся при оптической обработке и анализе геолого-геофизической информации

Фильтрацию по направлению обычно осуществляют в плоскости 11, где формируется самый большой двумерный спектр. В зависимости от вида частотной фильтрации ее выполняют в плоскостях 8 или 15. Высокочастотную или полосовую фильтрацию осуществляют обычно в плоскости 8, а в плоскости 15, как правило, выполняют низкочастотную фильтрацию.

Спектры и результаты оптимальных вариантов фильтрации регистрируют широкоплечным фотоаппаратом «Салют» в одной из плоскостей 8, 11, 15 и 10, 13, 16. При этом получают качественные характеристики исследуемого материала. С целью получения количественных характеристик используется приставка количественного анализа геолого-геофизических материалов, состоящая из преобразователя — фотоумножителя 18, усилителя фототоков 19 и регистратора 20.

СПОСОБЫ И МЕТОДИКА ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Исследованиями, проведенными для обработки геолого-геофизической информации с помощью когерентных оптических систем, отмечено, что распределение интенсивности света в спектре дифракционной решетки зависит как от закона распределения ее штрихов, так и от последовательности штрихов в пределах одного закона [78], т. е. спектр полностью характеризует особенности строения природных объектов. Любые изменения в исходной информации получают свое отражение в спектре преобразования Фурье. Параметры двумерного либо одномерного спектра связаны определенными соотношениями с параметрами оптической системы и особенностями подготовки исходных данных для оптической обработки [58]. При оптической фильтрации геолого-геофизических материалов возможны помехи, вызванные краевыми эффектами, уровень которых всегда ниже уровня сигнала. Помехи имеют характерную форму, легко распознаются и исключаются при интерпретации результатов [57]. Оптическая фильтрация обладает высокой разрешающей способностью разделять волны, наложенные под углом друг на друга [63]. Динамический диапазон оптической обработки определяется параметрами используемых в настоящее время фотоматериалов [38, 70] и не превышает 40 дБ.

С учетом полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны способы и методика оптической обработки геолого-геофизических материалов. Большинство из описываемых способов к настоящему времени внедрены в производство. Исключение составляют способы получения суммо-лент РНП и оптической согласованной фильтрации. Эти способы еще не вышли из стадии экспериментального опробования и выбора технологии, обеспечивающей возможность их широкого практического применения.

Методика двумерной оптической фильтрации сейсморазведочных данных и интерпретации получаемых результатов

Выбор оптимальной методики двумерной оптической фильтрации определяется параметрами оптической системы лазерной установки, возможностями вспомогательного фотооборудования, особенностями подготовки исходной информации и задачами, сто-

ящими перед оптической фильтрацией. Оптическую фильтрацию сейсморазведочных данных по частоте, кажущейся скорости и волновому числу осуществляют по воспроизведениям, выполненным на любом преобразователе сейсмической записи способом переменной площади или переменной плотности. Воспроизведенные данные записывают на фотопленку или фотобумагу. При этом предпочтительнее воспроизведения, выполненные способом переменной плотности на фотопленку.

Сейсмические записи воспроизводят на оптимальных для данного района параметрах с таким расстоянием между трассами по оси x и масштабом записи по оси t , чтобы обеспечить максимально возможную компактность воспроизведения, от чего в дальнейшем зависит разрешающая способность и производительность оптического фильтра. Из воспроизведенных сейсмических записей составляют монтажи, обращая особое внимание на правильную стыковку сейсмограмм во избежание ошибок в корреляции при последующей интерпретации результатов оптической фильтрации. По светокопиям монтажей (если воспроизведение проведено на фотопленку) или на карандашной кальке (если воспроизведение проведено на фотобумагу) предварительно коррелируют волны, отмечают зоны разрыва и интерференции, т. е. конкретизируют задачи, которые нужно решить с помощью оптического фильтра.

На основе данных о геологическом строении участка исследования, предварительной корреляции (если она возможна) и сведений о характере возможных волн-помех (которые можно перед этим получить путем оптического анализа сейсмического разреза [56]) составляют задание для оптического фильтра по каждому монтажу в отдельности. Предназначенные для оптической фильтрации монтажи размером 40×60 см, что определяется возможностями установки для микрофильмирования, подписывают и проставляют шкалу времен через 0,5 с. При этом рекомендуется изображать шкалу в виде кружочков, так как изображения линий могут быть сняты во время оптической фильтрации и тогда возникнут затруднения в увязке монтажей [70]. По монтажам изготавливают микрокопии (фототранспаранты) с учетом вида воспроизведения. Если воспроизведение выполнено способом переменной площади, то микрофильмирование рекомендуется проводить на контрастную фотопленку типа «Микрат-300» с соответствующей фотообработкой. При воспроизведении способом переменной плотности используют нормальную фото-кинопленку типа КН-3 и др.

Оптическую фильтрацию выполняют по схеме, изображенной на рис. 2, а или 2, в, и в соответствии с заданием. Микрокопию сейсмического разреза размером 24×36 мм помещают в носитель разреза, заполненный специальной жидкостью (декалин), коэффициент преломления которой равен коэффициенту преломления фотопленки, что позволяет избежать мешающих дифракционных явлений, вызываемых неровностями фотослоя и царапинами

на поверхности фотопленки. Изображенный на микрокопии разрез или часть его ограничивают диафрагмами, расположенными в носителе разреза, с целью ослабления света, проходящего без дифракции и создающего в области спектра интенсивный фон. Фильтрацию осуществляют тремя системами непрозрачных заслонок (см. рис. 3), которыми закрывают определенные области двумерного спектра сейсмического разреза, не блокируя при этом область центрального пятна. В зависимости от сложности волновой картины и задач оптической обработки три системы заслонок могут быть использованы все одновременно, поочередно или парно, но первой обычно выполняется фильтрация по кажущейся скорости.

Результат фильтрации просматривают на экране телевизора 17 (см. рис. 2, а), для чего в плоскости восстановленного изображения разреза 8 устанавливают выдвижное зеркало 15, отбрасывающее изображение разреза на экран электроннолучевой трубки приемного устройства 16, с которого сигналы поступают на телевизор 17. Оптимальный вариант фильтрации фотографируют фотоаппаратом 14; результат фильтрации затем печатают в масштабе исходного сейсмического разреза в нужном для интерпретации количестве.

Если на входе оптической системы сейсмическая информация представлена в виде переменной площади (ширины), то полное вычитание мешающих волн возможно при снятии влияния вторичных максимумов спектра, поэтому обязательной является фильтрация по волновому числу. Блокирование же вторичных максимумов ведет к снятию изображения сейсмических трасс и на выходе фильтра разрез теряет характерное для переменной площади представление.

Если же на входе используется информация в виде переменной плотности, более приемлемой для оптической фильтрации, то в случае нелинейности процесса обработки фотоматериалов интерпретатор получает на выходе оптического фильтра разрез, в какой-то степени нивелированный по амплитуде.

Таким образом, вопрос о форме представления выходной информации не такой уж простой и маловажный. Для того чтобы получать информацию в удобном для обычной интерпретации виде (переменная площадь) и использовать при оптической обработке преимущества переменной плотности, исключив при этом возможность внесения нелинейных искажений, рекомендуется использовать системы оптических клиньев. Суть заключается в следующем.

Если световой поток интенсивностью $E_0(y)$ пропустить через некоторый полупрозрачный фототранспарант с изменяющимся коэффициентом пропускания по оси x ($T = f(x)$), с другой стороны фототранспаранта интенсивность выразится соотношением

$$J = E_0(y) T(x). \quad (2.1)$$

Зафиксируем световое поле за фототранспарантом на контрастную пленку, полагая, что при некоторой экспозиции $H = Jt$ (t — время экспозиции) пленка меняет плотность проявления от минимальной до максимальной (или от прозрачной до черной). При $t = \text{const}$ эта граница будет соответствовать некоторому значению интенсивности J_0 и выражение (2.1) примет вид

$$E_0(y) T(x) = \text{const}. \quad (2.2)$$

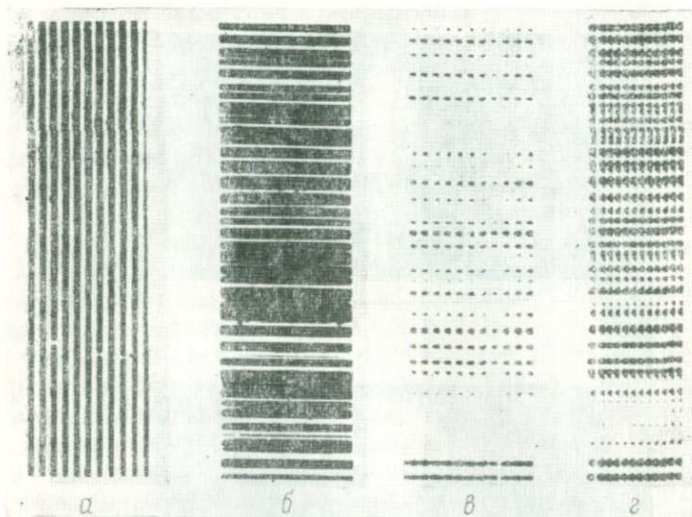


Рис. 5. Пример трансформации записи.

a — система оптических клиньев; *b* — запись способом переменной плотности; *v* — запись способом переменной площади; *z* — прямая запись способом переменной площади

Это означает, что изменение $E_0(y)$ приведет к изменению $T(x)$ и линия $J_0 = \text{const}$ будет отображать изменение функции $E_0(y)$. Если $T(x) = C/x$, где C — некоторый постоянный коэффициент, то амплитуда изменения линии $J_0 = \text{const}$ будет линейно связана с $E_0(y)$.

Если такую процедуру применить к дорожке с записью способом переменной плотности, на выходе получим запись способом переменной площади. Изготовим набор оптических клиньев, соответствующих формату временного разреза. Изменение коэффициентов пропускания клина сделаем одинаковым для каждой дорожки (рис. 5, *a*). Проектируя изображение разреза, выполненного способом переменной плотности (рис. 5, *b*), через систему оптических клиньев на контрастную фотопленку, мы трансформируем запись способом переменной плотности в запись способом переменной площади (рис. 5, *v*).

Технология получения системы оптических клиньев довольно проста и заключается в освещении равномерно движущейся фото-пленки световым окном, имеющим либо переменную интенсивность при постоянной толщине, либо переменную толщину при постоянной интенсивности. Полученную систему оптических клиньев уменьшают путем микрофильмирования до размеров

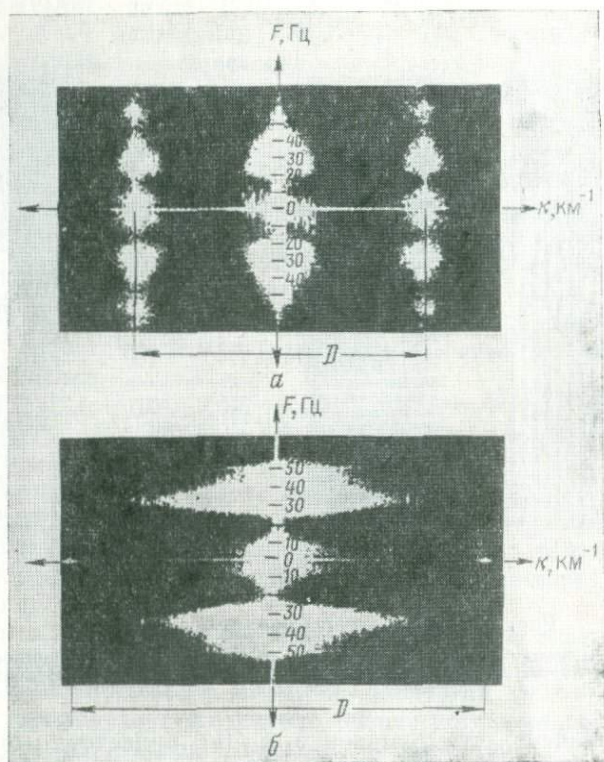


Рис. 6. Спектры сейсмических записей, воспроизведенных способами переменной площади (а) и переменной плотности (б)

разреза в выходной плоскости оптической системы. Клише с оптическими клиньями помещают непосредственно перед контрастной пленкой в фотоаппарате, и после фотообработки зарегистрированных результатов оптической фильтрации имеем запись в виде переменной площади.

Несмотря на то что оптическая обработка имеет много общего с обработкой на аналоговых и цифровых машинах, интерпретация результатов имеет свои особенности. Двумерный спектр сейсморазведочных данных, с которого начинается оптическая

фильтрация, сам по себе является результативным материалом оптической обработки. Поэтому интерпретация результатов оптической фильтрации начинается с эталонирования и анализа спектра (рис. 6), общий вид и особенности которого позволяют определить следующие параметры: частотный состав регистрируемых в данном районе волн; диапазон значений кажущихся скоростей регистрируемых волн; активную полосу спектра сейсмических волн; качественно оценить относительную интенсивность волн с определенными кажущимися скоростями; сделать вывод о наличии на записи периодически повторяющихся волн-помех с высокими и низкими значениями скоростей, в частности кратных волн по дискретному виду спектра, а по расстоянию между дискретными максимумами вычислить период повторения по формуле $\Delta t = K (1/\Delta f)$, где Δt — период кратности в с; Δf — интервал частот между двумя максимумами дискретного спектра; K — коэффициент, зависящий от параметров оптической системы (определяется экспериментально).

Эталонирование двумерных спектров и палетки для интерпретации результатов оптической фильтрации

При оптической фильтрации параметры фильтров по частоте и волновому числу выражают числом миллиметров, на которые раздвигают непрозрачные заслонки относительно центрального пятна, а параметры фильтра по кажущейся скорости — углом отклонения клинообразной заслонки от оси частот. Для перевода значений миллиметров в частоты или единицы волновых чисел, а градусов — в значения кажущихся скоростей вычитаемых волн спектр необходимо проэталонировать (проградировать) по осям частот F и волновых чисел k . Эталонирование осуществляют по следующим формулам [58].

Эталонирование оси частот

$$\Delta f = Di/2T, \quad (2.3)$$

где Δf — число миллиметров, соответствующих 1 Гц; D — расстояние между вторичными максимумами спектра на оси k в мм (см. рис. 6); i — расстояние между трассами на временном сейсмическом разрезе до микрофильмирования в мм; T — число миллиметров, соответствующих 1 с масштаба воспроизведения.

Эталонирование оси волновых чисел

$$\Delta k = \Delta x \frac{D}{2}, \quad (2.4)$$

где Δk — число миллиметров, соответствующих 1 км⁻¹; Δx — расстояние между центрами групп в км.

Определение кажущейся скорости

$$V = F/k, \quad (2.5)$$

где F , k — число герц и волновых чисел (км⁻¹) в масштабе отпечатанного спектра.

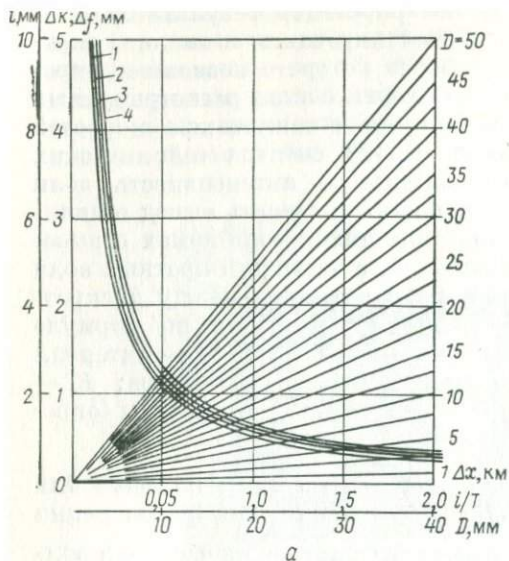
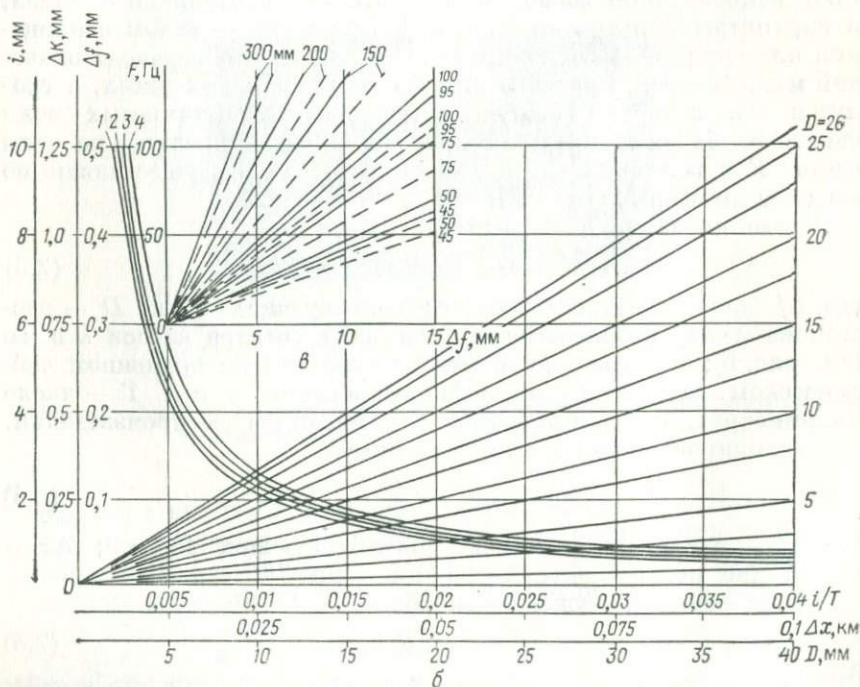


Рис. 7. Палетки для эталонирования спектров временных сейсмических разрезов.

a, б — палетки, построенные в разных масштабах [1—4 — кривые зависимости $D = f(i)$ для расстояний между двумя линзами оптической системы l , равных 111, 119, 130 и 145 см, что соответствует увеличению n отфильтрованного разреза в 1,8; 1,6; 1,4 и 1,2 раза]; e — палетка для непосредственного перевода миллиметров в герцы (сплошная линия для $l = 119$ см и $n = 1,6$; пунктирная линия для $l = 145$ см и $n = 1,2$; 45—300 — масштаб воспроизведения по оси t или число миллиметров, соответствующих 1 с



Эталонирование с использованием формул (2.3)—(2.5) проводится по спектрам, отпечатанным на фотобумаге в любом масштабе. Для этого измеряют расстояние между вторичными максимумами в мм и, зная расстояние между трассами, временной масштаб воспроизведения, расстояние между приборами в поле, производят необходимые расчеты.

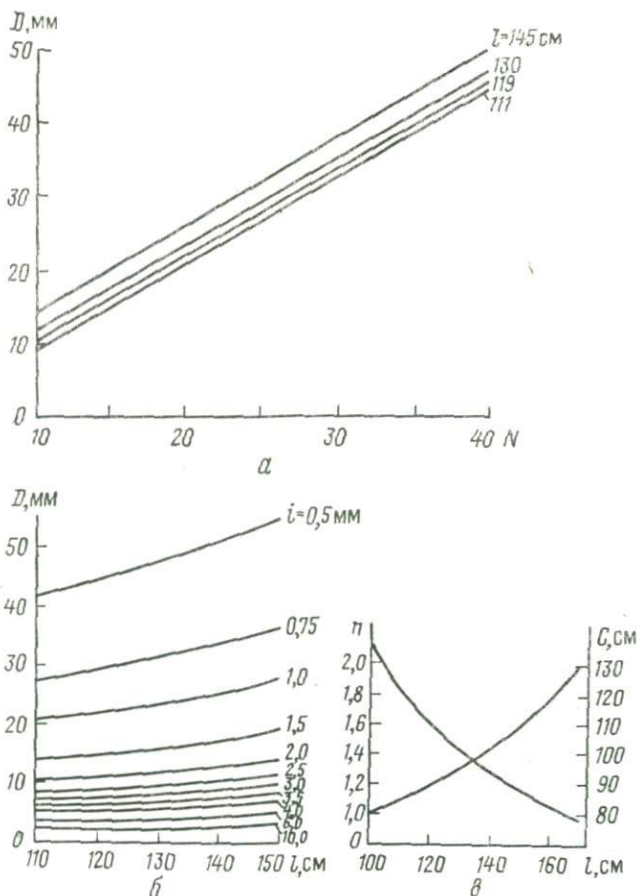


Рис. 8. Зависимости размера двумерного спектра D сейсмического разреза от кратности уменьшения разреза N (а) и расстояний l (б), а также зависимость расстояния C и кратности увеличения восстановленного изображения разреза n от расстояния l (в)

Для убыстрения расчетов предлагаются параметрические папки, охватывающие всевозможные масштабы записи по осям x и t , расстояния между каналами в поле до 200 м и максимально возможные размеры спектров, полученные в фокальной плоскости оптической системы.

Палетки для эталонирования спектров (рис. 7, а, б) построены для фиксированных значений D с использованием формул (2.3) и (2.4). Кривые зависимости $D = f(i)$ для четырех фиксированных положений линз оптической системы рассчитаны для 20-кратного уменьшения разреза, принятого на практике оптимальным, но зависимости, приведенные на рис. 8, позволяют перейти к значениям $D = f(i)$ при кратности уменьшения от 10 до 40.

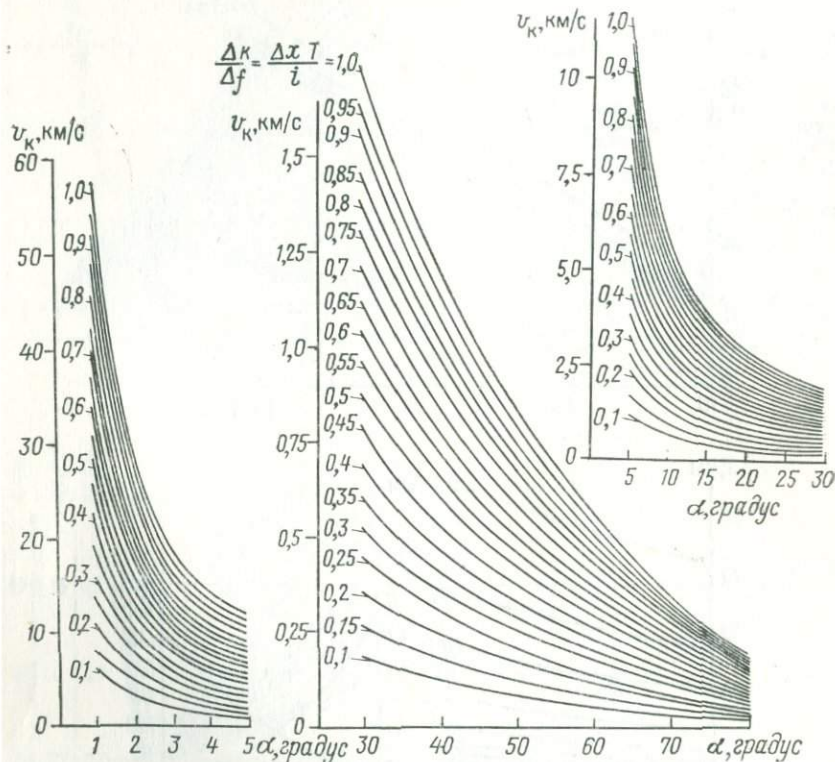


Рис. 9. Палетки для определения значений кажущихся скоростей при оптической фильтрации сейсмических разрезов

Так как размеры спектра обратно пропорциональны масштабам записи по осям x и t , то произведение Di , входящее в формулу (2.3), есть величина постоянная. Это позволило рассчитать палетку для непосредственного перевода миллиметров в герцы (см. рис. 7, в), когда масштаб воспроизведения составляет 45—300 мм в 1 с.

При расчете палеток (рис. 9) для определения кажущихся скоростей волн использовалась формула [57]

$$V_k = \frac{\Delta k}{\Delta f \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\Delta x T}{i \operatorname{tg} \alpha} \quad (2.6)$$

Палетка построена в разных масштабах для углов $\alpha = 1-5$; $5-30$; $30-80^\circ$ (рис. 9).

Методика пользования палетками заключается в следующем. По воспроизведениям, выполненным на преобразователе сейсмической записи, снимают значения i и T , а затем вычисляют их отношение i/T . По известному значению i определяют величину D при выбранном расстоянии между линзами (см. рис. 7). Зная отношение i/T и величину D , определяют значение Δf , а по известным Δx и D — значение Δk . Вычислив отношение $\Delta k/\Delta f = (\Delta x T/i)$ и зная угол положения заслонок, получают значения кажущихся скоростей вычитаемых волн (см. рис. 9).

Следует отметить, что параметр кривых $V_k = f(\alpha)$ не связан с параметрами двумерного спектра. Это позволяет использовать палетки не только при интерпретации результатов оптической фильтрации, но и перед обработкой для подготовки задания оператору по вычитанию волн с известными кажущимися скоростями.

Методика интерпретации результатов оптической фильтрации

В зависимости от сложности сейсмического материала и поставленных задач по каждому разрезу получают десять и более вариантов оптической фильтрации, так как параметры оптических фильтров, оптимальные для одной части сейсмического временного разреза, являются не оптимальными для других частей, и наоборот. Следовательно, об эффективности применения оптического фильтра можно судить только по конечному результату оптической фильтрации. При интерпретации результатов фильтрации возможны два способа, первый из которых заключается в том, что из результатов оптической обработки, напечатанных в масштабе оригинала, вырезают участки, в пределах которых разрешена волновая картина. По этим участкам собирают сводный разрез, по которому осуществляют корреляцию полезных волн (рис. 10). Этот способ применим в условиях относительно простой волновой картины и ограниченного количества стоящих перед фильтром задач. С увеличением сложности волновой картины количество сводных разрезов увеличивается. В связи с этим большее распространение нашел способ, при котором все результаты оптической фильтрации поочередно переносят на кальку, размеченную по осям t и x в масштабе исходного разреза. Полученный временной разрез анализируют по принятым в сейсморазведке правилам и он служит основой для построения глубинного разреза и карт.

На рис. 11 приведен результат оптической фильтрации сейсмограммы по непродольному профилю ВСП.

Оптическая фильтрация используется как часть рационального комплекса машинной обработки, зависящего от конкретных сейсмогеологических особенностей района исследований, его

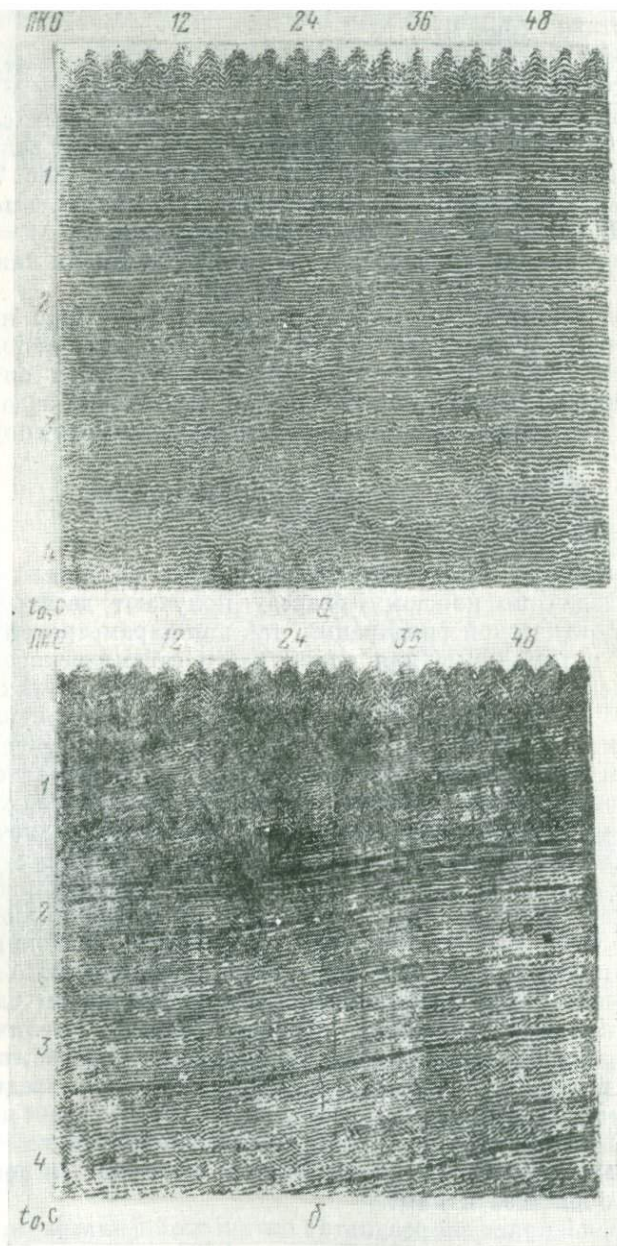


Рис. 10. Временные разрезы.

a — временной разрез МОВ, полученный способом переменной плотности; *b* — временной разрез после оптической фильтрации, направленной на снятие кратных волн с горизонтальными осями синфазности

изученности и качества получаемого материала. Поэтому комплексная обработка результатов дает возможность объективно оценить достоверность проведенных построений. В связи с этим критериями достоверности результатов оптической фильтрации служат следующие данные: визуальный контроль за качеством выделяемых волн, намечающихся на исходном разрезе, когда при отклонении фильтров в обе стороны от их оптимального положения

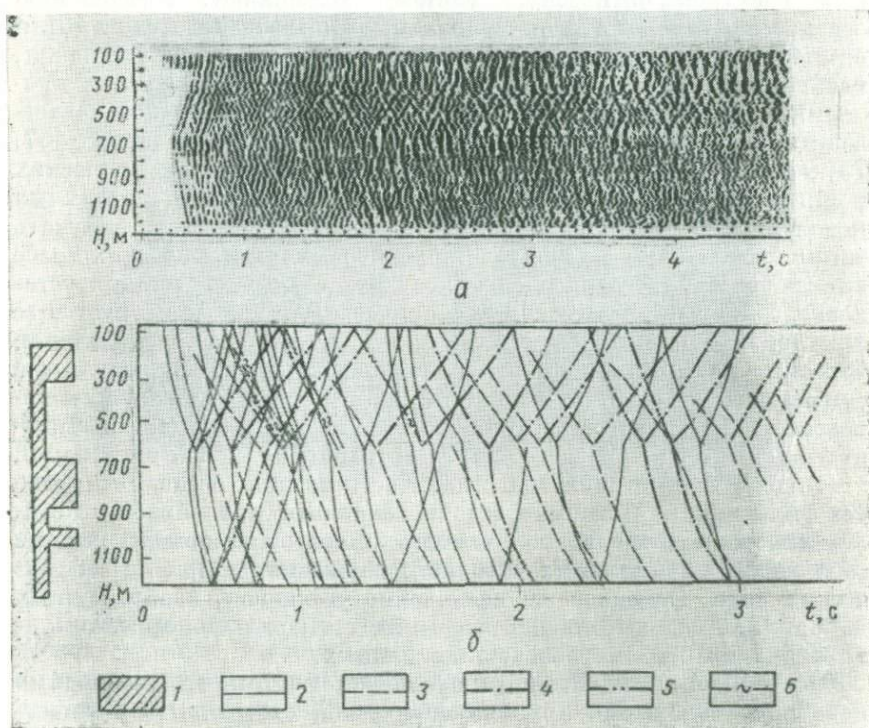


Рис. 11. Сейсмограмма по непродольному профилю ВСП, записанная способом переменной плотности (а), и результат оптической фильтрации сейсмограммы ВСП (б).

1 — график пластовых скоростей; 2 — продольные волны; 3 — проходящие волны PS; 4 — отраженные волны PS; 5 — поперечные волны; 6 — волны, отраженные от дневной поверхности

ухудшается динамическая выразительность волны и уменьшается протяженность ее оси синфазности; совпадение на сводном временном разрезе осей синфазности волн, намеченных на оригинале и затем выделенных в результате применения оптической фильтрации; совпадение осей синфазности волн, выделенных оптическим фильтром и другими способами машинной или ручной

обработки сейсморазведочных данных; соответствие данных контрольных наблюдений или данных вторичной обработки профиля результатам при первичной обработке.

Методика одномерной оптической фильтрации и выбор оптимальных параметров оптической системы

При проведении одномерной фильтрации для получения одномерных спектров оптическую систему усложняют: микрокопию освещают пучком плоскопараллельного когерентного света. Для осуществления одномерной фильтрации используются установки, изображенные на рис. 2, б, в, которые являются наиболее простыми, высокопроизводительными и позволяют получать качественные спектры. Результаты проведенных исследований [67, 75] показывают, что только установка, состоящая из сферических и цилиндрических линз, дает возможность избежать различных искажений в изображении преобразований Фурье и получать четкие одномерные спектры и коррелограммы сейсмических трасс или любого другого ряда сигналов. Принцип работы такой установки заключается в том, что сферическая линза формирует в ее фокальной плоскости спектр сейсмического разреза, а цилиндрическая — разворачивает спектр по горизонтали. В результате суммарного действия обеих линз формируется изображение потрассного спектра (рис. 12), а следовательно, возникает возможность осуществления частотной фильтрации по любой программе, т. е. одновременно всех трасс или части из них, оставляя другие без фильтрации. Подобные задачи возникают при обработке сейсмического материала, полученного в поле при повсеместном наблюдении оптимальных условий возбуждения и приема сейсмических волн. Основное же назначение установок, изображенных на рис. 2, б, в, состоит в проведении спектрально-корреляционного анализа сейсморазведочных данных.

Особенность этих установок заключается в том, что необходимо подобрать положения линз на оптической скамье. Это осуществляется по следующей методике (см. рис. 2, б).

1. Определяют фокусные расстояния сферических и цилиндрических линз.

2. Сферическую линзу 9 устанавливают на фокусном расстоянии от фокальной плоскости короткофокусного объектива 2. Если положение линзы 9 выбрано правильно, то на расстоянии 3—4 м за линзой пучок не должен расходиться.

3. Цилиндрическую линзу 10 ставят на фокусном расстоянии от микрокопии исходной информации 4. Линзу устанавливают так, чтобы в вертикальной плоскости она работала как пластина, а в горизонтальной плоскости как обычная линза. При правильном положении цилиндрической линзы размер пучка в вертикальной плоскости не должен изменяться на удалении до 3—4 м от линзы.

4. Сферическую линзу 5 помещают на расстоянии 4—5 см за цилиндрической линзой 10. При увеличении этого расстояния появляется опасность того, что лучи, прошедшие через цилиндрическую линзу, пройдут за апертурой сферической линзы, а это приведет к искажениям и потере качества изображения одномерного спектра.

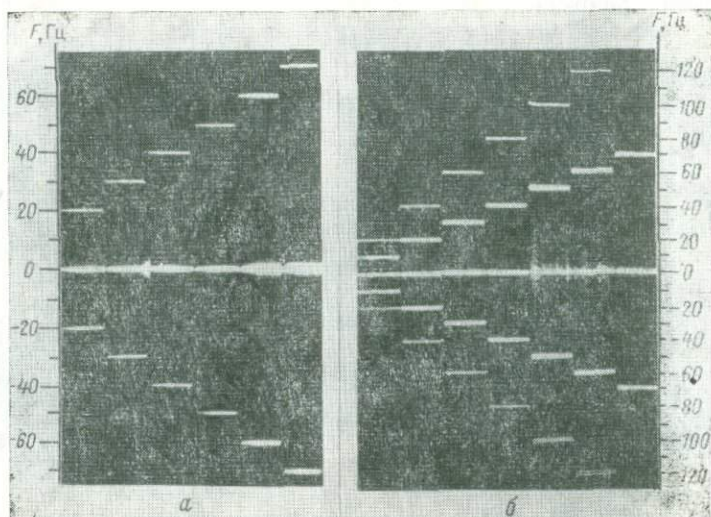


Рис. 12. Одномерные спектры преобразования Фурье для сигналов, воспроизведенных способами переменной плотности (а) и переменной площади (б)

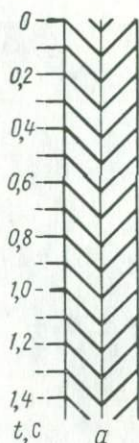
5. Осуществляют контроль правильности установки линз оптической системы. Это необходимо делать потому, что как бы точно не измерялись фокусные расстояния и размеры световых пучков, невозможно избежать незначительных ошибок. Кроме того, определенное действие оказывают стекла носителя микрокопии. Для осуществления контроля используют шкалу в виде «елочки», изображенную на рис. 13, а. Риски шкалы наносят через 0,1 с в масштабе воспроизведения сейсмических записей. Микрокопию такой шкалы помещают в носитель, заполненный декалином, и по виду получаемого в плоскости спектра η судят о правильности настройки оптической системы. При хорошо настроенной системе спектр изображается в виде горизонтальных линий, следующих через 10 Гц (рис. 13, б). Линии спектра правой половины шкалы являются продолжением линий спектра левой половины. При плохой настройке системы две половины спектра шкалы будут расходиться на какой-то угол и тем больший, чем хуже подобраны положения линз (рис. 13, в, г). В последнем случае, не смещая линз оптической системы, передвигают носитель вправо или влево

от его предыдущего положения до тех пор, пока две половины спектра не подойдут друг к другу, как показано на рис. 13, б.

Сейсмические материалы для получения многотрассового спектра и проведения одномерной фильтрации готовят так же, как и для двумерной фильтрации. При микрофильмировании к каждому монтажу подклеивают шкалу «елочку», которая используется для контроля правильности положения микрокопии в носителе разреза.

Рис. 13. Пример наладки оптических систем и контроля правильности размещения микрокопии.

а — шкала; б — спектр шкалы при хорошо отлаженной системе и вертикальном положении микрокопии; в, г — спектры шкалы при плохо отлаженной системе; д — спектр при наклоне шкалы в носителе микрокопии



Спектр каждой трассы можно получить только в том случае, если микрокопия стоит вертикально, т. е. трассы параллельны образующей цилиндрической линзы. При наклоне микрокопии возможны взаимные влияния между трассами. Контроль по виду спектра сейсмической записи не всегда эффективен, обычно ошибки выявляются после фотографирования и увеличения спектров.

Использование шкалы «елочки» дает возможность повысить качество одномерных спектров. В этом случае при вертикальном положении микрокопии две половины спектра сливаются в одну непрерывную линию (см. рис. 13, б). При наклоне микрокопии или носителя с микрокопией вправо и влево относительно направления распространения пучка света две половины спектра шкалы смещаются (рис. 13, д). Смещение возрастает с увеличением угла наклона.

Спектральный анализ сейсмических записей

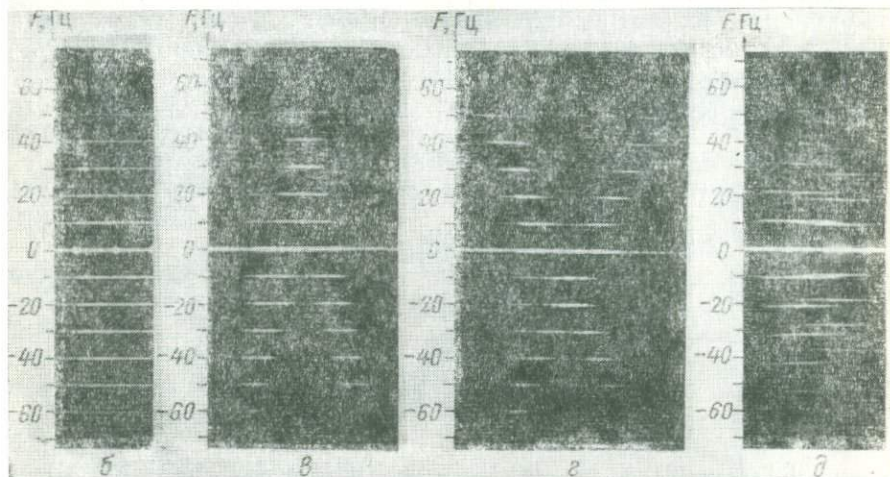
Возможность быстрого получения преобразования Фурье на лазерной установке позволяет решать ряд специальных задач спектрального анализа различными способами.

Способ получения мгновенного спектра. Выбор фильтрации при обработке материалов связан с определением спектра сигналов вдоль сейсмической трассы, т. е. фактически с получением мгно-

венных спектров, которые можно выразить соотношением [97]

$$S_{\Delta t}(\omega, t) = \int_{t-\Delta t}^t f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (2.7)$$

где t — текущее время сейсмической записи; Δt — интервал интегрирования.



Согласно (2.7) $S_{\Delta t}(\omega, t)$ — это спектр процесса длительностью Δt по времени, предшествующему моменту t . Следовательно, перемещая перед микрокопией сейсмической трассы щель или микрокопию перед неподвижной щелью, ширина которой соответствует интервалу интегрирования Δt , и регистрируя непрерывно изменяющуюся дифракционную картину, получим непрерывный спектр сейсмических колебаний в функции времени их регистрации. Любое сечение такого спектра, взятое на выбранном времени t , будет характеризовать мгновенный спектр отрезка трассы протяженностью Δt .

Для быстрого определения мгновенных спектров используют лазерную установку, снабженную устройством для синхронного перемещения микрокопии исходных данных и фотопленки на выходе [121]. Существенным недостатком способа является необходимость усложнения лазерных установок.

Проведенные исследования [55, 73] показали, что мгновенные спектры сейсмических трасс можно получить без излишнего усложнения конструкции лазерных установок. Анализ выполняют либо по схеме обычной двумерной оптической фильтрации, когда получают спектры по дискретным участкам трассы или сейсмического разреза [62], либо по схеме одномерной оптической

фильтрации [69]. Во втором случае анализ оказывается более эффективным, так как при этом имеется возможность, помимо непрерывных мгновенных спектров, получать непрерывные текущие спектры по отдельным трассам и целым сейсмическим разрезам. Для этого можно применять очень простые оптические системы, как это показано, например, в работе [55]. Однако из опыта экспериментальных исследований следует, что лучшие

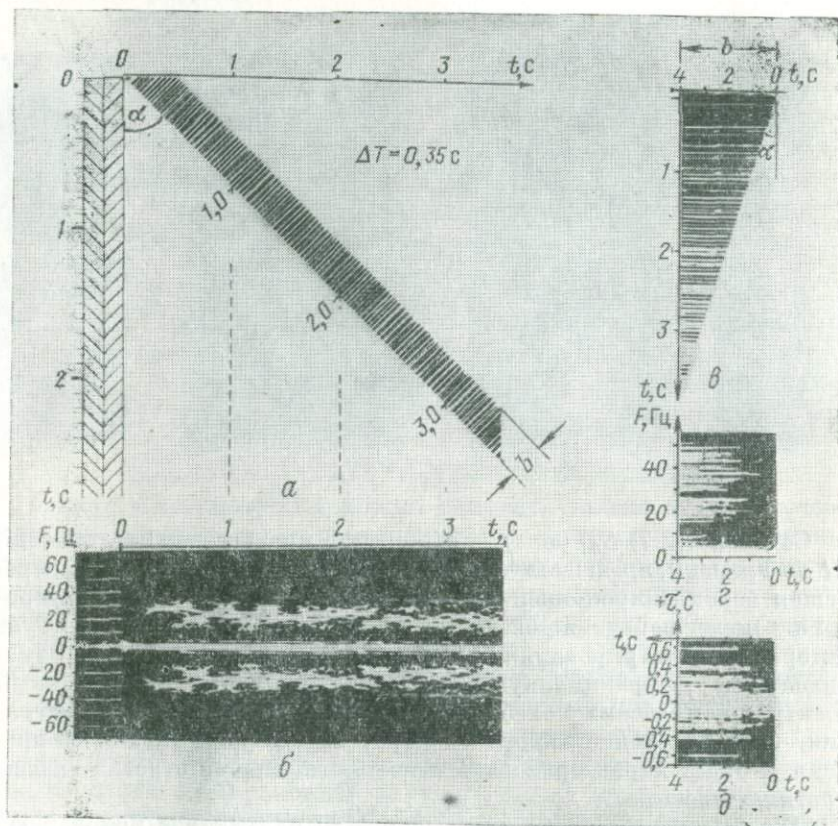


Рис. 14. Сейсмические (а, в), подготовленные для получения мгновенных (б) и текущих (в) спектров, а также текущей автокоррелограммы (г) оптическим способом

результаты получают при использовании лазерной установки, блок-схема которой приведена на рис. 2, б, в.

Если микрокопию сейсмической трассы, воспроизведенной способом переменной плотности, шириной b (рис. 14, а) поместить в носитель микрокопии лазерной установки (см. рис. 2, б)

под некоторым углом α к образующей цилиндрической линзы, то в плоскости преобразования Фурье получим мгновенный энергетический спектр трассы (рис. 14, б). Время t при этом будет связано линейно с координатой x . Изменяя угол α , можно делать интервал интегрирования Δt любой длительности, так как он связан с шириной трассы b и углом наклона трассы α соотношением $\Delta t = K (b/\sin \alpha)$, где K — коэффициент, зависящий от временного масштаба воспроизведения сейсмической трассы. При этом следует иметь в виду и изменение масштаба по оси частот. Приведенная частота f_1 связана с истинной частотой f и углом наклона трассы соотношением $f = f_1/\cos \alpha$. На практике удобно располагать микрокопию под углом $\alpha = 45^\circ$, так как интервал Δt становится равным ширине трассы и легко учитывается трансформация частот.

Методика получения мгновенных спектров с использованием установки, представленной на рис. 2, б, заключается в следующем.

1. Сейсмические трассы, выбранные для анализа, воспроизводят на преобразователе сейсмической записи способом переменной плотности на широкополосной фильтрации с АРУ столько раз, сколько необходимо для получения общей ширины трассы около 10 см. При этом желательна запись на фотопленку, так как она обладает большим диапазоном передачи полутонов.

2. Воспроизведенные трассы поочередно подклеивают на лист белой бумаги под углом 45° к шкале «елочка» (см. рис. 14, а) и микрофильмируют с уменьшением в 20—40 раз. Ширину трассы при этом оставляют равной выбранному интервалу Δt , а остальное закрывают плотной белой бумагой.

3. Микрокопии трасс поочередно помещают в носитель так, чтобы шкала «елочка» располагалась строго вертикально. Правильность размещения микрокопии в носителе контролируют по виду спектра шкалы.

4. В плоскости преобразования Фурье регистрируют мгновенный спектр сейсмической трассы (см. рис. 14, б). Поскольку при его фотографировании затемнение пленки связано с интенсивностью света, то зарегистрированный спектр выражает спектральную плотность энергии

$$\Phi_{\Delta t}(\omega, t) = \left[\int_{t-\Delta t}^t f(t) e^{-i\omega t} dt \right]^2 \quad (2.8)$$

и является спектром мощности, который можно выразить через корреляционную функцию трассы соотношением

$$\Phi_{\Delta t}(\omega, t) = \left[\int_{t-\Delta t}^t R_{\Delta t}(\tau, t) e^{-i\omega t} dt \right]^2, \quad (2.9)$$

т. е. при вторичном преобразовании Фурье спектра мощности на лазерной установке можно сформировать мгновенную автокорреляционную функцию исследуемой трассы, которая содержит информацию о характере изменения периодичности колебаний, попадающих в интервал интегрирования Δt .

Мгновенный спектр сейсмической трассы характеризует особенности изменения частотного состава сейсмических волн в зависимости от времени их регистрации. Последовательность таких

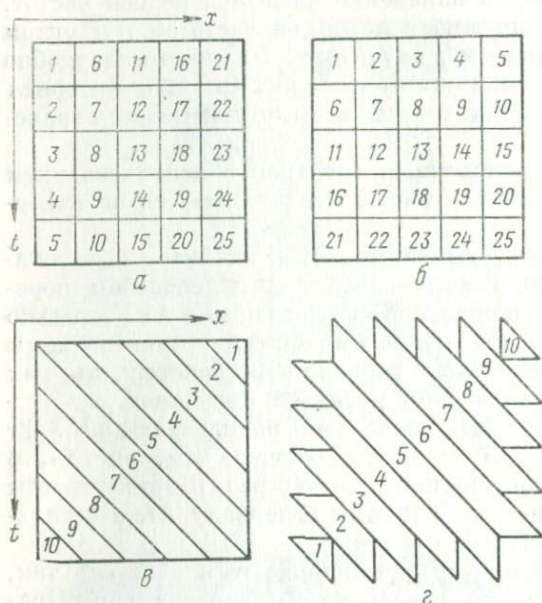


Рис. 15. Два способа трансформации временных сейсмических разрезов для получения мгновенных спектров.

$a, в$ — исходные данные, разрезанные на квадраты (a) и диагонали ($в$), и разрезы, собранные способами квадратов ($б$) и диагоналей ($з$) для анализа на лазерной установке

спектров, полученных вдоль сейсмических профилей или вдоль сейсмических годографов, дает возможность изучить закономерности изменения частотного состава сейсмических волн по площади в зависимости от времени их регистрации и удаления от пункта взрыва. Эта информация позволяет районировать территории по особенностям частотного состава волн, выбирать параметры фильтров для выделения волн определенного временного интервала и методику полевых работ.

Случайный характер выборки отдельных сейсмических трасс может иногда привести к невязкам данных по соседним трассам. В связи с этим анализ дополняют мгновенными спектрами по сейсмическим разрезам, состоящим из 20—30 сейсмограмм, что обеспечивает получение осредненного спектра для выбранного участка исследований и, следовательно, контроль данных анализа по отдельным трассам. Если монтаж воспроизведенных сейсмограмм разрезать и вновь собрать (рис. 15, $a, б$), то по вертикали друг под другом окажутся участки разреза, относящиеся к одному

отрезку времени Δt , а по горизонтали получим изменение времени регистрации t , которое в данном случае будет дискретным. Осуществляя на лазерной установке одномерное преобразование Фурье, получим картину изменения спектра сейсмических волн во времени. Однако следует иметь в виду, что вследствие периодичности расположения одинаковых временных интервалов друг под другом спектр может получиться изрезанным и нужно рассматривать лишь огибающую этого спектра. Дискретный характер изменения спектра можно ликвидировать, разрезая монтаж не по квадратам, а по диагоналям временного сейсмического разреза, как показано на рис. 15, *в*, *г*. В результате преобразования такого разреза получим непрерывный спектр сейсмических колебаний в зависимости от времени их регистрации.

Примеры сейсмических разрезов, подготовленных для оптического анализа изложенным способом, и соответствующие им спектры приведены на рис. 16. По обоим спектрам четко отмечается смещение активной полосы в область низких частот с увеличением времени регистрации колебаний.

Для спектрального анализа участков временного разреза сейсмические записи воспроизводят способом переменной плотности на широкополосной фильтрации с АРУ на фотоэмульсионной пленке типа ФТ-20-40. Из общих представлений о формировании спектров ясно, что чем мельче составные части переклеенного разреза, тем большая детальность спектра должна достигаться. Проведенные эксперименты и практика работ показывают, что монтаж достаточно разрезать на такие части, чтобы $t = 0,3$ с, а $\Delta x = 24$ трассам. Переклеенный с такими параметрами дискретизации разрез микрофильмируют и анализируют на лазерной установке (см. рис. 2, *б*). При изготовлении микрофильма к каждому монтажу, подготовленному для анализа, подклеивают временную шкалу «елочку» для последующего контроля правильности размещения микрокопии в носителе разреза лазерной установки.

Способ получения текущего спектра. При изучении спектра сейсмических колебаний интегрирование производят от начального времени t_0 до текущего времени t , т. е. в процессе исследования особенностей формирования спектра сейсмической трассы рассматривают текущие спектры, которые в соответствии с работой [97] определяются выражением

$$S_t'(\omega) = \int_0^t f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2.10)$$

Спектры являются функцией не только частоты, но и времени. Способ их получения на лазерной установке заключается в следующем: запись одной сейсмической трассы воспроизводят на широкополосной фильтрации с АРУ способом переменной плотности сколько раз, чтобы получить общую ширину трассы b , равную приблизительно 20 см. Воспроизведенную трассу

разрезают по диагонали (см. рис. 14, *в*) и одну из половин микрофильмируют с уменьшением в 20—40 раз; микрофильм помещают в носитель разреза установки (см. рис. 2, *б*) для получения одномерных спектров и в фокальной плоскости оптической системы регистрируют текущий спектр (см. рис. 14, *г*).

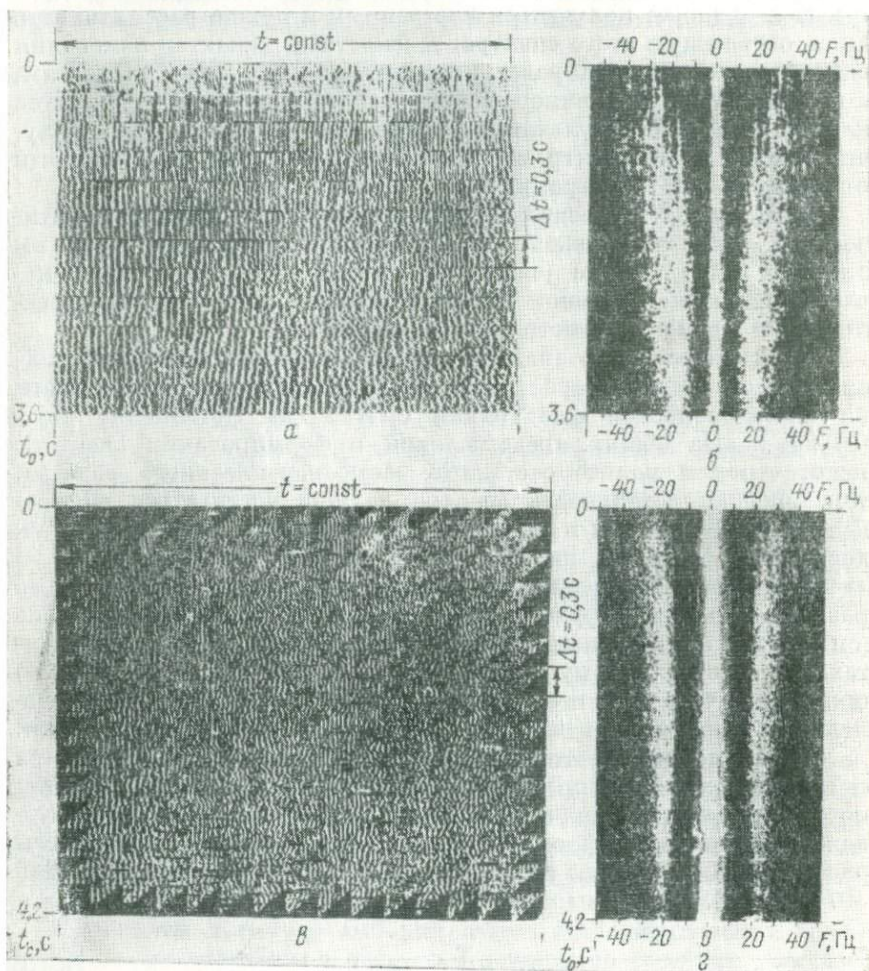


Рис. 16. Разрезы, подготовленные для анализа способом квадратов (*а*) и диагоналей (*б*) при $\Delta t = 0,3 \text{ с}$, $\Delta x = 24$ трассы, и спектры в функции времени регистрации сейсмических волн (*в*, *г*)

Текущее время связано с шириной записи трассы b и углом ее среза α соотношением $t = b/\text{tg } \alpha$. Скорость развертки текущего спектра по оси b зависит от интервала времени, для которого

получают текущий спектр, ширины трассы и величины угла ее среза. Выбор этих параметров определяется практическими соображениями и зависит от задач анализа. Сфотографированный спектр выражает спектральную плотность энергии

$$\Phi_t(\omega) = \left[\int_0^t f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right]^2 \quad (2.11)$$

и является спектром мощности, который можно выразить через корреляционную функцию исследуемой трассы соотношением

$$\Phi_t(\omega) = \left[\int_0^t R_t(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right]^2. \quad (2.12)$$

Возможность быстрого получения на лазерной установке текущих автокоррелограмм путем преобразования Фурье спектров мощности имеет для практики сейсморазведки важное значение, так как по ним, например, можно определить время, начиная с которого регистрируются кратные волны [24]. Пример текущей автокоррелограммы (см. рис. 14, *д*) показывает, что появление и пропадание вторичных корреляционных максимумов отмечается на разных временах и связано с разнотипными кратными волнами, которые в районе исследований (Московская синеклиза) регистрируются на всем интервале записи.

Интерпретация текущих автокоррелограмм совместно с автокоррелограммами записей, выполненных на горизонтальных и вертикальных сейсмических профилях, дает возможность с большой достоверностью определять кинематические характеристики кратных волн.

Если спектральный анализ сейсмических материалов осуществляется по схеме двумерного преобразования Фурье (см. рис. 2, *а*), то при этом получают и фотографируют спектры, соответствующие временным интервалам сейсмического разреза, которые обычно выбирают равными 0,2—0,5 с. Так как двумерный спектр симметричен относительно центрального пятна, то можно рассматривать верхнюю либо нижнюю часть от оси волновых чисел, или левую и правую части по отношению к оси частот. Для качественных оценок спектра удобнее брать части, симметричные оси частот, а для количественных оценок используются части, относительноные оси волновых чисел.

В первом случае по полученным фотоснимкам составляют спектр, изменяющийся во времени [62]. Во втором случае спектр разворачивают при помощи фотометрической установки по времени с охватом определенной полосы частот (рис. 17, *а*), по частоте для выбранного временного интервала (рис. 17, *б*) или в полосе квазипостоянного волнового числа (рис. 17, *в*). Аналогичные количественные оценки можно получить, используя фотоэлектрическую регистрацию одномерных спектров.

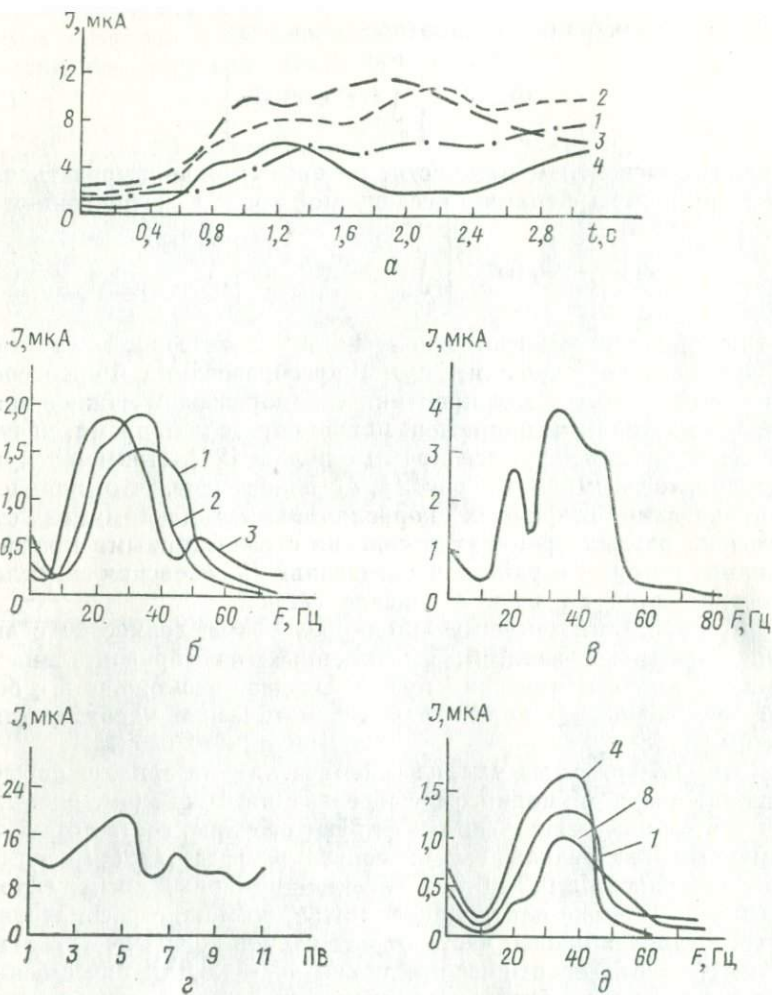


Рис. 17. Пример количественного анализа двумерного спектра, изменяющегося во времени.

a — графики изменения интенсивности составляющих спектра в зависимости от времени регистрации сейсмических волн. 1, 2, 3, 4 — кривые, соответствующие полосам частот спектра 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 Гц; *б* — амплитудные спектры сейсмических волн, соответствующие разным временным интервалам: 1—0,6—0,8 с, 2—1,6—1,8 с, 3—2,6—2,8 с; *в* — амплитудный спектр в полосе квазипостоянного волнового числа ($k = 24-32 \text{ км}^{-1}$); *г* — график изменения интенсивности активной полосы спектра (20—40 Гц); *д* — амплитудные спектры сейсмических волн, соответствующие разным пунктам взрыва; *J* — интенсивность светового потока

Корреляционный анализ сейсморазведочных данных

Способы получения корреляционных функций при помощи оптических устройств, основанные на выполнении стандартных операций корреляционного анализа, малопроизводительны и требуют применения сравнительно сложных лазерных установок. Более простым и производительным представляется способ преобразования одномерного спектра в коррелограмму на основе математической связи корреляционной функции и спектра мощности через преобразования Фурье [67].

Практически преобразования могут быть выполнены при помощи простой лазерной установки, включающей устройство для помещения микрокопии сейсмических записей (носитель разреза), воспроизведенных способами переменной плотности или переменной площади, две сферические и одну цилиндрическую линзу.

К настоящему времени разработана и внедрена в производство методика получения на лазерных установках функций автокорреляции, взаимной корреляции и ретрокорреляции, двумерных корреляционных функций.

Функции автокорреляции

Методика получения автокоррелограмм заключается в следующем. На первом этапе в носитель разреза (см. рис. 2, б) помещают микрокопию сейсмического разреза, содержащую 200—400 трасс. Освещают микрокопию пучком когерентного плоскопараллельного света и в фокальной плоскости оптической системы фотографируют одномерный спектр сейсмических сигналов, соответствующих исходным трассам. На втором этапе зарегистрированный спектр печатают контактным способом на фотопленку, контактный отпечаток помещают в носитель разреза лазерной установки и в фокальной плоскости оптической системы регистрируют результат вторичного преобразования одномерного спектра, т. е. коррелограмму исследуемых трасс.

Изложенная методика привлекает своей простотой, но при ее использовании предъявляются высокие требования к выбору типа фотоматериалов, времени их экспозиции и качеству (тщательности) фотолабораторной обработки. Результаты исследований [70] показывают, что получение качественных коррелограмм возможно при фотографировании спектров на пленки с наивысшим динамическим диапазоном, но обладающих достаточной зернистостью. Наиболее подходящими для этого оказались фотопленки с чувствительностью более 65 единиц (типа «Фото-65», «Фото-250»), которые имеют динамический диапазон передачи сейсмических сигналов в когерентном свете 40—45 дБ, если воспроизведение записи выполнено в полутонах способом переменной плотности на фотопленку ФТ-20, ФТ-30. Время экспозиции

при фотографировании одномерных спектров выбирается в пределах прямолинейного участка характеристик фотоплёнок [70]. При контактной печати рекомендуется применять техническую фотоплёнку ФТ-30, ФТ-31. Эта плёнка в достаточной степени контрастна (что позволяет снять фон при печати), обладает хорошей разрешающей способностью (около 100 линий на 1 мм), обрабатывается при красном свете. Время экспозиции выбирается

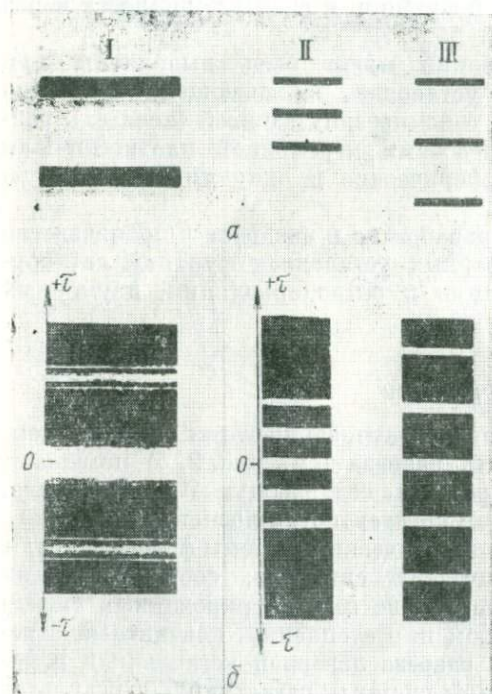


Рис. 18. Тесты (а) и коррелограммы (б), полученные на лазерной установке.

I—III — различные примеры оптического корреляционного анализа сигналов

таким, чтобы на черном поле получить белое (без вуали) изображение спектра.

При нарушении изложенной технологии фотографирования в неблагоприятных условиях оказываются низкие частоты спектра, располагающиеся близко к центральному пятну спектра. Вследствие перегрузки фотослоя часть информации при фотографировании, фотообработке и последующей контактной печати теряется. Это приводит к искажениям коррелограммы, проявляющимся в виде контуров корреляционных максимумов (рис. 18, I, б). Для уменьшения контуров и улучшения качества коррелограмм можно использовать два приема [70]. Первый заключается в том, что микрокопия закрывается со стороны лазерной установки заслонкой, дифрагирующей когерентный свет по разным

направлениям (шлифованное стекло). За счет этого одномерный спектр сейсмических трасс получается более равномерным по плоскости, что позволяет регистрировать весь его диапазон частот без перегрузок фотослоя, а следовательно, получать коррелограмму без искажений корреляционных максимумов. Второй прием состоит в наложении на микрокопию густой нейлоновой сетки, в результате чего осуществляется двумерная модуляция, удаляющая низкие частоты от центрального максимума. Второй прием оказался менее удачным, так как на изображенные коррелограммы накладывается изображение сетки, которое мешает интерпретации коррелограмм. Первый прием нашел большее применение, поскольку выяснилось, что фотопленки с чувствительностью 65 единиц и более имеют зернистость, достаточную для рассеивания снятых на них изображений исследуемых объектов.

В связи с этим при микрофильмировании исходной информации рекомендуется использовать кинопленку КН-3, которая имеет больший диапазон передачи полутонов, чем техническая пленка типа «Микрат», применяющаяся обычно для изготовления уменьшенных изображений сейсмических разрезов при двумерной оптической фильтрации. Соблюдение изложенного технологического процесса с учетом характеристик фотоматериалов [70] позволило получать качественные коррелограммы (рис. 18, II, III).

Изучение зависимости вида коррелограмм от способов воспроизведения сейсмических записей позволило отметить следующее [70]. Нелинейная зависимость потемнения фотопленки от амплитуды сейсмических сигналов при их воспроизведении способом переменной площади (только черные и белые области) приводит к искажениям одномерных спектров. За счет этого образуются максимумы спектра более высоких порядков, кратные основной частоте сигнала (см. рис. 12, б). Вторичные максимумы создают в последующем фон коррелограммы, затрудняя ее интерпретацию. При воспроизведении сигналов способом переменной плотности потемнение фотопленки линейно зависит от амплитуды сейсмических сигналов, в связи с чем на одномерных спектрах максимумы высших порядков не отмечаются (см. рис. 12, а).

Вид коррелограмм и их информационная емкость зависят от особенностей воспроизведения сейсмических записей. Корреляционные функции рекомендуется получать по записям, воспроизведенным на открытом канале или по возможности более широкой фильтрации. При оптическом способе влияние фильтрации проявляется следующим образом. Чем уже полоса фильтров воспроизводящей аппаратуры, тем шире дискретные максимумы одномерного спектра. Вследствие этого максимумы перекрываются, образуя сплошные неразрешенные области спектра. Автокоррелограмма по таким материалам практически не получается, так как других максимумов, кроме центрального и незначительно удаленных от него, не формируется.

Функции взаимной корреляции

$$R_n(\tau) = \int_0^{\infty} f_1(t) f_2(t-\tau) dt \quad (2.13)$$

и ретрокорреляции (автосвертки)

$$R_p(\tau) = \int_0^{\infty} f(t) f(\tau-t) dt \quad (2.14)$$

формируются как боковые ветви функции автокорреляции сложного монтажа, в котором друг под другом расположены коррелируемые участки сейсмического временного разреза. Поясним это на примере. Пусть нам даны две сейсмические трассы $f_1(t)$ и $f_2(t)$, определенные в интервале от t_1 до t_2 . Сдвинем трассу $f_2(t)$ относительно трассы $f_1(t)$ на величину $\Delta t = t_2 - t_1 + \delta t$ так, чтобы $f_2(t') = f_2(t + t_2 - t_1 + \delta t)$, и сложим ее с трассой $f_1(t)$. В результате получим функцию $f(t)$, являющуюся суммой функций $f_1(t)$ и $f_2(t')$ (рис. 19).

Нетрудно показать, что функция автокорреляции трассы $f(t)$ будет состоять из двух частей, из которых первая при $|\tau| < t_2 - t_1$ представляет сумму функций автокорреляции $f_1(t)$ и $f_2(t)$, а вторая при $|\tau| > t_2 - t_1$ соответствует функции взаимной корреляции $f_1(t)$ и $f_2(t)$. Начало отсчета ($\tau_{\text{ФВК}} = 0$) функции взаимной корреляции (ФВК) будет соответствовать величине $\tau = t_2 - t_1 + \delta t$ функции автокорреляции.

Рассмотрим способ получения коррелограмм оптическим способом. На исследуемом участке сейсмического разреза выбирают временной интервал $t_1 - t_2$ и изготавливают два контактных отпечатка, которые при микрофильмировании помещают друг под другом, как показано на рис. 20. При этом разрезы смещают по горизонтали на одну-две трассы или любое другое количество в зависимости от того, какие пары трасс выбраны для анализа.

Последующие операции на лазерной установке соответствуют операциям при получении автокоррелограмм, однако необходимо учитывать влияние протяженности исследуемого отрезка, масштаб оригинала, величину δt , установку оригинала в носителе разреза, усиление краевой части автокоррелограммы.

Влияние протяженности исследуемого отрезка. При увеличении интервала между одноименными участками коррелируемых трасс расстояние между дискретными максимумами спектра уменьшается. В связи с этим при подготовке сейсморазведочных данных для корреляционного анализа оптическим способом необходимо выбрать такие масштабы оригиналов сейсмических трасс, чтобы расстояние между дискретными максимумами спектра было в пределах разрешающей способности фотоматериалов и линз.

Зная разрешающую способность фотопленки, наиболее подходящую по своим качествам для регистрации спектра («Фото-32», «Фото-65»), выражаемую в количестве линий n на 1 мм ($n \approx 50$), нетрудно определить максимально допустимые размеры анализируемой микрокопии (оригиналов). Максимально возможное расстояние между соседними максимумами дискретного спектра ($l = 1/n$) для применяемых фотопленок составляет 0,02 мм. Известно, что расстояние между дискретными максимумами спектра

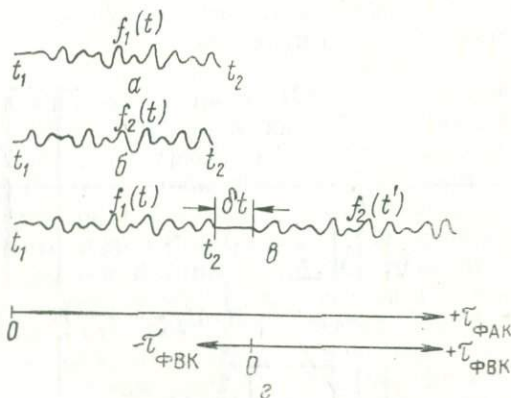


Рис. 19. Пояснения к теории получения функции взаимной корреляции и ретрокорреляции сейсмических трасс оптическим способом.

$a, б$ — участки трасс, выбранные для корреляционного анализа; a — размещение участков трасс для корреляционного анализа; z — наложение функций взаимной корреляции и автокорреляций

связано с расстоянием между периодическими сигналами обратным соотношением, т. е. $L = K/l$, где L — расстояние между периодическими сигналами на отрезке оригинала; K — коэффициент трансформации, связанный с особенностями оптической системы, имеющий размерность мм². Для системы, изображенной на рис. 2, б, коэффициент $K = 0,23$ мм².

Следовательно, максимально допустимое расстояние между началом отрезка трассы $f_1(t)$ и началом отрезка трассы $f_2(t')$ составляет 11,5 мм на микрокопии.

Масштаб оригинала. Указанное выше ограничение могло бы быть преодолено микрофильмированием объекта с большим коэффициентом уменьшения. Однако сильное уменьшение разреза ведет к потере высоких частот вследствие ограничения разрешающей способности фотоматериалов и линз. В соответствии с теоремой Котельникова для получения на спектре разрешенной картины со стороны высоких частот необходимо иметь на микрокопии разреза разрешение не ниже $\Delta t = \pi/\omega_{гр}$, где $\omega_{гр}$ — верхняя граничная частота спектра. Примем верхнюю границу спектра сейсмического диапазона за 120 Гц (для высокочастотной сейсмике эту цифру следует соответственно увеличить). Тогда $\Delta t = \pi/\omega_{гр} = \pi/(2\pi \cdot 120) = 1/240 \approx 0,004$ с. Зная суммарную разрешающую способность ($n \approx 50$ линий на 1 мм) фотоматериалов и линз, применяемых для микрофильмирования, легко определить предельно допустимый масштаб оригинала. Таким образом, $\Delta t = 4$ мс должно соответствовать $1/n$ мм или 1 см,

на микрокопии разреза должен соответствовать не более чем 2 с протяженности сейсмической трассы. В противном случае высокочастотные составляющие сейсмической трассы будут подавлены, что приведет к искажению как одномерного спектра, так и корреляционной функции.

Выбор величины δt . Так как функция взаимной корреляции или ретрокорреляции является краевой частью функции автокорреляции составной трассы $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$, то необхо-

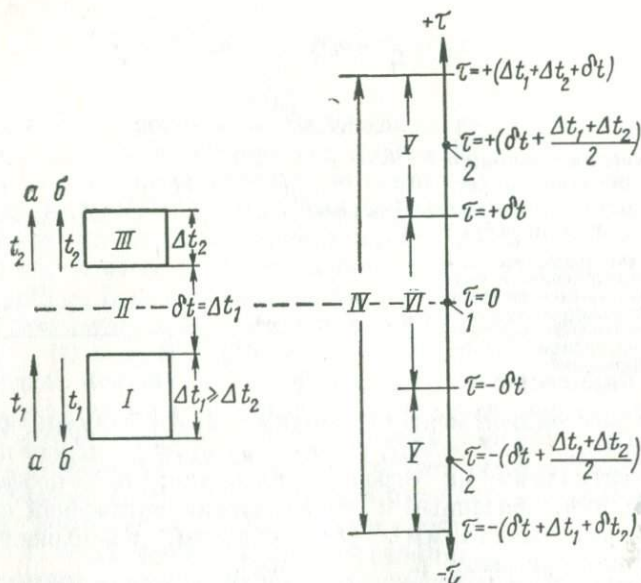


Рис. 20. Получение функций взаимной корреляции и ретрокорреляции оптическим способом.

I — более протяженный из коррелируемых разрезов; *II* — временной интервал; *III* — менее протяженный из коррелируемых разрезов; *IV* — автокоррелограмма сложного монтажа в целом; *V* — область функции взаимной корреляции (*a*) или ретрокорреляции (*b*); *VI* — область наложения функции автокорреляции разреза *I* и функции автокорреляции разреза *III*; *1* — начало отсчета временного сдвига для функций автокорреляции; *2* — начало отсчета временного сдвига для функций взаимной корреляции и ретрокорреляции

димо избегать перекрытия участков коррелограммы, соответствующих сумме функций автокорреляции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ (интервал $|\tau| < t_2 - t_1$) и функции взаимной корреляции. Надежное выделение функций взаимной корреляции и ретрокорреляции в чистом виде достигается при $\delta t \geq t_2 - t_1$. Однако это требование ухудшает возможности соблюдения условия, требующего максимального сокращения величины δt . При наличии хорошей коррелируемости начала и конца функции $f_1(t)$ или $f_2(t)$, которая возникает, например, из-за присутствия импульсов кратных отраженных волн, уменьшение δt ниже величины $t_2 - t_1$ недопустимо вследствие неизбежности искажения функции взаимной корреляции

и ретрокорреляции в результате наложения на нее максимумов функции автокорреляции отрезка $f_1(t)$ или $f_2(t)$. Однако, если последние максимумы суммы автокорреляционных функций отрезков $f_1(t)$ или $f_2(t)$ располагаются на значениях $|\tau|$, существенно меньших $t_2 - t_1$, величину δt можно сократить.

Таким образом, перед получением функции взаимной корреляции или ретрокорреляции полезно изучить поведение автокоррелограмм отрезков $f_1(t)$ и $f_2(t)$ раздельно и определить положение $|\tau_{\max}|$ наиболее удаленного из побочных максимумов автокорреляционных функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$. При составлении монтажа $[f(t) = f_1(t) + f_2(t + t_2 + t_1 + \delta t)]$ необходимо выполнение условия $\delta t > |\tau_{\max}|$.

Установка оригинала в носителе разреза. При двойном преобразовании Фурье в качестве оригинала выступают вначале микрокопия монтажа сейсмических трасс, а затем одномерный спектр этого монтажа. Для того чтобы избежать корреляции между несравнимаемыми участками оригинала, необходимо, чтобы края трасс или ось частот одномерного спектра были параллельны образующей цилиндрической линзы. При этом, как показывают расчеты, приходится добиваться очень высокой точности установки микрокопий разрезов и одномерных спектров. Предположим, что мы анализируем две трассы, каждая из которых имеет ширину 2 мм, длину около 1 с при масштабе записи 100 мм/с.

Общая длина трасс, расположенных одна под другой, составляет 2 с (рис. 21, ж). Тогда угол допустимого отклонения φ от оптимального положения, при котором корреляция происходит в пределах прямоугольника, образованного двумя выбранными трассами, составит $\pm \arctg \frac{2}{200} \approx \pm 30'$.

Для визуального контроля правильности установки микрокопии предлагается использовать специальную шкалу, которая при микрофильмировании подклеивается к оригиналу (рис. 21, а). При правильном (вертикальном) положении микрокопии спектр левой и правой половин шкалы, изображенной на рис. 21, а, будет одинаковым (рис. 21, б). При наклоне микрокопии каждая из половин шкалы дает спектр, различный по частоте (рис. 21, в). Точность контроля с помощью такой шкалы может быть определена из рис. 21, з, где AC — период шкалы по вертикали; AB и $AD = A'D'$ — периоды левой и правой половин шкалы в случае наклона ее на угол φ ; AE — перпендикуляр к BE . Отсюда

$$AC = \frac{AE}{\cos \alpha}, \quad AD = \frac{AE}{\cos(\alpha - \varphi)},$$

$$AB = \frac{AE}{\cos(\alpha + \varphi)}, \quad \frac{AD}{AB} = \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos(\alpha - \varphi)} = m.$$

При постоянном значении угла φ величина m тем меньше, чем больше α . Например, при $\alpha = 70^\circ$ и $\varphi = 30'$ $m \approx 0,95$. Это

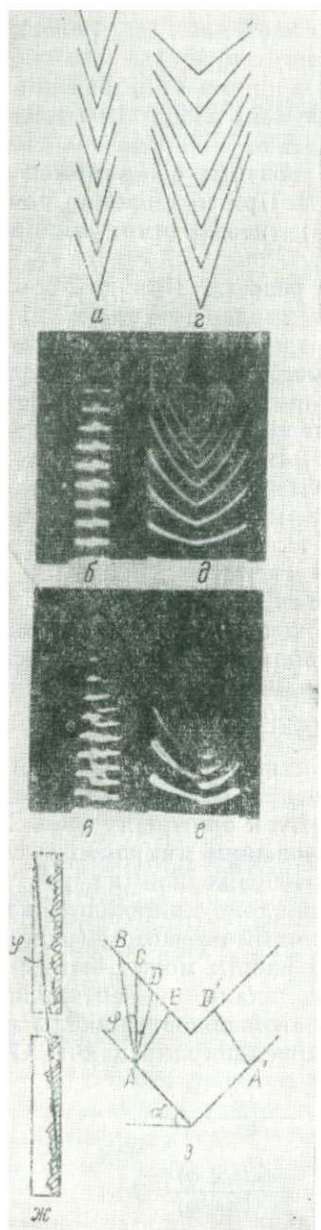


Рис. 21. О точности установки микрокопии в носителе разреза:

a, z — шкалы, позволяющие контролировать правильность установки микрокопии анализируемых трасс в носителе разреза; *б, в* — спектры шкал при правильном (вертикальном) положении микрокопии; *г, д* — спектры шкал при неправильном (наклонном) положении микрокопии; *ж, з* — пояснения к оценке допустимого угла наклона микрокопии

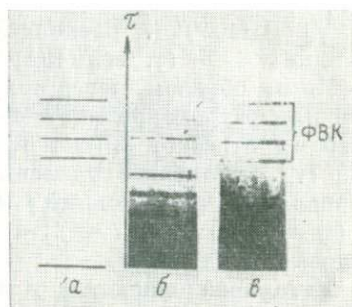


Рис. 22. Функция взаимной корреляции при различном отношении амплитуд основного и опорного сигнала.

a — исходный тест; *б* — $n = 1 : 1$; *в* — $n = 1 : 4$

означает, что в случае наклона микрокопии на $30'$ на каждые 20 линий спектра одной половины решетки придется 19 линий другой половины (рис. 21, в).

Картина, представляющая собой одномерный спектр рассмотренной шкалы, не может быть использована для контроля точности установки микрокопии при вторичном преобразовании Фурье, т. е. при получении коррелограммы. С этой целью удобнее пользоваться шкалой «елочка» с переменным по горизонтали периодом (рис. 21, з). Одномерный спектр этой шкалы в случае вертикального расположения микрокопии изображен на рис. 21, д и в случае наклона микрокопии — на рис. 21, е. Наличие наклона приводит к смещению и расплывчатости линий спектра.

Для вторичного преобразования Фурье одну из симметричных относительно нулевой линии половин этого спектра необходимо исключить и после преобразования получим картину, идентичную первоначальной.

Усиление краевой части автокоррелограммы. Поскольку функция взаимной корреляции (ФВК) соответствует краевой части автокорреляционной функции составного монтажа, последняя должна иметь достаточную длину. Однако получение значений автокорреляционной функции на больших τ представляет значительные трудности по следующей причине. Высокие пространственные частоты спектра мощности сигнала оказываются существенно слабее низких и, вследствие ограниченности динамического диапазона фотопленки, срезаются при фотообработке всюду, где низкие частоты наложены на высокие. Это следует из рассмотрения спектра мощности. Если любую функцию $f(t)$ представить как сумму некоторого числа импульсов $f_i(t)$, сдвинутых во времени, то спектр мощности такой функции выразится формулой

$$\begin{aligned} |S(\omega)|^2 = & |S_1(\omega)|^2 + |S_2(\omega)|^2 + \dots + \\ & + |S_n(\omega)|^2 + S_1(\omega)S_2^*(\omega) + S_1(\omega)S_3^*(\omega) + \\ & + S_1^*(\omega)S_2(\omega) + \dots + S_{n-1}(\omega)S_n^*(\omega) + S_{n-1}(\omega)S_n(\omega), \end{aligned} \quad (2.15)$$

где S^* — спектр комплексно-сопряженной функции.

Число парных произведений с небольшой разностью индексов, соответствующих близко расположенным импульсам или низким пространственным частотам, всегда превышает количество парных произведений с большой разностью индексов, причем различие увеличивается при увеличении числа импульсов n . Поэтому при условии примерного равенства формы и амплитуды сигналов в спектре мощности (2.15) преобладают низкие пространственные частоты.

Для усиления высоких пространственных частот спектра мощности нужно подчеркнуть парные произведения спектров, соответствующие наиболее удаленным импульсам. Это можно сделать, увеличивая амплитуды импульсов, расположенных на концах функции.

Для функции взаимной корреляции относительно длинного участка трассы с коротким импульсом необходимо увеличить амплитуду короткого импульса или уменьшить интенсивность длинного участка трассы, что более удобно при оптической обработке. Для уменьшения интенсивности импульсов использованы полупрозрачные заслонки. Необходимая степень ослабления импульсов определяется многими факторами: отношением длительности сигналов, сходством формы, числом импульсов на трассе и т. д. Однако можно придерживаться довольно простого правила: составляющие спектра более короткого сигнала должны быть равны или несколько больше аналогичных составляющих спектра длинного сигнала [9]. По-видимому, на практике достаточно сравнить интенсивности спектров мощности в целом или, что то же самое, интенсивности импульсов, что довольно просто сделать с помощью фотоэлемента.

На рис. 22, а изображен тест в виде четырех коротких импульсов и одного опорного такой же формы, отстоящего от них на некотором расстоянии. Автокорреляционная функция с выделенной частью, соответствующей функции взаимной корреляции, показана на рис. 22, б, в.

Соотношение амплитуд основных и опорного импульсов менялось от 1 : 1 до 1 : 4. Хорошо видно, как происходит увеличение интенсивности максимумов ФВК по отношению к максимумам автокорреляционной функции.

Двумерные корреляционные функции

Двумерная корреляционная функция сейсмического временного разреза может быть получена путем двумерного преобразования Фурье двумерного спектра сейсмической записи на лазерной установке (см. рис. 2, а или 2, в). Математически данную операцию можно описать формулой

$$R(\xi, \tau) = C_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi(k, F)|^2 e^{i(k\xi + F\tau)} d\xi d\tau, \quad (2.16)$$

где

$$\Phi(k, F) = C_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) e^{-i(kx + Ft)} dx dt$$

— двумерный спектр сейсмического разреза $f(x, t)$; C_1 и C_2 — константы.

На рис. 23 приведена двумерная корреляционная функция по данным вертикального сейсмического профилирования скв. 3 Даниловской площади Московской синеклизы. Сопоставление временного разреза по вертикальному профилю, его двумерного спектра и двумерной корреляционной функции разреза позволяет определить некоторые свойства последней. По аналогии с функ-

цией взаимной корреляции и автокорреляции можно утверждать, что главный максимум двумерной корреляционной функции, выражающийся в виде интенсивного центрального пятна, содержит информацию о всем разрезе. Побочные максимумы имеют вид лучей, выходящих из главного максимума; направления лучей совпадают с направлением осей синфазности, выделяющихся на временном разрезе. Таким образом, периферийная часть

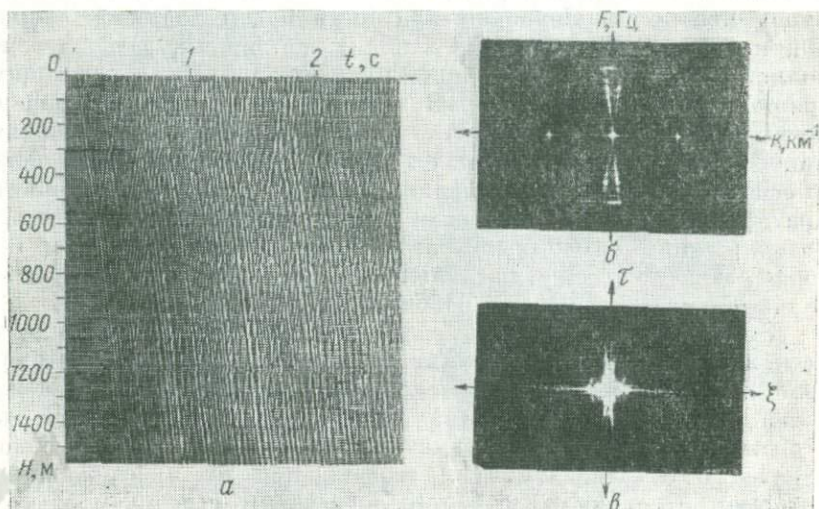


Рис. 23. Сейсмограмма ВСП (а), двумерный спектр (б) и двумерная корреляционная функция (в)

двумерной корреляционной функции содержит информацию о коррелирующихся на разрезе импульсах, при этом волны распределяются по кажущимся скоростям.

Помехоустойчивость коррелограмм, получаемых оптическим способом

Так как корреляционные функции характеризуют степень подобия процессов, то, применяя корреляционный анализ к сейсмическим записям, определяют подобие записей во времени, в соседних точках наблюдений или пространственно-временное подобие. В настоящее время основная информация о процессах извлекается из экстремумов корреляционных функций, в связи с чем представляется важным исследовать помехи, возникающие при получении коррелограмм на лазерных установках, т. е. оценить помехоустойчивость и надежность выделения экстремумов по корреляционным функциям.

Необходимость выполнения этих исследований определяется тем, что объемы корреляционного анализа на лазерных установках быстро увеличиваются в связи с возможностью одновременно анализировать качественно и количественно несколько сотен сейсмических трасс [47, 51, 64, 68, 71]. На автокоррелограмме выделяют главный и побочные максимумы, которые формируются при наличии периодичности импульсов сейсмической записи, обусловленной наличием кратнобразующих границ, и располагаются на временных (пространственных) сдвигах τ , равных периоду кратности. Периодом кратности будем называть временной интервал повторяемости записи, т. е. время, затрачиваемое волной на двойной (вверх и вниз) путь между кратнобразующими границами, одной из которых может служить дневная поверхность. Возможность выделять по автокоррелограмме побочные максимумы, а следовательно, определять период кратности лежит в основе методики определения кинематических характеристик кратных волн [60, 71]. В связи с этим качество и эффективность интерпретации автокоррелограмм, полученных оптическим способом, зависит от того, насколько надежно регистрируются и выделяются на общем фоне побочные максимумы.

Для исследования этого вопроса сейсмический материал по нескольким профилям обработан на ЭВМ и на лазерной установке (рис. 24, 25). Приведенные автокоррелограммы очень схожи между собой. На автокоррелограммах, полученных как на ЭВМ, так и оптическим способом, выделяются одни и те же побочные максимумы с сохранением всех особенностей их прослеживания, которые определяются сейсмогеологическим строением участка исследований. Однако следует отметить, что результаты, приведенные на рис. 24 и 25, получены с учетом влияния явлений, характерных для корреляционного анализа сейсмических материалов как на ЭВМ, так и на лазерной установке. Наибольшее значение для результатов корреляционного анализа имеют явления, возникающие вследствие ограничения интервала интегрирования и получившие название эффект сужения оценки корреляции и концевой эффект (или эффект усечения).

При корреляционном анализе основное значение имеет эффект сужения оценки корреляции, заключающийся в том, что по мере увеличения временного сдвига между коррелируемыми трассами интервал интегрирования уменьшается. Это, с одной стороны, вызывает общее снижение интенсивности (при оптическом способе) или амплитуды (при фотоэлектрическом способе) корреляционных функций, а с другой, — может привести к тому, что краевые части корреляционных функций будут менее представительными при выделении сигналов на общем фоне, вследствие чего помехоустойчивость краевых частей коррелограмм ниже помехоустойчивости областей сравнительно небольших временных сдвигов. При получении коррелограмм на ЭВМ этот эффект учитывается введением поправок на усиление записи, которое посте-

пленно увеличивается по мере увеличения временного сдвига τ . В результате получают уравненную по амплитуде коррелограмму, напоминающую временной разрез, полученный способом переменной плотности (рис. 24, а) или площади (рис. 25, а).

При оптическом способе получения коррелограмм эффект сужения оценки корреляции учитывается путем фотографической регистрации результатов корреляционного анализа на разных

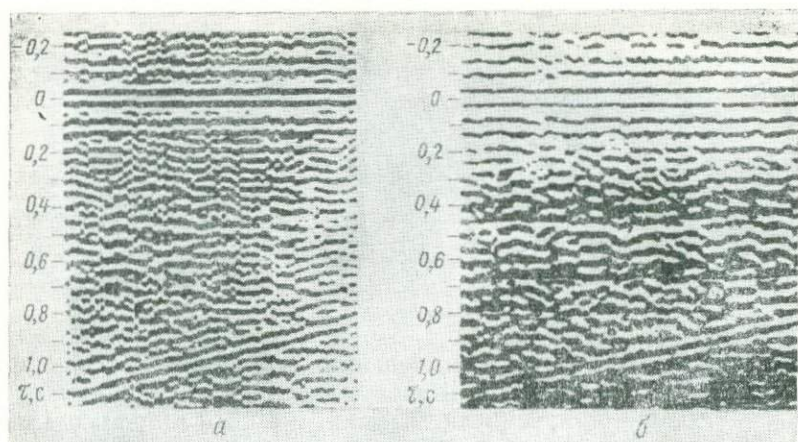


Рис. 24. Автокоррелограммы, полученные на ЭВМ (а) и на лазерной установке (б) по воспроизведениям способом переменной плотности

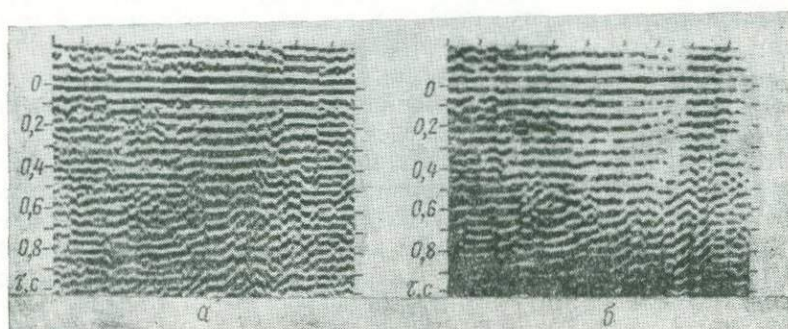


Рис. 25. Коррелограммы, полученные на ЭВМ (а) и на лазерной установке (б) по воспроизведениям способом переменной площади

экспозициях. По полученным фотоснимкам собирается монтаж, качественно характеризующий особенности коррелограммы (рис. 24, б и 25, б). Таким способом осуществляется ступенчатая

регулировка усиления и составной монтаж становится читаемым на интервале всех значений τ .

При фотоэлектрическом способе регистрации коррелограмм, получаемых оптическим способом, в данные фотометрирования необходимо вводить поправку за эффект сужения оценки корреляции, как это делается на ЭВМ. Нормированный график поправок K_c в зависимости от отношения $\tau/\Delta t$, где Δt — интервал интегрирования, представлен на рис. 26. График получен путем деления

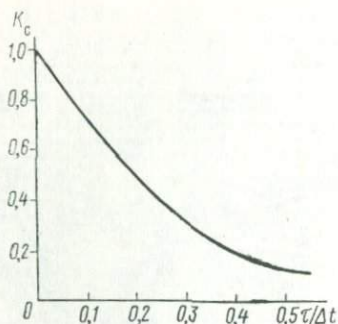


Рис. 26. График поправок за эффект сужения оценки корреляции

экспериментальной кривой изменения побочных максимумов функций автокорреляции отрезков синусоид на теоретическую кривую. Отличие полученного графика, который приблизительно аппроксимируется гиперболой четвертого порядка, от теоретически ожидаемого (гипербола второго порядка) объясняется тем, что фотоэлемент реагирует на интенсивность (квадрат амплитуды) света. Перед вводом поправок график функции автокорреляции, полученный в результате фотометрирования, нормируют по главному максимуму, строят в тех же координатах и делят на кривую, приведенную на рис. 26.

От выбора интервала интегрирования зависит не только степень влияния эффекта сужения корреляции, но и общее качество коррелограмм, поэтому об этом следует всегда помнить при осуществлении корреляционного анализа на лазерных установках. Интервал интегрирования должен быть по возможности более широким (что повышает помехоустойчивость корреляционного анализа), но не включать частей записи, где уровень помех значительно превышает уровень сигнала и, в частности, области первых вступлений; при выявлении ревербераций и оценке эффективности их подавления интервал интегрирования должен соответствовать интересующему диапазону времен. Очевидно, что для надежного выделения побочных максимумов функции автокорреляции необходимо, чтобы интервал интегрирования Δt охватывал отрезок трассы, превышающий по времени величину положения побочного максимума τ_i на оси временных сдвигов, т. е. $\Delta t = K\tau_i$, где $K > 1$. Величина K изменяется от 2 до 10; для выявления резкой кратнообразующей границы можно выби-

рать меньший интервал интегрирования, чем для выявления более слабой границы.

На рис. 27 представлены автокоррелограммы, полученные при интервалах интегрирования 2; 2,5 и 3 с. Видно, что все побочные максимумы функций автокорреляции при увеличении интервала интегрирования становятся более четкими. В то же время, если побочные максимумы с $\tau \approx 0,4$ с и менее могут быть выделены при интервале интегрирования 2,5 и даже 2 с, то максимум на

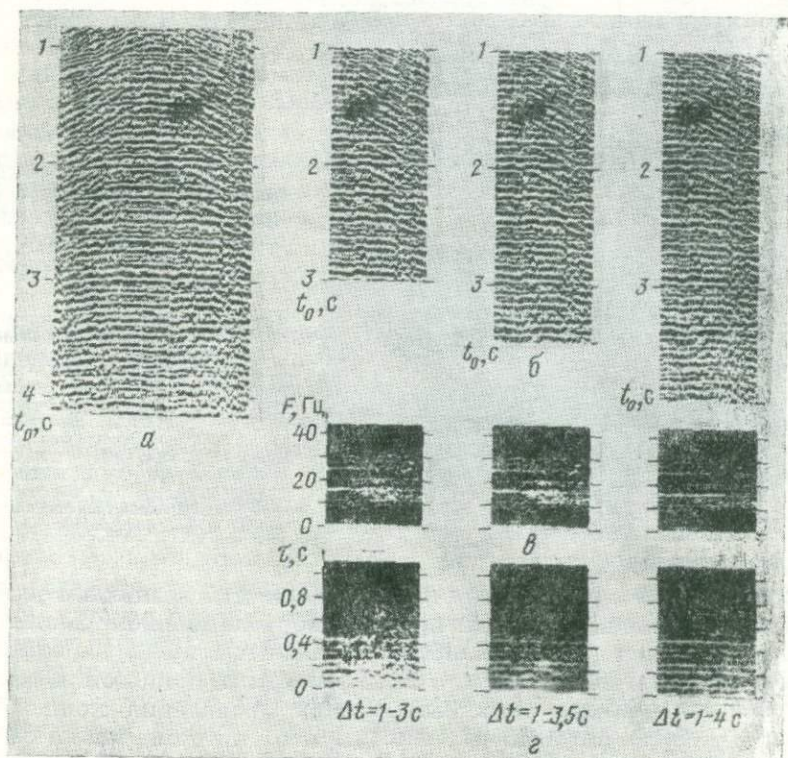


Рис. 27. Изменение автокоррелограммы при различном интервале интегрирования.

a — воспроизведение записи зондирования МОГТ; *б* — участки сейсмических записей; *в*, *г* — соответственно одномерные спектры и автокоррелограммы участков записей

$\tau \approx 0,75$ с достаточно отчетливо выделяется лишь при интервале интегрирования 3 с.

Таким образом, можно считать, что общее требование о соотношении интервала интегрирования и величины периода кратности в целом остается в силе и при определении корреляционных функций на лазерных установках. Однако существуют и

ограничения в выборе интервала интегрирования, которые определяются разрешающей способностью применяемых в настоящее время оптических систем и стандартных фотоматериалов, но они касаются в основном функций взаимной корреляции и ретрокорреляции.

Для получения функций взаимной корреляции или ретрокорреляции на лазерных установках приходится уменьшать интервал интегрирования вследствие недостаточной разрешающей

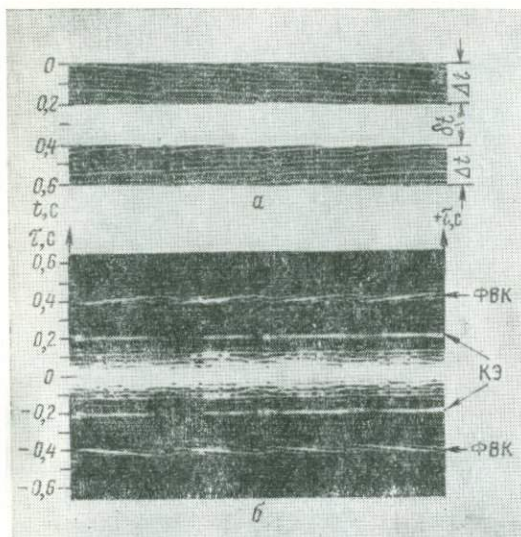


Рис. 28. Пример, характеризующий концевой эффект при получении функций взаимной корреляции и ретрокорреляции оптическим способом.

a — подготовка участка временного разреза для спектрально-корреляционного анализа на лазерной установке (Δt — временной интервал сейсмических трасс, δt — величина смещения трасс вдоль оси времени); *б* — коррелограмма; ΦBK — главный максимум функций взаимной корреляции; $КЭ$ — максимумы интенсивности, связанные с концевым эффектом

способности фотоматериалов и линз. Но при этом возникают те же мешающие явления, что и при автокорреляционном анализе. Однако в данном случае наибольшее значение имеет не эффект сужения оценки корреляции, а так называемый концевой эффект. На рис. 28 приведен типичный пример проявления концевого эффекта в виде интенсивных максимумов, которые могут быть ошибочно приняты за максимумы корреляционных функций. Этот эффект близок по своей природе к краевому эффекту [57], который наблюдается при оптической фильтрации.

Физическая сущность концевого эффекта такова. Вследствие специфики корреляционного анализа на лазерных установках, когда исходные монтажи отрезков коррелируемых трасс располагают друг под другом на некотором расстоянии δt , составной монтаж в целом представляет собой дифракционную решетку с двумя щелями шириной, соответствующей временным интервалам Δt_1 и Δt_2 . При освещении монтажа когерентным монохроматическим светом от каждого его края отходят цилиндрические дифрагированные волны, которые, интерферируя в плоскости формиро-

вания спектра, создают соответствующие составляющие, расстояния между которыми обратно пропорциональны величине δt .

При преобразовании спектров эти составляющие формируют указанные максимумы на коррелограмме. В связи с тем, что размеры коррелируемых интервалов известны, положение этих максимумов легко определить заранее и исключить из дальнейшей интерпретации. В наиболее простом случае, когда $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \delta t$, максимумы, вызванные конечным эффектом, располагаются на временах $\tau = \delta t$ и кратных δt . При вычислении автокорреляционных функций конечной эффект проявляется слабо и практически становится заметен лишь при интервалах интегрирования, меньших 1 с, которые применяются очень редко.

Поправки, вносимые за эффект сужения оценки корреляции, дают возможность выравнить интенсивности корреляционных максимумов. Это нужно главным образом для того, чтобы выделить побочные максимумы в краевых частях корреляционной функции и определить соответствующие им периоды кратности. Но, выравнивая интенсивности, мы одновременно поднимаем и уровень шумов (фона) корреляционной функции, который, как известно [7, 79], может быть высоким.

Некоторые результаты исследования влияния фона на выделение корреляционных максимумов, обусловленных периодичностью сигналов, приведены на рис. 29. Исследования проведены на тестах, при изготовлении которых на магнитную пленку наносились единичные периодические и непериодические импульсы, а затем импульсы воспроизводились способами переменной плотности и переменной площади на разных фильтрациях и записывались на фотопленку в виде временных сейсмических разрезов (рис. 29, *a, в, д*). Так как при воспроизведении единичный импульс превращается на выходе фильтра в волновой импульс, то создается дополнительная периодичность за счет фаз колебания, которая проявляется на коррелограмме в виде фона и «спутников» главного и побочных максимумов.

Из рис. 29, *a, б, ж* видно, что в случае регистрации периодических импульсов на коррелограмме четко выделяются побочные максимумы с таким же периодом повторения (кратности), как и на разрезе. Если импульсы расположены случайным образом (рис. 29, *в, г, з*), то создается фон коррелограммы с приблизительно равной интенсивностью выделяющихся максимумов, исключая максимумы с $\tau = 0,15-0,2$ с, образование которых объясняется нарушением непериодичности на временах записи $0-0,4$ с за счет влияния собственных процессов фильтров воспроизводящей аппаратуры.

Если корреляционному анализу подвергнуть запись с непериодическим и периодическим распределением волновых импульсов (рис. 29, *д*), то снова выделяются побочные корреляционные максимумы (рис. 29, *е, и*), значительно превышающие по интенсивности фон. Аналогичные результаты получены по всем тестам,

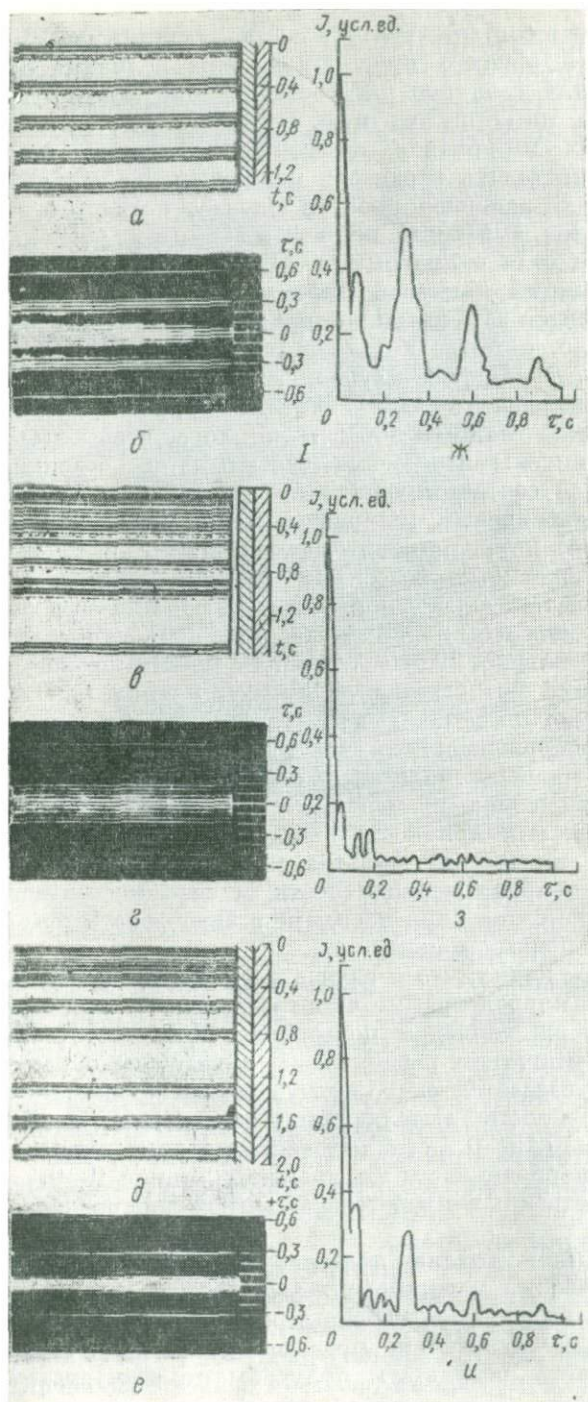


Рис. 29. Влияние фона на выделение побочных корреляционных максимумов.

а, в, д — волновые периодически повторяющиеся, непериодические, а также периодические и непериодические импульсы; б, г, е — коррелограммы, соответствующие тестам а, в, д и зарегистрированные фотографическим способом; ж, з, и — коррелограммы (графики корреляционных функций), соответствующие тестам а, в, д и зарегистрированные фотозлектрическим способом

независимо от фильтрации воспроизведения единичных импульсов. Отличие заключается только в следующем: с увеличением числа периодических импульсов ($n > 2$) интенсивность образованных ими побочных корреляционных максимумов повышается; с использованием более широкополосной фильтрации побочные корреляционные максимумы выделяются лучше; при воспроизведении импульсов способом переменной площади возникают интенсивные побочные корреляционные максимумы второго и третьего порядков (рис. 29, ж, и), что является нежелательным явлением, так как их наличие затрудняет выделение максимумов, которые соответствуют импульсам с другим (большим) периодом повторения; в случае воспроизведения импульсов способом переменной плотности (в нормальной настройке) побочные максимумы высоких порядков или практически отсутствуют, или интенсивность их резко понижена.

Наличие побочных корреляционных максимумов второго и третьего порядков объясняется возникновением нелинейных искажений при использовании записей способом переменной площади или плотности в случае плохой (контрастной) настройки фотоблока воспроизводящей аппаратуры.

Соотношение амплитуд максимумов функции автокорреляции

Знание соотношения амплитуд максимумов функции автокорреляции позволяет получать количественные данные об уровне кратных и однократных волн. Согласно работе [99] рассмотрим следующую модель сейсмического разреза.

1. Характер трассы сейсмической записи $F(t)$ опишем выражением

$$F(t) = f(t) + \varphi(t) + \psi(t),$$

где $f(t)$ — последовательность импульсов однократных отраженных волн; $\varphi(t)$ — последовательность импульсов кратных отраженных волн; $\psi(t)$ — шумы, некоррелированные по x и t .

2. Импульсы однократных отраженных волн распределены вдоль трассы (во времени) случайно; максимумы, соответствующие корреляции отдельных импульсов между собой, входят в состав фона функции автокорреляции.

3. Имеется одна реверберационная система с периодом кратности Δt и коэффициентом ослабления амплитуды K (при прохождении луча вверх и вниз).

4. Длительность записи T значительно превышает интервал интегрирования Δt , т. е. $T = m\Delta t$, где $m \gg 1$. Это предположение даст нам возможность произвести дальнейшие выкладки для бесконечного интервала интегрирования, но затем мы вернемся к более строгой оценке величины m . При этих

предположениях функция автокорреляции трассы будет выражена следующим уравнением:

$$R_A(\tau) = \int_0^{\infty} F(t)F(t-\tau) dt = \int_0^{\infty} [f(t) + \varphi(t) + \psi(t)] [f(t-\tau) + \varphi(t-\tau) + \psi(t-\tau)] dt = \sum_{i=1}^9 J_i, \quad (2.17)$$

где

$$J_1 = \int_0^{\infty} f(t)f(t-\tau) dt;$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} f(t)\varphi(t-\tau) dt;$$

$$J_3 = \int_0^{\infty} f(t)\psi(t-\tau) dt;$$

$$J_4 = \int_0^{\infty} \varphi(t)f(t-\tau) dt;$$

$$J_5 = \int_0^{\infty} \varphi(t)\varphi(t-\tau) dt;$$

$$J_6 = \int_0^{\infty} \varphi(t)\psi(t-\tau) dt;$$

$$J_7 = \int_0^{\infty} \psi(t)f(t-\tau) dt;$$

$$J_8 = \int_0^{\infty} \psi(t)\varphi(t-\tau) dt;$$

$$J_9 = \int_0^{\infty} \psi(t)\psi(t-\tau) dt.$$

Условимся далее рассматривать величины корреляционных максимумов как величины, превышающие фон функции автокорреляции. Учитывая пункты 1 и 2, отметим, что J_3 , J_6 , J_7 и J_8 стремятся к нулю. Интеграл J_1 представляет собой функцию автокорреляции последовательности импульсов однократных волн; так как эти импульсы при большом интервале интегрирования

τ	J_1	J_4	J_5	J_9	$R(\tau)$
0	R_0	0	$R_0 \frac{K^2}{1-K^2}$	R_n	$R_n + R_0 \frac{1}{1-K^2}$
Δt	0	$R_0 K$	$R_0 \frac{K^3}{1-K^2}$	0	$R_0 \frac{K}{1-K^2}$
$2 \Delta t$	0	$R_0 K^2$	$R_0 \frac{K^4}{1-K^2}$	0	$R_0 \frac{K^2}{1-K^2}$
$3 \Delta t$	0	$R_0 K^3$	$R_0 \frac{K^5}{1-K^2}$	0	$R_0 \frac{K^3}{1-K^2}$
...
$n \Delta t$	0	$R_0 K^n$	$R_0 \frac{K^{n+2}}{1-K^2}$	0	$R_0 \frac{K^n}{1-K^2}$
...

считаются некоррелированными, то их автокорреляционная функция имеет максимум на $\tau = 0$; обозначим его амплитуду R_0 . Интеграл J_9 представляет собой функцию автокорреляции шумов; так как они не коррелированы во времени, то эта автокорреляционная функция имеет максимум на $\tau = 0$; обозначим его максимальное значение как R_n . Интегралы J_2 , J_4 и J_5 представляют собой корреляционные функции последовательности импульсов кратных волн между собой (J_5), а также взаимную корреляцию однократных и кратных волн при положительных (J_4) и отрицательных (J_2) временных сдвигах τ . Согласно пункту 3 последовательность импульсов кратных волн $\varphi(t)$ может быть представлена в виде

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} K^i f(t - i \Delta t). \quad (2.18)$$

В этом случае значения интегралов J_2 , J_4 и J_5 могут быть легко вычислены. Выпишем амплитуды максимумов всех корреляционных функций, отличных от нуля, в табл. 1 (учитывая четность функции автокорреляции, будем рассматривать только значения $\tau \geq 0$).

Назовем значения $R(\tau)$ при $\tau = 0$ максимумом нулевого порядка (главный максимум функции автокорреляции), при $\tau = \Delta t$ — максимумом первого порядка (первый побочный максимум) и т. д. до максимума n -го порядка при $\tau = n \Delta t$. Обозначим

$$B_n = \frac{R[\tau = (n+1) \Delta t]}{R(\tau = n \Delta t)}. \quad (2.19)$$

Прежде всего отметим, что при $n \geq 1$ $B_n = K$. Таким образом, если существует только одна кратноеобразующая граница, то

отношение амплитуды каждого последующего максимума функции автокорреляции (начиная с максимума второго порядка) к амплитуде предыдущего равняется отношению амплитуды кратной волны n -го порядка к амплитуде кратной волны $n - 1$ -го порядка (включая нулевой порядок, т. е. однократную волну).

Приведенные рассуждения справедливы лишь для бесконечной длительности записи, в то время как реальная длительность записи и реальный интервал интегрирования конечны. В связи с этим вернемся к оценке величины превышения длительности записи m (и, следовательно, максимально возможного интервала интегрирования) по сравнению с величиной Δt .

Для упрощения оценки будем считать, что $\psi(t) = 0$, и проведем численные расчеты с погрешностью 1%. Примем $K = 0,5$ и суммарную роль однократных волн в формировании главного максимума функции автокорреляции за единицу. Тогда при $m = 2$ главный максимум функции автокорреляции будет иметь величину, приблизительно равную 1,31, максимум первого порядка — 0,62, максимум второго порядка — 0,25. Величины B_n , определенные по формуле (2.19), составят: $B_0 = 0,47$ (отклонение от заданного значения K составляет 6%), $B_1 = 0,40$ (отклонение 20%). В табл. 2 приведены аналогичные расчеты для различных m .

Таким образом, можно сделать вывод, что для определения K с погрешностью 1% достаточно, чтобы длительность записи и интервал интегрирования приблизительно в 5 раз превышал величину периода кратности. Однако, как правило, на функциях автокорреляции реальных записей могут быть выделены побочные максимумы, обязанные своим происхождением лишь кратности первого порядка (первые побочные максимумы). Это связано с наличием фона автокоррелограммы, который образуется за счет ряда факторов и в первую очередь за счет того, что каждая отражающая граница является в той или иной степени кратнобразующей. Повторив те же операции вычисления функ-

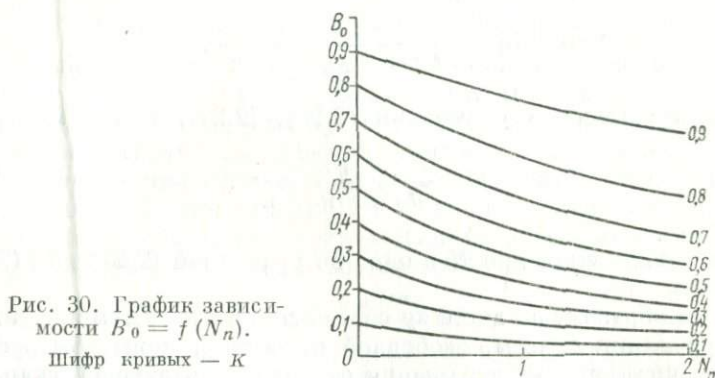
Таблица 2

m	Значение максимумов ФАК различных порядков				Значение B_n			Отклонение значений B_n от заданного K , %		
	нулевого	первого	второго	третьего	B_0	B_1	B_2	B_0	B_1	B_2
2	1.310	0.620	0.250	—	0.47	0.40	—	6	20	—
3	1.327	0.656	0.312	0.125	0.494	0.475	0.400	1	5	20
4	1.331	0.663	0.328	0.156	0.497	0.495	0.475	<1	1	5
5	1.331	0.665	0.332	0.163	0.500	0.498	0.492	<1	<1	<1

ции автокорреляции последовательно для двух-, трех- и более кратнобразующих границ, можем сделать следующие выводы.

1. Соотношения между максимумами функции автокорреляции, обусловленными одной и той же реверберационной системой при различном порядке кратности (включая главный максимум), остаются теми же.

2. Появляется большое количество максимумов второго порядка, обусловленных присутствием на сейсмической записи



разного типа кратных волн, которые образованы разными реверберационными системами. По интенсивности среди них могут выделяться только максимумы второго порядка с весьма значительными коэффициентами K .

3. Всегда существует фон функции автокорреляции, образуемый корреляцией отдельных импульсов между собой (как отраженных волн, так и шума, импульсов сигналов с импульсами шума вследствие прохождения тех и других по одному и тому же каналу регистрации) и затрудняющий выделение корреляционных максимумов первого порядка и выше.

Выпишем теперь значение $B_0 = R(\Delta t)/R_0$. Обозначив $N_n = R_n/R_0$ (коэффициент, характеризующий отношение уровня записи шума к уровню записи однократных отраженных волн), найдем

$$B_0 = \frac{K}{1 + N_n(1 - K^2)}. \quad (2.20)$$

На рис. 30 представлены графики зависимости $B_0 = f(N_n)$. Анализ графиков показывает, что при малых значениях K и больших N_n величина B_0 может отличаться от K в 2 раза и более. Даже при большом значении K ($K \approx 0,8$) и малом относительном уровне шума ($N_n = 0,2$) ошибки определения K по отношению к ошибкам определения B_0 достигают 15—25% и только при нулевом уровне шума $B_0 = K$.

Если по каким-либо источникам величина N_n может быть определена, то значение K может быть получено из отношения $B_0 = R(\Delta t)/R_0$ с использованием рис. 30.

Предлагается следующий способ определения K и N_n [99]. Известно, что при суммировании нескольких трасс n уровень нерегулярного шума уменьшается в \sqrt{n} раз. Просуммируем n равноудаленных от пункта взрыва трасс и вычислим функцию автокорреляции суммарной записи. Отношение $B_\Sigma = R(\Delta t)/R_0$ по суммарной трассе определится выражением

$$B_\Sigma = \frac{K}{1 + \sqrt{n} N_n (1 - K^2)}. \quad (2.21)$$

Решая совместно уравнения (2.20), (2.21), получим

$$K = \frac{B_\Sigma}{B_0} \frac{\sqrt{n} - 1}{\sqrt{n} B_\Sigma - B_0}. \quad (2.22)$$

Подставляя значение K в одно из уравнений (2.21) или (2.22), определим N_n .

Таким образом, по анализу соотношения максимумов функции автокорреляции трассы, свободной от шумов, может быть определен не коэффициент отражения от кратнообразующей границы, а коэффициент ослабления амплитуд реверберационной системой в целом. Лишь при полном отражении от одной из границ реверберационной системы этот коэффициент равен истинному коэффициенту отражения. В случае возможности выделения побочных максимумов второго порядка коэффициент ослабления амплитуд реверберационной системы может быть определен непосредственно. Используя, кроме одиночной, суммарную трассу, составленную из записей в равноудаленных от пункта взрыва точках, можно определить коэффициент ослабления амплитуд и уровень шума.

Методика получения суммомент РНП

Возможность осуществления некоторых математических операций оптическими способами дает возможность использовать оптические установки для решения ряда специальных задач обработки сейсмических материалов.

Рассмотрим возможность получения функций, аналогичных суммоментам РНП (будем называть их также суммоментами). При использовании одномерного преобразования Фурье спектральная плотность на нулевой частоте есть величина, пропорциональная интенсивности светового потока по направлению преобразования:

$$S(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt. \quad (2.23)$$

Если сейсмограмма записана способом переменной плотности с некоторым средним нулевым уровнем a_0 , сумма амплитуд по выбранному направлению суммирования α будет равна

$$A_\alpha = P (\sum a_0 + \sum a_i), \quad (2.24)$$

где a_i — коэффициент пропускания пленки, равный амплитуде сигнала, P — множитель, связанный с интенсивностью света, плотностью микрокопии и т. п.

Поскольку мы можем регистрировать только квадрат модуля спектра, вместо $\Phi(0)$ мы зарегистрируем величину

$$\Phi_\alpha^2(0) = P^2 (\sum a_0)^2 + P^2 (\sum a_i)^2 + 2P \sum a_0 a_i. \quad (2.25)$$

Первый член есть величина постоянная и ее можно вычесть, подобрав экспозицию таким образом, чтобы уровень почернения, соответствующий этому члену, оказался левее точки начального почернения характеристической кривой фотопленки. В этом случае почернение пленки D будет некоторой нелинейной функцией суммарной амплитуды $\sum b_i$. Если же сейсмический сигнал записать без постоянной составляющей (с регистрацией половины периода записи), на выходе системы Φ мы будем иметь

$$\Phi_\alpha(0)^2 = P^2 (\sum a_i)^2, \quad (2.26)$$

т. е. плотность почернения фотопленки будет связана с суммой амплитуд квадратичной зависимостью.

Методика получения суммомент с помощью лазерной установки заключается в следующем. Из микрокопии с изображением сейсмограммы с помощью диафрагмы вырезается необходимое число трасс. Спектральная плоскость закрывается диафрагмами за исключением центральной линии. Поворачивая с постоянной угловой скоростью микрокопию и передвигая равномерно фотопленку, получаем суммоменту с непрерывным изменением временного сдвига. Необходимо заметить, что при наклоне микрокопии происходит некоторая деформация масштаба суммоменты, связанная с изменением длины проекции микрокопии на горизонтальную линию, а также смещение суммоменты по горизонтали, связанное с траекторией микрокопии относительно центра вращения. Эти искажения легко корректируются с помощью специальных тестовых шкал, подвергаемых преобразованию вместе с микрокопией.

Другая особенность связана с тем, что при некоторой конечной ширине дорожки сейсмограммы m при наклоне микрокопии вместо амплитуды $a(t)$ фигурирует величина $\int_{t-T}^t a(t) dt$, где $T = m \operatorname{tg} \alpha$ (α — угол поворота микрокопии относительно вертикали). В связи с этим желательно ширину дорожки делать как можно меньше, а расстояние между дорожками увеличивать, что приведет к уменьшению угла α при одинаковых временных сдвигах.

Достоинством данной методики является возможность получения суммоленты с непрерывной разверткой по δt , что сделать другими способами практически невозможно.

Используя двумерное преобразование Фурье, можно упростить суммоленты, уменьшив фон, вызванный побочным суммированием. С этой целью микрокопия суммолент, получаемых способом переменной площади или плотности, подвергается низкочастотной фильтрации по оси волновых чисел. При этом разрастание, соответствующее основному максимуму и имеющее относительно большой период по оси x , подчеркнется на суммолентах, а фон существенно ослабится. Параметры низкочастотного фильтра подбираются путем визуального изучения картины на экране телевизора.

Количественный анализ сейсмических данных

Фотоэлектрический способ регистрации результатов спектрально-корреляционного анализа и оптической фильтрации позволяет изучать кинематические характеристики сейсмических волн и лишь качественно оценивать их интенсивность. С целью изучения динамических характеристик выделяемых волн, количественной оценки их интенсивностей и данных оптических преобразований лазерная установка комплектуется устройством для фотоэлектрической регистрации, включающим систему дополнительных угловых и щелевых диафрагм [61].

Вернемся к рассмотрению рис. 2, *a* для изучения соответствия величины светового потока на входе и выходе когерентной оптической системы. Известно [84, 85], что величина светового потока Φ , прошедшего через оптическую систему, пропорциональна яркости светящихся элементарных площадок объекта B , их площади dS , величине телесного угла θ , под которым видна входная линза системы из любой точки объекта, и косинусу угла i наклона площадок к оптической оси, т. е.

$$\Phi = \sum_0^{\infty} d\Phi = \sum_0^{\infty} B\theta \cos i dS, \quad (2.27)$$

где $d\Phi$ — элементарный световой поток от элемента объекта площадью dS .

Так как микрокопия сейсмического разреза устанавливается перпендикулярно к оптической оси, то $i = 0$. Как следует из рис. 2, *a*, радиус $R_{\text{л}}$ и площадь $S_{\text{л}}$ входной линзы при определенном расстоянии ее от элементарной светящейся площади a или b могут быть определены по формулам

$$R_{\text{л}} = R \sin \beta_{\text{к}}, \quad S_{\text{л}} = \pi R_{\text{л}}^2 = \pi (R \sin \beta_{\text{к}})^2.$$

Телесный угол, под которым видна входная линза $\tilde{5}$ из центра элементарных площадок a или b ,

$$\theta = \frac{S_{\tilde{5}}}{R^2} = \frac{\pi R^2 \sin^2 \beta_k}{R^2} = \pi \sin^2 \beta_k. \quad (2.28)$$

Угол β_k определяет предельную пространственную частоту спектра сейсмических колебаний, формирующегося в плоскости P , и качество восстановленного изображения в плоскости O' . Входную линзу $\tilde{5}$ всегда можно поставить на такое расстояние r за микрокопией, что все лучи будут проходить через ее апертуру. В этом случае для колебаний определенной частоты величина телесного угла θ будет иметь постоянное значение и спектр мощности на выходе системы соответствует спектру мощности на входе. Следовательно, когерентные оптические системы могут быть использованы для определения амплитудных спектров сейсмических колебаний, отношения сигнал/помеха, относительного соотношения интенсивностей полезных сейсмических колебаний, если применить фотометрирование соответствующих участков двумерного или одномерного спектра.

При анализе сейсморазведочных данных, воспроизведенных способом переменной площади, амплитудное пропускание проходящего через элементы микрокопии света равно нулю и единице. Поэтому величина светового потока на входе оптической системы фильтра в основном определяется суммарной площадью элементарных площадок, т. е.

$$\Phi = \sum_0^{\infty} d\Phi = m \sum_0^{\infty} dS, \quad (2.29)$$

где m — коэффициент пропорциональности, связывающий величину светового потока и суммарную площадь микрокопии разреза, через которую проходит свет.

Вследствие потерь за счет поглощения, частичного рассеяния и других факторов поток Φ' , дошедший до плоскости O' , будет несколько меньше, чем поток Φ , и с учетом коэффициента пропускания системы κ определится следующим соотношением:

$$\Phi' = \kappa \Phi = m \kappa \sum_0^{\infty} dS. \quad (2.30)$$

Этот поток создаст освещенность, равную

$$E' = \sum_0^{\infty} dE' = \sum_0^{\infty} \frac{d\Phi'}{dS'}. \quad (2.31)$$

Размеры элементарных площадок, восстановленных в плоскости O' , зависят от расстояния между линзами системы. Если

коэффициент увеличения $n = dS'/dS$, то освещенность в плоскости O'

$$E' = \frac{\kappa}{n} \sum \frac{dF}{dS}. \quad (2.32)$$

Поэтому, зная κ и n , можно определить динамические характеристики сейсмических волн по данным фотоэлектрических измерений, проведенных в плоскости O' . Коэффициенты κ и n для каждой системы свои, вследствие чего они могут быть определены только экспериментально.

При анализе сейсморазведочных данных, воспроизведенных способом переменной плотности, амплитудное пропускание проходящего через элементы микропии света будет меняться от нуля до единицы. В связи с этим величина светового потока, дошедшего до плоскости O' , будет определяться и яркостью элементарных площадок, т. е.

$$\Phi' = m\kappa \sum_0^{\infty} B dS. \quad (2.33)$$

Поэтому данные фотоэлектрических измерений, проведенных в плоскости O' , не всегда будут соответствовать величине экстремумов сейсмических колебаний, так как возможно уравнивание величин световых потоков, соответствующих участкам волны с разной плотностью почернения фотопленки.

Ранее отмечалось, что приемники света (фотоэлемент, фотоэмульсия, глаз и т. д.) чувствительны к электрическому полю E световой волны и могут фиксировать только энергию этого поля. Следовательно, мы сможем измерить интенсивность света. Если свет идет от двух точек объекта a и b , то в плоскости P он суммируется, причем в случае когерентного излучения E_a и E_b интерферируют и суммарная интенсивность

$$|J_{\Sigma}| = |E_a + E_b|^2.$$

Следовательно, при когерентном освещении суммируются амплитуды и модуль суммы возводится в квадрат; при этом важно отметить, что переход от комплексной амплитуды E к интенсивности $J = EE^*$, регистрируемой прибором, происходит только в приемнике света.

Для фотоэлектрических измерений используют лазерные установки, включающие фотоприбор, усилитель фототоков и регистратор [61, 77]. В последнее время получены положительные результаты применения микрофотометра ИФО-451 для проведения количественного анализа результатов оптической обработки, зарегистрированных на фотопленке.

Определение амплитудных спектров и относительной интенсивности волн. Для определения амплитудных спектров сейсмических волн данные воспроизводят на широкополосной фильтрации, записывают способом переменной площади или плотности и оформляют по общепринятым правилам. Анализ интенсивностей сейсмических волн осуществляют по записям, воспроизведенным способом переменной площади.

Определение амплитудных спектров может быть выполнено для всего разреза в целом, временного интервала, группы волн, характеризующихся определенным значением кажущейся скорости, отдельной волны. Фотоэлектрические измерения проводят в плоскости двумерного или одномерного спектра по схемам, изображенным на рис. 31, а, б. Работы по фотометрированию, не связанные с предварительным выделением волн по кажущейся скорости, проводят как по схеме рис. 31, а, так и рис. 31, б. Если же необходимо предварительное выделение волн, то анализ осуществляют по схеме двумерной оптической фильтрации (см. рис. 31, а), представляющей больший интерес. Процесс фотометрирования заключается в следующем.

1. При помощи клинообразных заслонок 9 осуществляют фильтрацию по кажущейся скорости, т. е. выделяют группу волн, характеризующуюся диапазоном или одним значением кажущейся скорости. Результат выделения необходимых для анализа волн мгновенно просматривают на экране телевизора. Для этого выдвигают зеркало 11, отбрасывающее изображение на передающее устройство 13, с которого сигналы подаются на телевизор 14. После проведения фильтрации зеркало 11 убирают и результат фотографируют фотокамерой 12.

2. Рядом с заслонками 9 устанавливают систему частотного фильтра 10 и раскрывают щель, обеспечивающую пропускание светового потока в полосе частот 2 Гц, и перемещают вдоль оси частот с шагом 1 Гц. Световые потоки, соответствующие каждому положению щели, преобразуют фотоэлементом 15 в фототоки, усиливают фотокомпенсационным усилителем 16 и регистрируют прибором 17.

3. Снимают щелевую диафрагму и измеряют общий световой поток, соответствующий выделенным волнам.

4. По данным фотоэлектрических измерений строят амплитудные спектры выделенных волн и определяют отношение их интенсивностей.

Амплитудные спектры представляют в виде графиков зависимости величины фототока от частоты. Значение измеренного фототока относят к центру перемещаемой щели.

При построении амплитудных спектров, соответствующих сейсмическому временному разрезу или отдельным его интервалам,

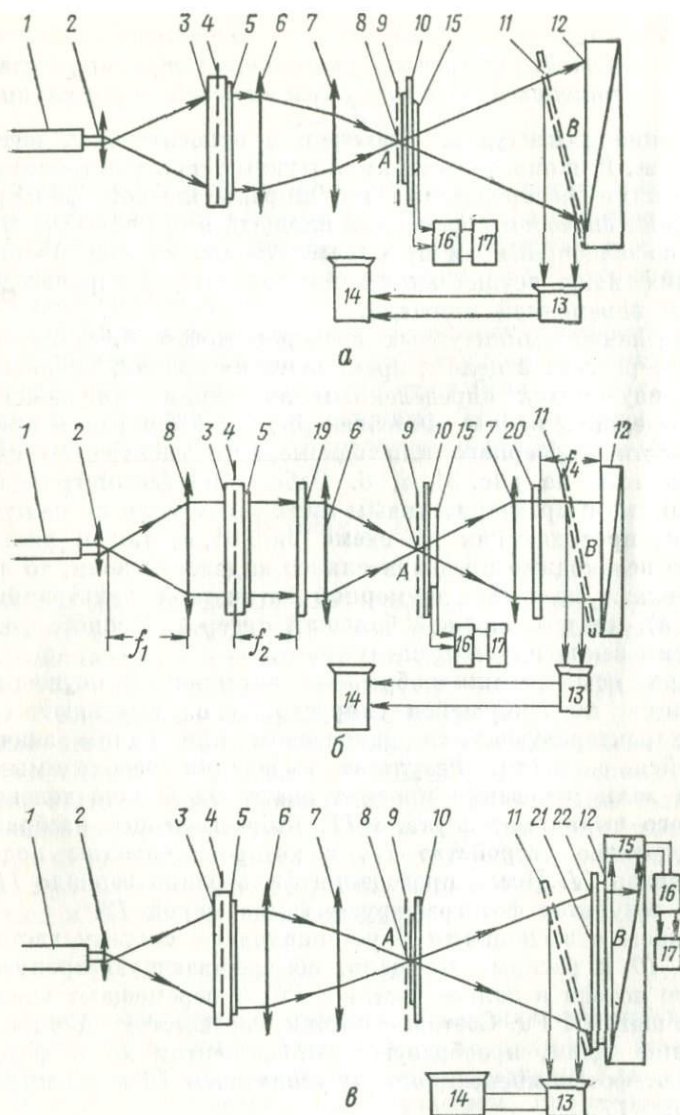


Рис. 31. Схемы лазерных установок для определения амплитудных спектров и отношения сигнал/помеха (а), построения амплитудных спектров и количественного корреляционного анализа (б), определения динамических характеристик сейсмических волн (в).

1 — газовый лазер; 2 — короткофокусный объектив; 3 — носитель разреза; 4 — микрокопия сейсмического разреза; 5 — диафрагма для ограничения микрокопии; 6, 7 — сферические линзы; 8 — плоскость формирования спектров или коррелограмм сейсмических трасс; 9 — системы клинообразных непрозрачных заслонок; 10 — система частотного фильтра; 11 — выдвигаемое зеркало; 12 — фотокамера; 13 — передающее устройство; 14 — телевизор; 15 — фотоэлемент; 16 — усилитель фототоков; 17 — регистратор; 18 — линза, преобразующая расходящийся пучок света в параллельный; 19, 20 — цилиндрические линзы; 21 — система дополнительных диафрагм, установленная в плоскости восстановленного изображения разреза; 22 — щелевая диафрагма; А — фокальная плоскость системы; В — плоскость восстановленного изображения отфильтрованного разреза; f_1 — фокусное расстояние сферической линзы; f_2 — фокусное расстояние цилиндрической линзы

сканируют спектр, не закрытый заслонками 9, и по данным фотоэлектрических измерений строят такие же графики, как и в случае с выделением волн по кажущейся скорости.

При анализе разреза получают интегральные амплитудные спектры и суммарную интенсивность волн, зарегистрированных во временном интервале исследования. Такие определения проводят обычно по данным изучения волновой картины, когда при изучении кинематических характеристик волн-помех и отраженных волн строят амплитудные спектры этих групп волн и определяют долю каждой группы в формировании общей волновой картины.

Если необходимо построить амплитудный спектр какой-то конкретной волны, определить относительную интенсивность интерферирующих в определенном временном интервале волн, то для этого используют результаты оптической фильтрации. Из выделенных фильтром групп волн отбирают интересующую волну, ограничивают диафрагмой 5 (см. рис. 31, а) и проводят количественные измерения соответствующих ей световых потоков.

В ряде случаев по оригиналам сейсмических разрезов можно выделить волны для анализа. Для этого их отмечают индексом и ограничивают по длине прослеживания и длительности колебаний. Участки, соответствующие выделенным волнам, микрофильмируют и анализируют по описанной методике.

В тех случаях, когда невозможно отобрать волну в чистом виде ни по оригиналам, ни по результатам оптической фильтрации, поступают следующим образом. По одной из трасс находят участок, где волна прослеживается без интерференции. Эту трассу воспроизводят несколько раз, в результате чего получают монтаж шириной 15—20 см, на котором интересующая волна будет представлена в чистом виде. Выделенную волну микрофильмируют и анализируют по описанной схеме. При воспроизведении интересующих волн параметры воспроизводящей аппаратуры не меняют. Такой прием позволяет более качественно провести динамический анализ, но требует большей затраты машинного времени.

Определение отношения сигнал/помеха. Для этого вида анализа используют сейсмические записи, полученные в поле без АРУ и ПРУ и воспроизведенные на широкополосной фильтрации без регуляторов амплитуд способом переменной площади. Фотометрирование проводят в плоскости двумерного спектра по схеме рис. 31, а.

Для изучения волн-помех при анализе данных зондирований МОВ или МОГТ с помощью оптического фильтра поочередно выделяют волны-помехи, характеризующиеся определенной кажущейся скоростью, и измеряют фотоэлектрической установкой соответствующие им световые потоки. Анализ проводят либо по всему разрезу, либо по отдельным интервалам в зависимости от характера волновой картины и задач.

При наличии шумов и помех, характеризующихся отличным от полезных волн частотным составом, используют частотные фильтры, с помощью которых ограничивают спектральную область помех, а их интенсивность измеряют фотоэлементом. По данным фотоэлектрических измерений определяют отношения сигнал/помеха для всех видов зарегистрированных помех, считая сигналом полезные волны, которые соответствуют анализируемому временному интервалу.

Определение отношения сигнал/помеха по одной отраженной волне осуществляют по многократным воспроизведениям одной сейсмической трассы, на которой выбранная для анализа полезная волна и волна-помеха регистрируются без интерференции.

Определение динамических характеристик сейсмических волн.

Определение динамических характеристик осуществляют по сейсмическим данным, записанным в поле и воспроизведенным на преобразователях без применения АРУ и ПРУ с максимально возможной шириной трассы на широкополосной фильтрации. Анализ проводят на выходе оптического фильтра в плоскости восстановленного изображения сейсмического разреза по схеме, приведенной на рис. 31, в. Определение динамических характеристик заключается в следующем.

Микрокопию 4 сейсмического временного разреза помещают в носитель разреза 3 и освещают пучком когерентного монохроматического света, испускаемого лазером 1. В фокальной плоскости 8 оптической системы, состоящей из двух сферических линз 6 и 7, формируют двумерный спектр. Фильтрами по частоте 10 и по кажущейся скорости 9 выделяют определенную группу волн, динамические характеристики которых необходимо определить. Процесс выделения волн контролируют системой визуального просмотра результатов оптической фильтрации.

В плоскости восстановленного изображения отфильтрованного разреза устанавливают дополнительную систему щелевых и угловых диафрагм 21, 22, которыми ограничивают группу волн или определенную волну из выделенной группы. Результат выделения волны просматривают на экране телевизора 14. Выделенную волну фотографируют фотокамерой 12.

С помощью диафрагмы 22 устанавливают щель, ширина которой зависит от выбранного интервала исследований вдоль волны, расстояния между трассами и чувствительности фоторегистрирующих приборов. Обычно ширина щели составляет 2—4 трассы. Щель установленной ширины перемещают по направлению вдоль оси синфазности исследуемой сейсмической волны. Шаг перемещения выбирают равным половине ширины щели. Перемещение щели контролируют просмотром результатов на экране телевизора 14. Световой поток, определяемый положением щели, отражается от зеркала фотокамеры 12 и падает на фотоэлемент 15. Соответствующий этому световому потоку фототок усиливают усилителем 16 и регистрируют прибором 17.

По данным фотоэлектрических измерений строят графики изменения интенсивности волн по вертикальному профилю (рис. 32).

Преимущество применения лазерных оптических установок для определения динамических характеристик состоит в возможности с помощью простых технических средств выделять из общей интерференционной волновой картины необходимые для анализа сейсмические волны. При этом решаются сразу две задачи: изучение кинематических и динамических характеристик сейсмических волн.

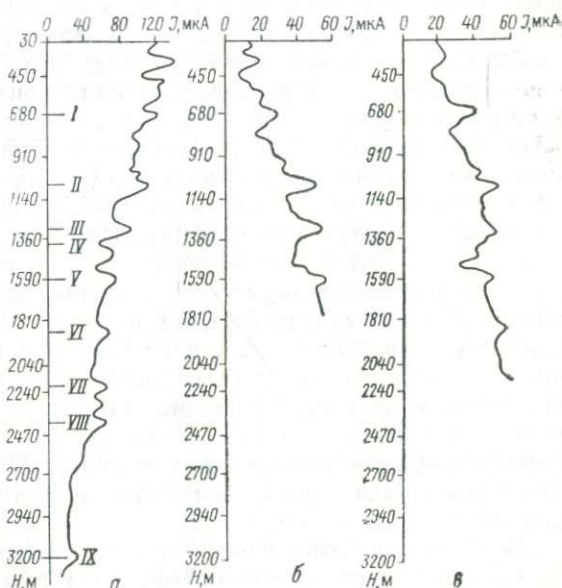


Рис. 32. Графики изменения интенсивности некоторых волн по вертикальному сейсмическому профилю.

a — для прямой волны; *б* — для восходящих волн, отраженных соответственно от горизонтов VI и VII. I—IX — отражающие горизонты

Применяемая в настоящее время аналоговая аппаратура типа ПСЗ и «Луч» дает возможность записывать трассы на расстоянии 2—3 мм друг от друга. При таких расстояниях между трассами и воспроизведении способом переменной площади динамический диапазон сейсмических записей не превышает 20 дБ. Отсчет трасс во время перемещения сканирующей щели в плоскости восстановленного изображения при этом также затруднен. Кроме того, вследствие малости площадок, занимаемых сейсмическими сигналами, соответствующие им световые потоки весьма слабы, что требует применения высокочувствительной регистрирующей аппаратуры. Увеличение расстояния между трассами до 7—10 мм позволяет зарегистрировать на фотопленку сигналы в широком динамическом диапазоне их записи, а также облегчает контроль правильности перемещения сканирующей щели.

Количественный корреляционный анализ. Для проведения количественного корреляционного анализа используют схему рис. 31, б. Процесс заключается в том, что корреляционную

функцию, сформированную в фокальной плоскости оптической системы, сканируют узкой щелью, ширину которой выбирают в зависимости от задач анализа, интенсивности светового потока на удалениях от центральной части коррелограммы и размеров исследуемого разреза. Результаты фотоэлектрической развертки коррелограммы изображают в виде графиков (см. рис. 29) зависимости фототока от положения щели относительно центра коррелограммы (смещения по времени τ).

Фотоэлектрический анализ «штриховых» сейсмических разрезов. Отмечающаяся в ряде районов сложность волновой картины заставляет искать пути для улучшения прослеживания полезных волн. С этой целью часто используют обработку с записью по способу штриховых разрезов. Однако обилие штрихов, располагающихся с различными наклонами, часто и в этом случае не позволяет проводить надежную корреляцию волн. С целью выделения из хаотически расположенных штрихов их преобладающего направления можно воспользоваться данными фотоэлектрических измерений, осуществляемых по схеме рис. 31, а. Для этого проводят сканирование двумерного спектра, соответствующего определенному временному интервалу разреза, с помощью клинообразной пропускающей щели с углом при вершине 2° . Щель перемещают с шагом в 2° , а соответствующее значение замеренного фототока относят к центру положения пропускающей щели. По данным фотометрирования строят диаграммы зависимости интенсивности светового потока от положения центра клинообразной щели относительно вертикали [79], по которым определяют преобладающее направление в положении штрихов (площадок).

Естественно, этот способ анализа сложных волновых полей не обладает высокой точностью, но в ряде случаев оказывается полезным при установлении основных закономерностей залегания отражающих горизонтов.

Количественный анализ сейсморазведочных данных, основанный на фотографическом способе регистрации

Существующие способы измерения светового потока основаны на преобразовании световой энергии в электрическую и требуют усложнения лазерных установок и применения специальной регистрирующей аппаратуры. Наиболее простой способ [30] основан на фотографической регистрации результатов с применением оптических клиньев. Суть способа заключается в следующем.

Если световой поток $E(y)$, неизменный по оси x , пропустить через некоторый полупрозрачный фототранспарант с наперед заданным коэффициентом прозрачности $K(x)$ (оптический клин), то на выходе фототранспаранта распределение интенсивности выразится как $E'(x, y) = E(y)K(x)$. Поместив оптический клин перед фотопленкой, после проявления фотопленки получим поле изоли-

ний равного почернения (в пределах линейного участка характеристической кривой фотопленки). Используя материалы с высоким коэффициентом контрастности, можно добиться почти полного отсутствия полутонов, а линия перехода от светлого к черному и будет амплитудной формой выражения изменения интенсивности света по оси ω . Если оптический клин имеет параметр $K = c/x$, где $c = \text{const}$, амплитуда линии будет линейно связана с интенсивностью света.

Для регистрации функций с большим разбросом изменения значений диапазон изменения оптической плотности клина желательно иметь как можно больше. В этом случае при некоторой оптимальной экспозиции мы определим функцию в максимально возможном диапазоне. При неоптимальной экспозиции произойдет срезание больших либо малых значений функции (в зависимости от отклонения экспозиции в ту или иную сторону). Поскольку оптимальная величина экспозиции заранее неизвестна, необходимо экспонировать пленку на двух-трех экспозициях, что позволит увеличить диапазон оптического клина (таким путем диапазон измерений можно бесконечно увеличивать).

Для удобства пользования полученными результатами желательно иметь линейную зависимость амплитуды сигнала от расстояния x . В этом случае коэффициент прозрачности оптического клина должен изменяться как

$$K(x) = m/x, \quad m = \text{const}.$$

Можно использовать и дискретный оптический клин с некоторым числом n уровней прозрачности $K(x)$.

Точность описанного способа при некоторых предположениях (оптическая чистота линз, отсутствие пыли, царапин и загрязнений фотопленки, однородность проявителя) определяется амплитудным шумом фотопленки, основной причиной которого является случайное распределение зерен фотоэмульсии. Влияние шума приведет к тому, что линия, разделяющая светлую область пленки от темной, может случайным образом перемещаться. Для большинства эмульсий дисперсия коэффициента пропускания по интенсивности определяется [7, 39] по формуле

$$\bar{\sigma}_k^2 = 4\sigma_A^2 \bar{K}, \quad \bar{K} = \bar{K}_A^2, \quad (2.34)$$

где σ_A^2 — дисперсия коэффициента пропускания по амплитуде; \bar{K} — среднее значение коэффициента пропускания по интенсивности; \bar{K}_A^2 — среднее значение коэффициента пропускания по амплитуде.

Таким образом, дисперсия σ_k^2 линейно зависит от пропускания света. Среднеквадратическое отклонение σ_k всегда значительно меньше среднего значения пропускания.

В работе [27] приведены экспериментальные характеристики некоторых типов фотопленок. Так, например, для пленки

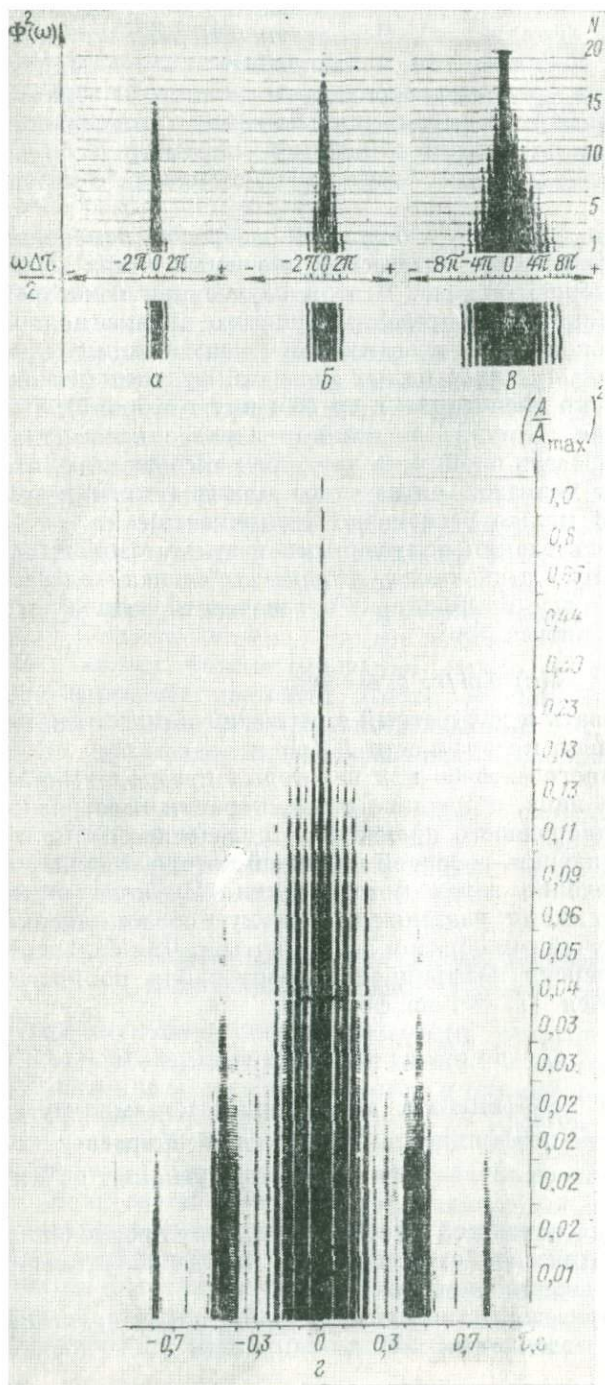


Рис. 33. Спектральный анализ прямоугольной щели (a — a) и сейсмострассы (a) с использованием оптического клина

Число уровней	Относительная интенсивность максимумов, попадающих на разный уровень оптического клина																			
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20	1,0																			
19	0,8	1,0																		
18	0,65	0,81	1,0																	
17	0,44	0,55	0,68	1,0																
16	0,30	0,38	0,46	0,68	1,0															
15	0,23	0,29	0,35	0,52	0,77	1,0														
14	0,18	0,24	0,28	0,41	0,60	0,78	1,0													
13	0,13	0,16	0,20	0,30	0,43	0,56	0,72	1,0												
12	0,11	0,13	0,16	0,24	0,35	0,46	0,59	0,82	1,0											
11	0,06	0,11	0,13	0,20	0,29	0,38	0,48	0,67	0,82	1,0										
10	0,06	0,08	0,09	0,14	0,20	0,26	0,34	0,46	0,57	0,70	1,0									
9	0,05	0,06	0,08	0,11	0,17	0,22	0,28	0,38	0,47	0,58	0,82	1,0								
8	0,04	0,05	0,06	0,09	0,14	0,18	0,23	0,32	0,39	0,47	0,68	0,82	1,0							
7	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14	0,18	0,25	0,30	0,37	0,53	0,64	0,78	1,0						
6	0,03	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,14	0,20	0,24	0,30	0,43	0,52	0,64	0,81	1,0					
5	0,02	0,03	0,04	0,05	0,08	0,10	0,13	0,18	0,22	0,26	0,38	0,46	0,56	0,72	0,88	1,0				
4	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,11	0,15	0,18	0,22	0,31	0,38	0,46	0,60	0,73	0,83	1,0			
3	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,13	0,16	0,20	0,28	0,34	0,42	0,53	0,65	0,74	0,90	1,0		
2	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,12	0,14	0,17	0,25	0,30	0,37	0,47	0,60	0,65	0,79	0,88	1,0	
1	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,10	0,12	0,15	0,22	0,26	0,32	0,41	0,50	0,56	0,68	0,76	0,86	1,0

«Микрат-200» $\sigma_A = 0,019$ при $\bar{K}_A = 0,6$. Из формулы (2.34) величина $\sigma_{\bar{K}} \approx 0,02$, откуда $\sigma_{\bar{K}}/\bar{K} \approx 0,06$. Это значит, что при использовании данного типа пленки изолиния равного почернения для $\bar{K} \approx \approx 0,36$ будет определена с погрешностью 6%, независимо от положения этой линии на плоскости.

Пример спектрального анализа прямоугольной щели шириной Δ_T приведен на рис. 33. Для этой щели был изготовлен дискретный оптический клин с числом уровней $N = 20$. На рис. 33, а — в приведен результат анализа при трех экспозициях. Определение относительной величины интенсивностей при расположении экстремумов на любом из 20-ти уровней осуществляется по табл. 3.

Необходимо выбрать ту из шкал, у которой значение единицы совпадает с положением экстремума, по отношению к которому необходимо нормировать функцию. Шкалы рассчитаны по результатам фотометрирования оптического клина. Сравнение полученных значений с расчетными показало их хорошую сопоставимость. Так, для первых трех экстремумов мы имеем теоретически: 1000 : 47 : 17, а на практике 1000 : 50 : 21.

На рис. 33, з приведена оптическая автокоррелограмма полевой трассы, полученная с использованием того же оптического клина. Из рисунка видно, что способ позволяет несложным путем получить данные об изменении интенсивности светового потока по одной координате.

Помехоустойчивость способа фотоэлектрической регистрации данных оптической обработки сейсмических материалов

При использовании фотоэлектрического способа регистрации важно знать частотную характеристику фотометрирования, под которой будем понимать кривую зависимости интенсивности светового потока от частоты в спектральной плоскости установки при равных амплитудах исходных синусоид разных частот. На рис. 34 приведена частотная характеристика для фотоэлектрической приставки, снабженной прибором Ф-107. Рассмотрение графика показывает, что максимум частотной характеристики располагается вблизи 30 Гц (кривая 1). При сканировании узкой щелью отмечается более крутой спад характеристики на частотах от 40 до 100 Гц (кривая 2). Это объясняется расхождением световой волны при удалении от центрального максимума преобразования Фурье, что приводит к расфокусированию дискретных максимумов высоких порядков. Так как практически для получения более детальной картины применяется щель шириной 0,1 мм, то необходимо вносить поправку в кривую 2 за расхождение

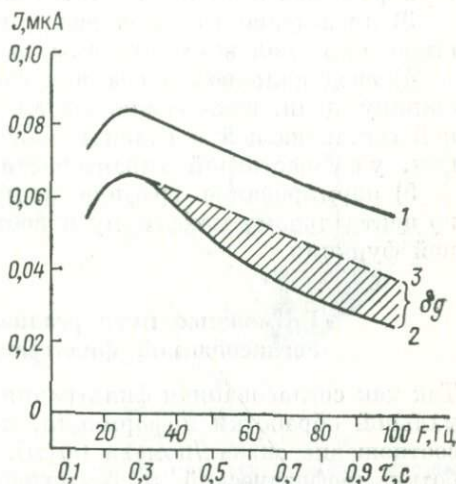
световой волны. Тогда частотная характеристика фотометрирования определится кривой 3.

Для приведения данных фотоэлектрических измерений к истинному соотношению интенсивности необходимо вводить следующие поправки.

F , Гц; τ , мс	30	40	50	60	70	80	90	100
Поправочный коэффициент	1	1.07	1.26	1.35	1.40	1.44	1.50	1.52

Рис. 34. Частотная характеристика фотометрирования, полученная с использованием селенового фотоэлемента вентильного типа.

1 — сканирование щелью 0,2 мм; 2 — сканирование щелью 0,1 мм; 3 — частотная характеристика фотометрирования щелью 0,1 мм; δg — разница в фототоках за счет расхождения световой волны при удалении от центрального максимума спектра



Учитывая, что при получении корреляционных функций преобразование Фурье применяется дважды, для ввода поправок в графики фотометрирования корреляционных функций следует использовать приведенную на рис. 34 частотную характеристику (кривая 3), возводя ее в квадрат.

Практические и теоретические исследования показывают, что в центральном максимуме корреляционной функции, полученной на лазерной установке, содержится значительная часть световой энергии, которая определяется прохождением недифрагированного света через светлые и полутоновые области микрокопии. Это так называемая постоянная составляющая центрального максимума, которая не связана с процессом корреляции сигналов сейсмических трасс, поэтому она должна быть исключена. Измерения величин постоянной составляющей по тестам с различной плотностью почернения фотошленки и варьируемым соотношением площадей светлых, полутоновых и темных участков микрокопии показали, что постоянная составляющая содержит в среднем 65% световой энергии, проходящей через микрокопию (при соблюдении оптимального технологического процесса). Поэтому центральный максимум графика фотометрирования корреляционной функции должен быть уменьшен путем умножения замеренного фототока на коэффициент 0,35.

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать следующие рекомендации по использованию фотоэлектрического способа регистрации данных спектрально-корреляционного анализа сейсмических материалов на лазерных установках:

- 1) выбор лазера со стабильным излучением;
- 2) сканирующая щель должна быть жестко скреплена с фотоприбором, чтобы световые потоки попадали на один и тот же участок фотослоя в процессе измерения;
- 3) проведение фотоэлектрических измерений с шагом, не превышающим половины ширины щели;
- 4) ввод поправок в графики фотометрирования: поправки за ширину щели, исключение темнового тока, исключение постоянной составляющей в главном максимуме корреляционной функции, учет частотной характеристики;
- 5) нормирование графика исправленных значений фототока по центральному максимуму и построение графика корреляционной функции.

Возможные пути реализации оптической согласованной фильтрации

Так как согласованная фильтрация — это один из способов оптимальной обработки информации, позволяющий максимизировать соотношение сигнал/помеха (шум), то его применение для обработки геофизической и геологической информации открывает хорошую перспективу для выделения интересующих сигналов. Важной особенностью этого вида фильтрации является формирование максимально возможного пика сигнала на шумовом фоне и то, что сигнал на выходе согласованного фильтра по форме совпадает с функцией автокорреляции входного полезного сигнала. Ранее отмечалось, что ввиду простоты и быстродействия оптический способ получения этой функции во многих случаях оказывается целесообразнее и быстрее способов цифровой обработки. Особенно большой выигрыш в скорости обработки достигается при получении оптических двумерных корреляционных функций в соответствии со связью вида (2.16). Вычисление двумерных корреляционных функций через спектры мощности удобно в задачах обнаружения неизвестных объектов (опознавание образов), так как при использовании когерентной установки можно анализировать поле достаточной протяженности и отпадает необходимость в сдвигах одного изображения относительно другого. Эта операция фактически идентична способам линейной согласованной фильтрации. Однако в этом случае необходимыми операциями являются перемножение спектра входной реализации с функцией, комплексно-сопряженной спектру эталонного изображения, и выполнение обратного преобразования Фурье. Процесс же реализации комплексных двумерных функций до недавнего времени представлял существенные трудности и стал возможным

благодаря использованию интерференционной методики регистрации фазовых соотношений, т. е. голографин.

Можно использовать более простой способ, основанный по сути дела тоже на интерференции волн анализируемого изображения и эталона. Способ заключается в том, что двумерному корреляционному анализу подвергается исходное изображение объектов и изображение эталона, представленное на том же фототранспаранте с некоторым сдвигом от анализируемого изображения.

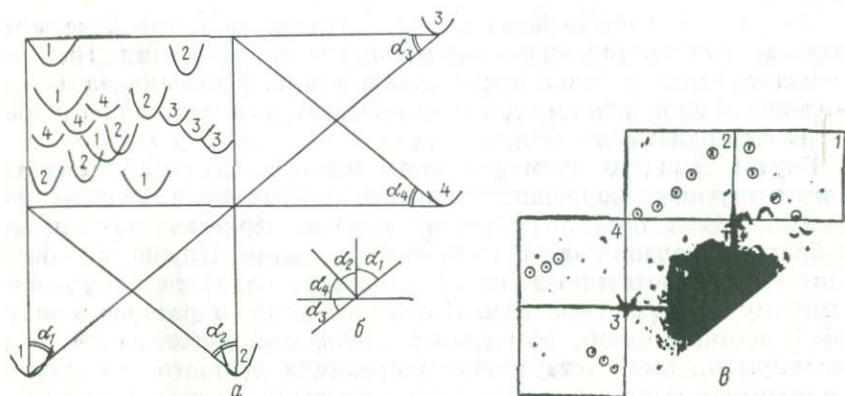


Рис. 35. Пример согласованной оптической фильтрации.

a — подготовка материала для получения двумерной корреляционной функции исходной модели и эталонов; *б* — совмещение углов «охвата» модели каждым из эталонов; *в* — коррелограмма модели с выделенными областями взаимной корреляции эталонов и соответствующих им изображений

В результате, так же как и в случае одномерного корреляционного анализа, получим наложение автокорреляционных функций в области центрального максимума двумерной коррелограммы, а на некотором расстоянии от него — максимумы функций взаимной корреляции эталона и аналогичного ему изображения. Результат этой корреляции и есть результат применения линейной согласованной фильтрации.

Принцип такого рода двумерного корреляционного анализа лежит в основе некоторых видов обработки сейсмических материалов.

Покажем на примере, как может быть выполнена операция над моделью по некоторому вееру криволинейных осей. Математически эту операцию можно представить, как двумерную функцию взаимной корреляции исходной модели $M(t, x)$ с некоторыми операторами $P(t, x)$, представляющими систему $\delta(t, x)$ функций, расположенных на криволинейных осях. Исходная модель представляет набор четырех вариантов криволинейных осей, незначительно отличающихся друг от друга кривизной и расположенных довольно произвольным образом в плоскости модели (рис. 35, *a*). Операторы, соответствующие каждому значению кривизны,

поместим от модели на некоторых расстояниях, равных ее длине по соответствующей оси. В этом случае, как следует из рис. 35, б, все четыре корреляционные функции, соответствующие каждому из операторов, будут разделены в плоскости двумерной автокоррелограммы. В силу центральной симметрии автокоррелограммы сумма углов не должна превышать 180° . В принципе, удаляя местонахождение операторов от модели, можно уменьшить соответствующие углы «охвата» и тем самым увеличить число операторов.

На рис. 35, в изображена коррелограмма, на которой четыре участка, соответствующих корреляционным функциям модели с каждым из операторов, заключены в рамки. Центральная часть корреляционной функции для нас интереса не представляет и мы ее рассматривать не будем.

Внутри каждого прямоугольника отмечаются темные пятна, соответствующие корреляции данного оператора с каждой из криволинейных осей на исходной модели. Яркость этих пятен отображает степень количественной корреляции. Кружками обведены пятна, соответствующие корреляции оператора с идентичными ему осями синфазности. В силу сходства операторов между собой, помимо пятен, обведенных кружками, наблюдается ряд максимумов, соответствующих корреляции данного оператора с кривыми модели, незначительно отличными от него по форме.

Следует отметить, что каждая криволинейная ось на модели нашла свое отражение в виде пятна корреляционной функции, что на сейсмических разрезах после Д-преобразования соответствовало бы точкам дифракции. Если допустить наличие линейной зависимости коэффициента пропускания фотопленки от экспозиции, что имеет большое значение при оптическом способе получения двумерных корреляционных функций, то весьма простыми способами можно синтезировать практически любую интерференционную систему, например направленное смещение с любым числом элементов, криволинейное суммирование по заданному годографу и т. п.

Обработка данных аэромагнитной и гравиметрической съемок

Применение ЭВМ для трансформаций геофизических полей позволило использовать весьма сложный математический аппарат и способствовало унифицированию схем трансформации. Большинство способов трансформации базируется на теории преобразования Фурье либо задача трансформации сводится к решению интеграла Пуассона.

В последние годы все большее распространение имеют способы, с помощью которых осуществляют разделение суммарных геофизических полей с позиции частотной фильтрации [40]. Общим для них является предположение о том, что результаты

наблюдений некоторого геофизического поля по профилю представляют собой некоторый стационарный случайный процесс, помеха не коррелирована и распределена по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией σ . Фиксируемое поле является аддитивной смесью помехи и искомой аномалии. Исходя из этих предположений применяют известные способы статистического обнаружения сигналов.

Представим наблюдаемое поле в виде следующей суммы

$$U_{\Sigma}(x, y) = U_p(x, y) + U_l(x, y) + \delta_{сл}(x, y), \quad (2.35)$$

где U_p , U_l — соответственно региональная и локальная составляющие поля; $\delta_{сл}$ — случайные погрешности наблюдений.

Искомая трансформация будет соответствовать некоторому частотному фильтру или оператору, наилучшим образом выделяющему U_l . Для успешного построения оператора разделения $K(\omega)$ необходимо знать статистические свойства суммарного $U_{\Sigma}(x, y)$ и локального $U_l(x, y)$ полей; исходными данными для расчета оператора разделения $K(\omega)$ могут быть функции взаимной корреляции локального поля с суммарным $R_{л,\Sigma}(\tau)$ и автокорреляционная функция суммарного поля $R_{\Sigma}(\tau)$.

Ввиду сложности решения задачи в общем виде построение точных операторов разделения производится только для некоторых типов задач. Так, решение частной задачи разделения суммарного поля двух контактных поверхностей, рельеф которых аппроксимируется белым шумом, осуществляется с помощью фильтров, соответствующих операциям пересчета вверх и вычисления производных. Но при этом для определения параметров преобразующего фильтра необходимо знать соотношение энергий локальной и региональной аномалий до фильтрации.

Задача разделения потенциальных полей способом частотной фильтрации аналогична задаче выделения сейсмического сигнала на фоне волн-помех, теория и практика решения которой довольно хорошо разработана в сейсморазведке. Так же как и в сейсморазведке, к решению задач обработки графиков маршрутных геофизических съемок можно подойти с единых позиций теории линейных систем, применив известный в настоящее время математический аппарат и технические средства реализации алгоритмов обработки. Имеющийся опыт обработки потенциальных полей на ЭВМ свидетельствует о том, что, так же как и в сейсморазведке, возможности современных цифровых машин с имеющимися вводными и выводными устройствами не способны обеспечить требуемого быстродействия при реализации алгоритмов «оптимальной фильтрации», а некоторые алгоритмы просто нецелесообразно использовать вследствие больших затрат машинного времени.

Для облегчения ряда операций и высвобождения дорогостоящего машинного времени ЭВМ от выполнения некоторых расчетов может быть использована лазерная установка.

Представим, например, аномалии общего магнитного поля в виде следующего ряда Фурье:

$$T(x, y, z) = \sum_{n=0}^{n_0} \sum_{m=0}^{m_0} \exp(-P_{mn}Z) [A_{mn} \cos k_m x \cos k_n y + \\ + B_{mn} \cos k_m x \sin k_n y + C_{mn} \sin k_m x \cos k_n y + \\ + D_{mn} \sin k_m x \sin k_n y], \quad (2.36)$$

где A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} , D_{mn} — коэффициенты ряда Фурье; $k_m = 2\pi m/L_x$, $k_n = 2\pi n/L_y$ — волновые числа по осям x , y ; $P_{mn} = (k_m^2 + k_n^2)^{1/2}$ — величина, определяющая положение аномалий; L_x , L_y — длины основных волн в направлении осей x , y ; m_0 , n_0 — самые высокие гармоники по направлениям осей x , y .

Преобразуя общее магнитное поле на его частотные составляющие, определяемые размерами и интенсивностью возмущающих масс, получим двумерный (либо одномерный) спектр, аналогичный спектру сейсмических колебаний. Следовательно, графики наблюдаемых геофизических полей можно подвергать линейной оптической фильтрации и использовать методику, разработанную для обработки сейсмических данных. Для этого материал геофизических съемок должен быть подготовлен следующим образом.

По наблюдаемым значениям поля строят графики от произвольно выбранной нулевой линии так, чтобы все значения стали положительными. Графики строят на листе белой бумаги на равном расстоянии один под другим в сжатом по оси x масштабе с целью повышения пространственных частот, а следовательно, и повышения разрешающей способности оптической фильтрации. Площади между нулевыми линиями и кривыми наблюдаемого поля заливают тушью. В таком виде графики похожи на сейсмическую запись, воспроизведенную способом переменной площади.

Уменьшенные в 20 раз изображения наблюдаемого поля подвергают оптической обработке по схеме рис. 2, а. При этом используют частотные фильтры или веерные фильтры. В случае выполнения низкочастотной фильтрации, которая равносильна процессу сглаживания (осреднения) графиков, выбирают несколько параметров пространственных фильтров, т. е. получают несколько уровней сглаживания графиков.

Положение пространственных фильтров определяет волновые параметры составляющих наблюдаемого поля, которые вычитаются или остаются. Пересчет параметров оптического фильтра в параметры поля осуществляют по формулам

$$\xi = \frac{\lambda f}{2\pi} k_m; \quad \eta = \frac{\lambda f}{2\pi} k_n, \quad (2.37)$$

где ξ , η — переменные плоскости спектра, отсчитываемые соответственно в направлениях, параллельных осям x и y ; f — фокус-

ное расстояние оптической системы; λ — длина волны лазерного излучения.

В результате оптической обработки графиков решают задачи выделения локальной и региональной составляющей наблюдаемого поля, а также осуществляют квазипересчет поля на разные уровни [25, 76]. Операция выделения региональной составляющей поля выполняется с помощью частотной оптической фильтрации,

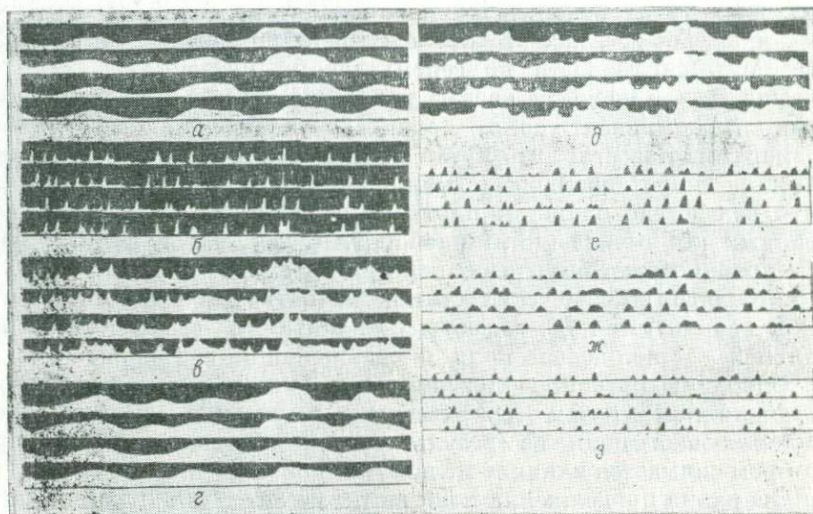


Рис. 36. Пример оптической фильтрации графиков условного геофизического поля.

а — региональная составляющая поля; *б* — локальные аномалии; *в* — суммарное поле; *г* — результат выделения региональной составляющей поля оптическим фильтром; *д* — вариант сглаживания графика наблюдаемого поля; *е* — результат выделения локального поля по данным оптической фильтрации; *ж*, *з* — данные квазипересчета поля соответственно вниз и вверх

при которой снимают изображения высоких частот, связанные с локальными аномалиями. Выделение локальной составляющей поля непосредственно фильтром не всегда возможно, так как низкочастотные составляющие спектра, соответствующие региональному полю, располагаются близко к центральному максимуму двумерного спектра. В связи с этим невозможно провести фильтрацию без того, чтобы не затронуть область центрального максимума, а это ведет к искажению результата фильтрации. Поэтому для выделения локального поля рекомендуется способ, при котором результат выделения региональной составляющей поля накладывают на исходные графики и остаточное поле снимают на кальку.

На рис. 36 приведены результаты оптической фильтрации искусственно созданных графиков, имитирующих результат

сложения региональной и локальной составляющих поля. Результаты обработки говорят о сопоставимости исходного (рис. 36, а) и выделенного оптическим фильтром условного регионального поля (рис. 36, з). Результаты графического вычитания региональной составляющей из суммарного поля (рис. 36, е) свидетельствуют о соответствии исходной (рис. 36, б) и выделенной локальной составляющей поля (рис. 36, е).

Направление осей положения возмущающих масс может быть получено путем использования веерной оптической фильтрации графиков так же, как это проводится при выделении определенных осей синфазности по сейсмическому материалу.

Пересчетом полей на разные уровни достигается эффект снятия влияний компонент поля, характеризующихся определенными размерами. Известно, что путем продолжения поля вниз снимают влияние коротковолновых компонент, которые могут возникнуть вследствие слишком плотного размещения сети точек, выбранных для вычислений, и наоборот. Квазипересчет поля на разные уровни может быть выполнен при анализе графиков маршрутных геолого-геофизических съемок на оптическом фильтре. Для этого используют приемы, осуществляемые при выделении региональной составляющей поля и сглаживании графиков.

Операцию квазипродолжения поля локальных аномалий вниз осуществляют путем графического вычитания региональной составляющей поля из результата осреднения графиков, при котором снимается влияние мелких компонент поля и флуктуаций.

Операция продолжения поля вверх заключается в графическом вычитании результата осреднения, при котором захвачены компоненты определенных размеров, из исходных графиков. Для вычитания графики накладывают один на другой и через чертежный стол на кальку переносят разницу между ними.

Результаты квазипересчета искусственного поля вверх и вниз приведены на рис. 36, ж, з.

О точности оптического квазипересчета полей на разные уровни можно судить по приведенным ниже результатам обработки данных аэромагнитной съемки на ЭВМ БЭСМ-4 и на лазерной установке. Для обработки использованы графики $|\Delta T|_a$ по шести профилям. Длина каждого профиля составляет 600 км, расстояние между профилями 20 км.

При трансформации наблюдаемого магнитного поля $|\Delta T|_a$ на ЭВМ применен алгоритм, построенный на основе использования круговой палетки с 13 радиусами. Расчетная схема этой трансформации сводится к вычислению интеграла свертки вида

$$U_{\text{тр}} = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\rho) \bar{U}(\rho) d(\rho), \quad (2.38)$$

где $K(\rho)$ — ядро преобразования (весовая функция); $\bar{U}(\rho)$ — среднее значение наблюдаемого поля на окружности радиусом ρ .

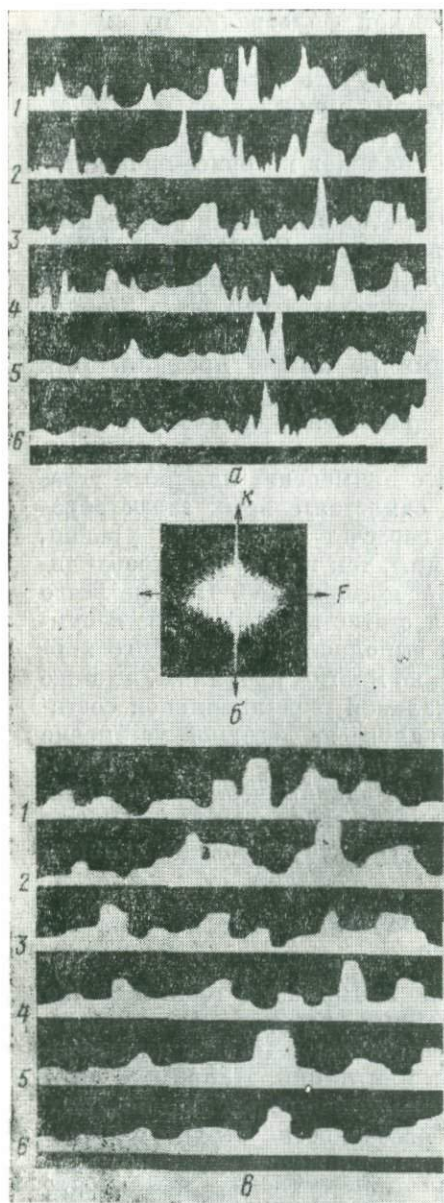


Рис. 37. Графики аэромагнитной съемки (а), двумерный спектр данных аэромагнитной съемки (б) и вариант низкочастотной оптической фильтрации графиков (в)

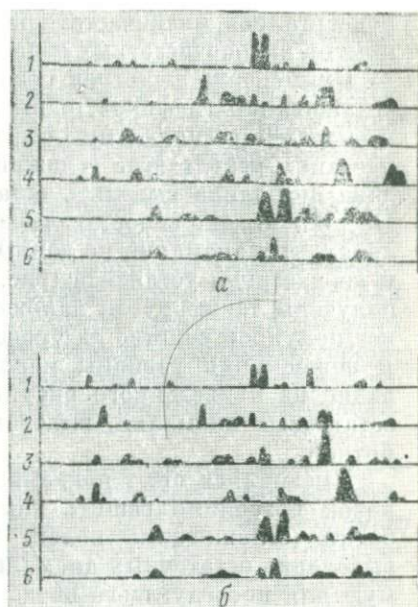


Рис. 38. Сопоставление результатов выделения остаточных магнитных аномалий по данным обработки наблюдаемого поля на ЭВМ БЭСМ-4 (а) и на лазерной установке (б)

Пересчет в верхнее полупространство выполнен на уровне +2, +5, +10, +15 км с выдачей остаточного поля на этих уровнях. Подготовленные по этим шести профилям графики (рис. 37, а) подвергались низкочастотной оптической фильтрации путем закрытия высокочастотных областей двумерного спектра (рис. 37, б).

Применение фильтров позволило получить несколько уровней сглаживания графиков, один из которых приведен на рис. 37, в, и выделить региональную составляющую магнитного поля. Интерпретация результатов сглаживания графиков по описанной методике позволила выделить остаточные локальные аномалии поля. На рис. 38 дано сопоставление результатов выделения остаточных локальных аномалий по данным обработки на БЭСМ-4 (рис. 38, а) и на лазерной установке (рис. 38, б). При этом данные рис. 38, а получены также путем наложения результатов пересчета в верхнее полупространство на уровень +2 км на наблюдаемые графики и перенесения разницы между ними на линию профиля. Как видно из приведенного рисунка, отмечается хорошее совпадение остаточных аномалий, выделенных цифровой и оптической обработкой.

Имеющийся опыт показывает, что применение лазерных установок позволило решить как ряд самостоятельных задач обработки (сглаживание полей, квазипересчет на разные уровни, выделение остаточных аномалий и др.), так и получать необходимую для последующего ввода в ЭВМ информацию. Прежде всего это касается возможности изучения статистических свойств суммарного и локального полей путем выполнения оптического корреляционного анализа одновременно по многим профилям, а также изучения соотношений энергий локальной и региональной составляющих поля путем проведения анализа на лазерной установке с фотоэлектрической регистрацией получаемых данных. Методика спектрально-корреляционного и динамического анализа, разработанная применительно к данным сейсморазведки, может быть использована и при анализе других геофизических данных.

Методика оптической обработки геологических материалов

Для развития оптической обработки информации геологические материалы представляют чрезвычайный интерес. В геологии весьма распространена модель, представляющая распределение на плоскости совокупности штрихов или линий. Например, поле тектонических разрывов, по площадному распределению которых можно судить об индивидуальных особенностях структурно-геологических зон. Другой очень распространенной моделью является карта изолиний, различных двумерных распределений, гипсометрических отметок рельефа, планы гидросети и т. п. Часть моделей представлена в виде двумерного распределения оптической плотности фототранспарантов — аэрофото- и космиче-

ские снимки, фотографии и микрофотографии палеонтологических и литолого-петрографических объектов, фотографии ландшафтов, обнажений горных пород и т. д. Информативная емкость этих моделей, как правило, очень велика. Например, аэрофотоснимок масштаба 1 : 200 000 содержит 10^7 — 10^8 бит информации. При существующей обработке геологических материалов, базирующейся на ручных способах, из такой обильной информации извлекается лишь незначительная и не всегда самая полезная часть.

Поскольку в геологии проблема затраты времени при обработке больших массивов информации превалирует над проблемой высокой точности расчетов, указанные трудности можно исключить, используя быстродействующие оптические методы обработки информации. Многомерный характер преобразований и высокая пропускная способность оптического канала позволяют максимально использовать высокую информативность геологического материала, которая не полностью учитывается и при применении современных ЭВМ.

Оптическая обработка геологических материалов основывается на тех же принципах, что и обработка геофизической информации. При этом используют лазерные установки, собранные по схемам рис. 2 или 4. Оптическую фильтрацию осуществляют в области спектра, закрывая его определенные области заслонками в виде изображенных на рис. 3 или 4, I—VII.

В случае частотной фильтрации аэрофотоснимков и других фотоизображений чаще используют круговые диафрагмы и заслонки специальных форм. Наряду с качественной обработкой, при которой выделяют изображения определенных объектов и результат регистрируют на фотоленку, широко применяют количественные способы анализа, используя фотоэлектрическую регистрацию данных оптической обработки геологических материалов.

Среди разнообразия приемов фотоэлектрической регистрации результатов обработки геологических материалов на лазерных установках наиболее часто используют веерное сканирование двумерного преобразования Фурье (спектра) исходной информации [79].

Методика выполнения фотоэлектрических измерений заключается в том, что клинообразную щель с углом при вершине в n градусов вращают вправо и влево относительно оси двумерного спектра в фокальной плоскости оптической системы лазерной установки через $n/2$ градусов, описывая при этом конечную дугу в 180° , так как вторая половина спектра симметрична первой. Соответствующие положению щели световые потоки измеряют ФЭУ либо фотоэлементом, установленным в плоскости отфильтрованного изображения, и регистрируют стрелочным гальванометром либо перописцем.

По данным фотоэлектрических измерений строят полярную диаграмму, по которой определяют преобладающее направление

распределения элементов на исходном оригинале и их количественное соотношение. При построении роз-диаграмм значения световых потоков при том или ином положении щели относят к середине фиксируемого интервала. Путем двойного перекрытия удастся избежать пропуска граничных направлений, но это не гарантирует от возможных погрешностей за счет недостаточно точной установки щели.

При проведении измерений большое значение имеет правильная экранизация (отсекание) центрального или нулевого максимума спектра. При полном его пропуске регистрирующий прибор не реагирует на различие интенсивностей света по разным азимутальным направлениям, т. е. нулевой максимум уравнивает как бы эти различия своим мощным световым потоком. При значительной экранизации центрального максимума двумерного спектра можно потерять изображения низкочастотных деталей исходного объекта. Исходя из этих рассуждений и практики проведения работ по фотометрированию, экранирование нулевого максимума необходимо производить точкой диаметром 1—1,5 мм.

При обработке, например, штриховых карт геологических трещин такой способ получения количественной характеристики объекта аналогичен способу построения розы-диаграммы, известному в геологии.

По сравнению со способами обработки отфильтрованных фотографических изображений, фотоэлектрическая регистрация обладает одним преимуществом — позволяет более оперативно обрабатывать разные участки карты, аэроснимка и т. п., сравнивать их между собой и получать сведения о направлении и величине напряжений, характерных для каждого из них. Использование способа фотоэлектрической регистрации при оптической фильтрации исходных изображений является одним из тех перспективных направлений, развитие которого должно существенно уменьшить трудоемкость обработки исходных геологических материалов, повысить количество и качество информации, извлекаемой из этих материалов [37, 77].

Опознавание образов

Существующие в настоящее время способы опознавания образов в палеонтологии, геоботанике и биологии основаны на визуальном анализе объектов. Сопоставление их с известными образцами является основанием для отнесения их к определенным классам и группам. Однако визуальное рассмотрение объектов не всегда приводит к правильным выводам, качество и надежность опознавания зависит от квалификации исследователя и сохранности изучаемого объекта. В то же время известно, что определенные виды растений и организмов имеют свою, характерную только для них, структуру скелета. В связи с этим фотоснимок остатков фауны и флоры будет представлять для пучка когерентного света

своеобразную дифракционную решетку, которой должен соответствовать свой спектр. Анализ спектров и сопоставление их с эталонным позволит надежнее классифицировать изучаемые объекты, независимо от их внешнего вида.

Процесс опознавания заключается в фотографировании объекта со шлифа или с натуры, получении на лазерной установке спектров, их фотографировании и сопоставлении с тестовыми спектрами от образцов различных классов и групп организмов или растений. Однако способ, основанный на сопоставлении спектров, не позволяет достичь высокой точности, так как существуют формы, отличающиеся по своему виду, но имеющие близкие спектры. Кроме этого, случайные положения и ориентация исследуемого объекта, а также случайный характер изменения его формы сводят задачу автоматического анализа к задаче обнаружения объекта с неполностью известными параметрами.

Поэтому точность и надежность опознавания образов повышаются при использовании способа согласованной фильтрации.

Методика опознавания в этом случае заключается в том, что на одном фототранспаранте располагают до 200 эталонных изображений определенной фауны или флоры и поочередно накладывают на этот фототранспарант исследуемые объекты и микрофильмируют. Каждый микрофильм подвергают двумерному корреляционному анализу по методике, изложенной выше. Объект будет относиться к тому виду или классу эталона, функция взаимной корреляции которого с исследуемым объектом будет давать интенсивный максимум на коррелограмме.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретические и экспериментальные исследования, разработка новых способов анализа исходной информации и аппаратуры позволили наметить пути использования лазерных установок и определить задачи, которые могут быть решены с помощью этих установок. Изучение возможностей оптической обработки, разработка и внедрение методических приемов и технологии проведены в основном на сейсмических материалах, полученных в разнообразных сейсмогеологических условиях Советского Союза и ряда территорий зарубежных стран. Объем сейсмических материалов, обработанных только в Центральном геофизическом тресте, составляет более 30 тыс. км. Объем оптической обработки материалов других геофизических и геологических методов значительно меньше. Часть материалов анализировалась с целью выяснения возможностей способов оптической обработки при решении некоторых методических задач, обработка же большей части геофизических и геологических данных носила производственный характер.

Опробование оптической фильтрации сейсмических разрезов МОВ, полученных в зоне солянокупольной тектоники, и материалов вертикального сейсмического профилирования показало весьма высокую результативность способов [24, 59]. Это позволило уже в 1967—1969 гг. применить оптическую фильтрацию для анализа указанных материалов на практике.

На большом объеме экспериментального материала доказана эффективность применения оптической фильтрации при обработке данных МОВ и МОГТ, осложненных кратными волнами [64, 89, 93], при обработке материалов, полученных в сложных сейсмологических условиях платформ [28, 51, 86]. В настоящее время внедрен способ оценки эффективности систем МОГТ [68], увеличиваются объемы спектрально-корреляционного анализа с целью решения ряда прикладных задач [24, 29, 67, 71]; внедряются в практику способы обработки гравимагнитных и аэромагнитных данных [25, 76], способы дешифрирования аэрофотоснимков и анализа разнообразной геологической информации [37, 77].

В связи с невозможностью изложения всех результатов применения лазерных установок остановимся на отдельных, наиболее характерных задачах.

Анализ волнового поля

Анализ волнового поля осуществляют обычно по материалам зондирования МОВ и МОГТ, обрабатываемых с целью изучения низко- и высокоскоростных волн-помех. Для анализа на лазерных установках сейсмические записи воспроизводят способом переменной плотности (рис. 39, *a*) или площади с АРУ и без АРУ, на открытом канале или широкополосной фильтрации и на филь-

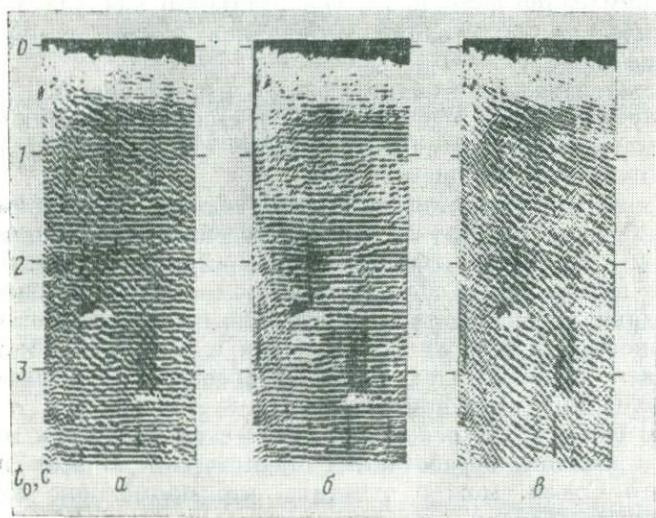


Рис. 39. Волновая картина сейсмического зондирования МОВ.

a — записи, воспроизведенные на фильтрации, оптимальной для выделения отраженных волн; *b* — результат оптического вычитания волн-помех; *v* — результат оптического выделения волн-помех

трациях, которые предварительно считаются оптимальными как для выделения отраженных волн, так и для выделения волн-помех.

Кинематические характеристики волн изучают по воспроизведениям, выполненным на широкополосной фильтрации с АРУ, а также на фильтрациях, оптимальных для выделения тех или иных волн. При помощи клинообразной заслонки осуществляют постепенную фильтрацию по кажущимся скоростям путем последовательного увеличения угла заслонки до исчезновения всех волн-помех, наблюдаемых на экране телевизора в процессе фильтрации исходного материала. Затем вычитают отраженные волны и выделяют либо все волны-помехи, либо какую-то группу, характеризующуюся определенным диапазоном значений кажущейся

скорости. Такой способ анализа позволяет установить, регистрируются ли на сейсмограммах волны-помехи с иными кажущимися скоростями, чем те, что видны на первичных воспроизведениях [41, 56, 82].

Нередко можно видеть, что та или иная группа волн-помех, особенно высокоскоростных, не выделяется на фоне сложной волновой картины. В процессе же оптической обработки эта группа сразу же отмечается по двумерному спектру, а путем оптической фильтрации удается выделить эту группу волн из общей волновой картины и изучить ее характеристики [56]. В этом отношении применение двумерного спектрального анализа и двумерной оптической фильтрации материалов зондирований трудно переоценить.

С целью изучения кинематических характеристик кратных волн осуществляют одномерный спектрально-корреляционный анализ материалов сейсмозондирований с получением обычных и текущих автокоррелогограмм [73].

Динамические характеристики выделенных оптическим фильтром волн также изучают по воспроизведениям с АРУ и без АРУ (см. гл. 2). Применяя фотоэлектрический способ регистрации, получают амплитудные спектры волн-помех и отраженных волн, амплитудные характеристики определенных волн и соотношения интенсивностей отдельных групп помех и полезных волн. Если при записи использовался ПРУ, то сравнивают интенсивности волн с близкими временами прихода.

Таким образом, на основании оптической обработки материалов зондирований, отработанных практически во всех районах Советского Союза, можно отметить, что применение лазерных установок позволяет:

- 1) вычистить волны-помехи и тем самым улучшить корреляцию отраженных волн;
- 2) выделить волны-помехи и разделить их по значениям кажущихся скоростей;
- 3) получить амплитудные спектры и амплитудные характеристики по всем группам волн;
- 4) определить соотношение сигнал/помеха и относительные интенсивности волн разных групп;
- 5) определить кинематические параметры кратных волн.

Эти выводы и данные количественного анализа помогают рассчитать оптимальные параметры интерференционных систем для подавления помех.

Некоторые параметры группирования сейсмодатчиков или источников возбуждения могут быть рассчитаны на основе анализа двумерного спектра материалов сейсмозондирования. Методика базируется на следующих представлениях.

При дискретной регистрации сейсмических волн с шагом Δx двумерному спектру, описываемому выражением (1.8), будет

соответствовать двумерный периодический по оси k спектр вида

$$\Phi(k, F, \Delta x) = C \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \Phi_0(k + mk_0, F) \quad (3.1)$$

где $k_0 = (\Delta x)^{-1}$; Φ — энергетический спектр.

Если верхняя граница спектра непрерывной информации $k_{\max} \leq k_0/2$, то спектры непрерывной и дискретизированной информации в области волновых чисел $k \leq k_0/2$ будут идентичны по форме, т. е.

$$\Phi(k, F, \Delta x) = C\Phi_0(k, F). \quad (3.2)$$

Если амплитуда регистрируемой волны изменяется вдоль профиля, т. е. волна неидеально-регулярная $g(x, t) = a(x) [t - (x)/v]$, то ее двумерный спектр

$$\Phi_0(k, F) = A(k) \left(\frac{F}{v} - k \right) v(F), \quad (3.3)$$

где $A(k) \approx a(x)$.

Формула (3.3) показывает, что дифракционное изображение волны в области спектра преобразования Фурье совпадает с прямой $F = kv$, если кажущаяся скорость волны не зависит от частоты. При расчете параметров группы сейсмоприемников и источников нужно только знать диапазон волновых чисел волн-помех $k_{\min} - k_{\max}$. Для волны-помехи с кажущейся скоростью v_k

$$k_{\min} = F_{\min}/v_k, \quad k_{\max} = F_{\max}/v_k,$$

где $F_{\min} - F_{\max}$ — диапазон частот помехи, выделяемый по двумерному спектру.

Основные низкочастотные волны-помехи имеют обычно кажущиеся скорости до 1000 м/с, в связи с чем при частотах менее 50 Гц максимальные значения волновых чисел волн-помех не превышают $k_{\max} = 50/1 = 50 \text{ км}^{-1} = 0,05 \text{ м}^{-1}$. Шаг между сейсмоприемниками в группе выбирают не более чем

$$\Delta x_{\max} = (k_1 + k_{\max})^{-1}. \quad (3.4)$$

Здесь k_1 — нижняя граница пропускаемых группой волновых чисел при относительном выборе Δx

$$k_1 \geq \frac{k_{\max}}{n-1}, \quad (3.5)$$

где n — число элементов однородной группы.

Из выражения (3.4) имеем

$$\Delta x \leq \frac{n-1}{nk_{\max}}. \quad (3.6)$$

Например, при $n = 8$ получим $\Delta x \leq 7/(8 \cdot 0,05) \leq 17 \text{ м}$. Если, например, k_{\min} соответствует волне-помехе с кажущейся

скоростью 2,5 км/с и нижняя граница частоты равна 25 Гц, то $k_{\min} = 25/2500 = 0,01 \text{ м}^{-1}$. Для полного подавления регулярной составляющей таких помех необходима группа с базой не менее $1/k_{\min} = 100 \text{ м}$.

По результатам анализа материалов, полученных в Централь-ных районах Русской платформы, отмечено, что на различных участках прослеживаются в целом одни и те же типы волн-помех

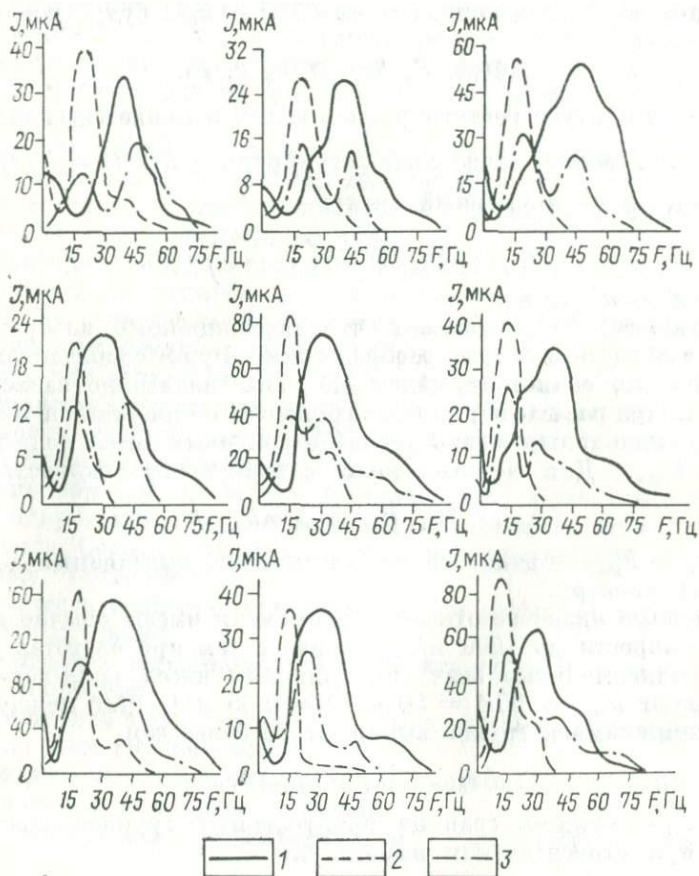


Рис. 40. Результаты спектрального анализа сейсмических зондирований МОВ, выполненных на различных участках Русской платформы.

1 — амплитудные спектры отраженных волн; 2, 3 — амплитудные спектры волн-помех с кажущимися скоростями соответственно до 1000 м/с и от 1000 до 2000 м/с

(см. рис. 39), а различия в соотношениях интенсивностей волн различных типов создает существенное различие видимой волновой картины. Низкоскоростные волны-помехи имеют кажущиеся скорости от 200 до 2000 м/с, частотный состав их в целом ниже, чем продольных отраженных волн; по интенсивности низкоскорост-

ные волны-помехи могут на порядок и более превышать отраженные волны, регистрирующиеся на тех же временах.

Амплитудные спектры (рис. 40) волн-помех с кажущимися скоростями до 1000 м/с, как правило, узкие с максимумом на частоте 10—20 Гц. Спектры волн с кажущимися скоростями 1000—2000 м/с обычно имеют два максимума: один в полосе частот 15—20 Гц, второй в полосе частот 25—35 Гц. Спектры отраженных волн в 1,5—2 раза шире спектров волн-помех и имеют максимум в полосе частот 35—45 Гц.

Обработка и анализ данных ВСП

Волновая картина, наблюдаемая при ВСП, в значительной степени осложнена обилием волн, падающих сверху вниз, а также наличием волн-помех, обусловленных условиями работы в глубоких обсаженных скважинах. Это затрудняет прослеживание отраженных волн и заставляет искать пути для улучшения их прослеживания.

Задача оптической фильтрации данных ВСП является наиболее простой, так как в большинстве случаев регистрируются волны с различными кажущимися скоростями и прямолинейными или близкими к прямолинейным осями синфазности. Методика обработки определяется для каждого конкретного монтажа ВСП в зависимости от сложности волновой картины и особенностей сейсмогеологического разреза. При обработке результатов продольного профилирования решают следующие задачи:

- а) выделение отдельно падающих и восходящих продольных волн на фоне волн-помех;
- б) ослабление волн-помех, связанных с вибрацией обсадной колонны в местах плохого цементирования затрубного пространства, а также с условиями работы в глубоких обсаженных скважинах;
- в) ослабление промышленных помех частотой 50 Гц;
- г) изучение частотного состава падающих и отраженных волн, определение их относительной интенсивности;
- д) изучение закономерностей изменения частотного состава падающих и восходящих волн в зависимости от глубины исследования и времени регистрации волн;
- е) определение кинематических характеристик кратных волн с помощью автокоррелограмм;
- ж) определение динамических характеристик падающих и восходящих волн.

При обработке данных непродольного профилирования дополнительно решают задачи:

- а) выделение отдельно или вместе падающих и отраженных обменных волн на фоне продольных волн и волн-помех;
- б) выделение поперечных отраженных волн, если обмен произошел в верхней части разреза и далее волна распространяется как поперечная;

в) изучение частотного состава обменных волн и закономерностей его изменения по глубине исследования.

На рис. 41 приведен пример обработки сейсмограммы продольного ВСП в условиях помех, вызванных вибрацией кондуктора и обсадной колонны в местах плохого цементирования трубного пространства, а также при наличии волн-помех Лэмба. Снятие волн Лэмба позволило очистить запись и выделить

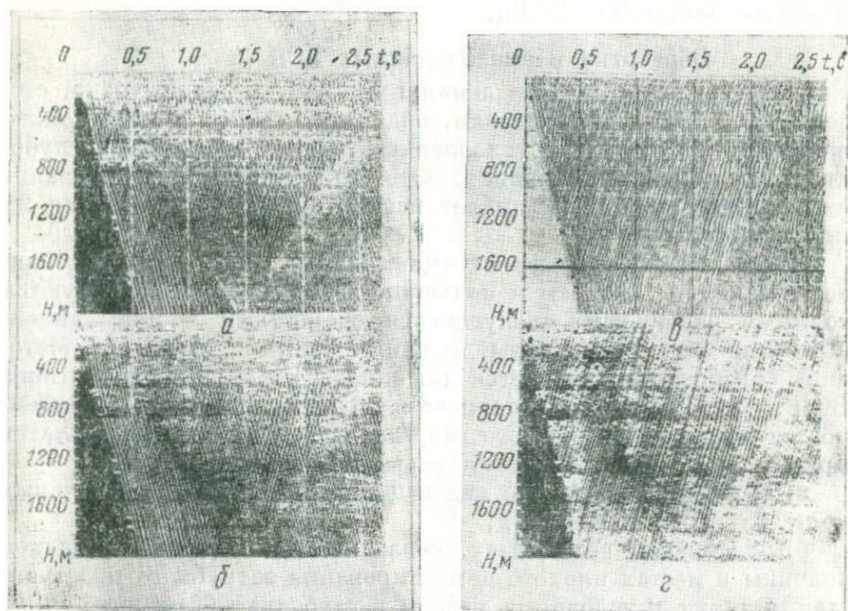


Рис. 41. Оптическая обработка данных продольного ВСП.

а — сейсмограмма, характеризующая особенности волновой картины; *б* — результат оптического вычитания помех; *в*, *г* — результаты выделения отраженных волн соответственно способом направленного суммирования и оптическим способом

продольные волны в интервале глубин 0—600 м (рис. 41, *б*). Это очень важно, так как помехи не позволяли получить информацию о волновом поле в верхней части исследуемой скважины, что затрудняло изучение вопросов, касающихся механизма образования кратных и частично-кратных волн, которые в районе Московской синеклизы являются основными мешающими волнами при работах МОВ [24, 28, 68]. Следующий вариант оптической фильтрации позволил выделить только восходящие волны на фоне волн-помех и падающих кратных волн (рис. 41, *г*). После оптической фильтрации корреляция отраженных волн возможна до поверхности. Для сравнения на рис. 41, *в* приведена запись, полученная на ПСЗ-4М с блоком универсального смещения (БУС) с целью прослеживания восходящих волн.

При работах на непродольных профилях трудности прослеживания волн на сейсмограммах ВСП возрастают в связи с увеличением на записи числа волн за счет появления обменных волн. Последние поляризованы в плоскости падения и при значительных углах подхода к сейсмоприемнику могут давать большую Z-составляющую, превышающую нередко по интенсивности амплитуды продольных волн, регистрируемых на тех же временах. Данные

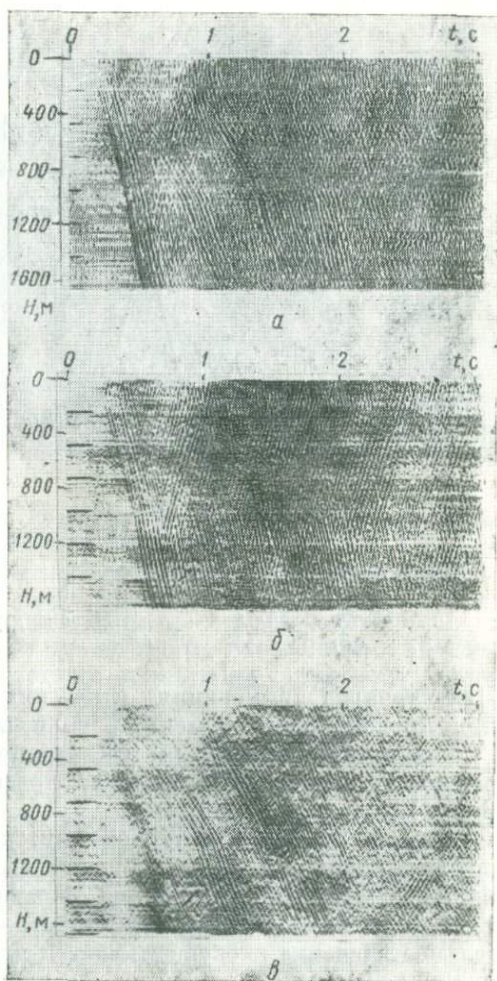


Рис. 42. Оптическая обработка данных непродольного ВСП.

a — исходная сейсмограмма;
б — результат вычитания помех и обменных волн; *в* — вариант выделения обменных волн

ВСП, полученные в различных районах и обработанные на лазерных установках, свидетельствуют, что обменные волны присутствуют почти повсеместно. Они рассматриваются как помехи при изучении продольных волн, но в других случаях являются полезными и их нужно выделять на фоне продольных волн.

На рис. 42 приведен пример обработки сейсмограммы продольного ВСП по одной из скважин Южного Мангышлака. На данном участке неглубоко (менее 100 м) залегает кровля пласта, характеризующегося высокой скоростью распространения волн; наличие этой жесткой границы приводит к появлению на записи интенсивных проходящих обменных волн типа PS , которые затрудняют корреляцию восходящих продольных волн (рис. 42, а).

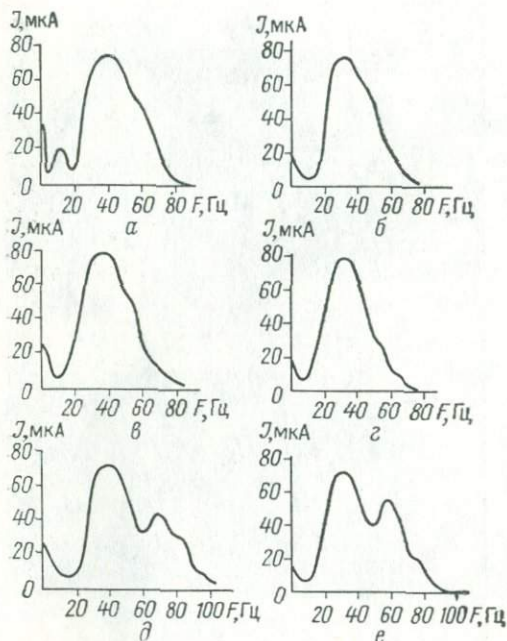


Рис. 43. Данные частотного анализа материалов ВСП (скв. Д-1 Московской синеклизы).

а, б — спектры восходящих волн, регистрируемых соответственно в интервале 0—1700 и 1700—2800 м; в, г — то же, но при удалении пункта взрыва на 300 м; д, е — спектры вибрационных волн-помех соответственно для верхней и нижней частей разреза

Два варианта применения оптических фильтров с целью выделения продольных и обменных волн приведены на рис. 42, б, в.

Результаты оптической фильтрации исходных данных ВСП переносят на сводный разрез, пример которого приведен на рис. 11, б.

Работы по частотному анализу, как правило, предшествуют оптической фильтрации и проводятся с целью изучения особенностей спектрального состава падающих и восходящих волн. Но в ряде случаев изучение частотного состава имеет самостоятельное значение и осуществляется для установления закономерностей изменения частоты по площади или по глубине исследований.

Результаты определения амплитудных спектров волн по данным ВСП, полученным по скважинам южного склона вала Карпинского, показывают, что максимумы спектров падающих и восходящих волн находятся в полосе частот 30—40 Гц. Спектры восходящих волн обычно несколько уже спектров падающих

волн. На отдельных площадях отмечаются сложные спектры с максимумом, сдвинутым в сторону высоких частот. Данные определения амплитудных характеристик волн, зарегистрированных при работах ВСП на участках этого района, иллюстрируют уменьшение амплитуды падающих волн по мере увеличения глубины и восходящих волн по мере приближения их к поверхности. Результаты анализа по данным ВСП (см. рис. 32) на Шад-

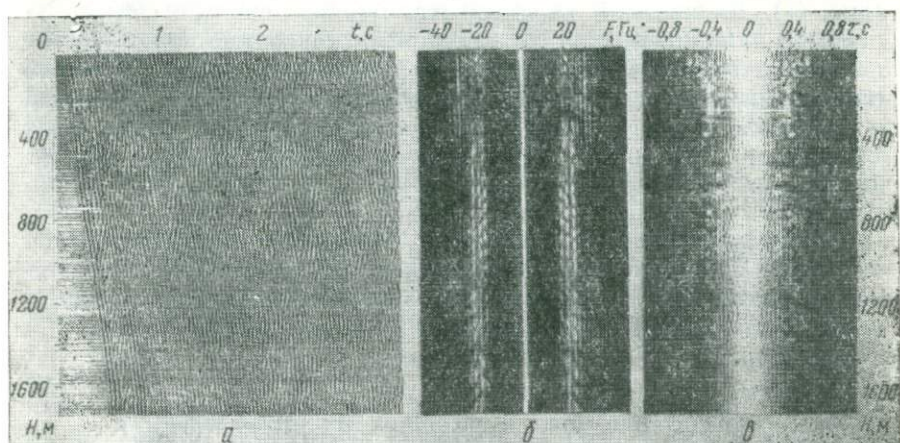


Рис. 44. Спектрально-корреляционный анализ данных ВСП. (скв. Пошехонье-1 Московской синеклизы).

а — сейсмограмма ВСП; б — одномерный спектр; в — автокоррелограмма

жинской площади отчетливо показывают, что общий характер поведения графиков соответствует известному принципу уменьшения амплитуды колебаний при удалении от источника. На фоне общего уменьшения интенсивности светового потока (что соответствует уменьшению амплитуды сейсмических колебаний) отмечается ряд максимумов и минимумов, приуроченных к границам изменения скоростей распространения сейсмических волн (отражающим границам). Примечательно, что области понижения и повышения значений амплитуд на графиках, соответствующих трем различным волнам, коррелируются между собой. Это дает основание использовать аналогичные графики для уточнения местоположения границ, разделяющих среды с различными акустическими жесткостями.

Некоторые результаты изучения частотного состава волн по материалам ВСП, полученным в районе Московской синеклизы, приведены на рис. 43 и позволяют отметить как смещение максимума спектра в полосе частот 5—10 Гц по мере увеличения глубины на 1700 м, так и незначительное смещение спектра в области

низких частот при удалении пункта взрыва на 300 м. Вибрационные волны-помехи имеют широкий сложный спектр, который полностью перекрывает спектр полезных волн. Этим объясняется безуспешность попыток ослабления вибрационных помех обычными аппаратурными средствами.

Для выяснения кинематических особенностей различного типа кратных волн, распределенных по стволу скважины, определенную помощь оказывают автокорреллограммы сейсмограмм ВСП (рис. 44). Дискретный характер одномерного спектра свидетельствует о наличии кратных отражений, а корреляционный анализ позволяет отметить, что наиболее интенсивные кратные волны с периодом повторения 0,4 с образуются в верхней части разреза в интервале глубин 0—400 м. Здесь же формируется несколько типов частично-кратных волн с другими периодами. По всей глубине отмечаются кратные волны с периодом 0,15—0,25 с, являющиеся волнами-спутниками.

Таким образом, анализ данных ВСП на лазерной установке открывает широкие возможности для извлечения полезной информации, на основе которой можно более обоснованно выбирать методику дальнейших исследований и интерпретации получаемых материалов.

Разделение волн в условиях их интерференции при наземных наблюдениях МОВ

Сейсмические материалы МОВ, полученные в разнообразных сейсмологических районах, часто осложнены кратными волнами, наличие которых значительно снижает эффективность сейсморазведочных работ. Несмотря на разработанные к настоящему времени способы подавления кратных волн, они продолжают оставаться в большинстве районов основной помехой. Это заставляет искать новые пути и средства для ослабления кратных волн. Некоторые возможности в этом отношении дает оптическая фильтрация; при этом главным условием ее применения является наличие разницы в частоте или в кажущейся скорости однократных и кратных волн.

Известно, что характер кратных волн зависит как от особенностей сейсмогеологических условий, так и от вида сейсморазведки (морская, наземная, нефтегазовая, рудная). Для оптического фильтра неважна природа кратных волн и если есть указанная разница, то задача может быть решена простыми средствами.

Опыт применения оптического фильтра при обработке большого объема сейсмических материалов свидетельствует, что в результате подавления кратных волн упрощается корреляция однократных волн, повышается надежность увязки отражений и построение структурных карт. Эффективность применения оптической фильтрации материалов МОВ можно показать на примере двух разведочных площадей: Шар-Царынской и Сандовской,

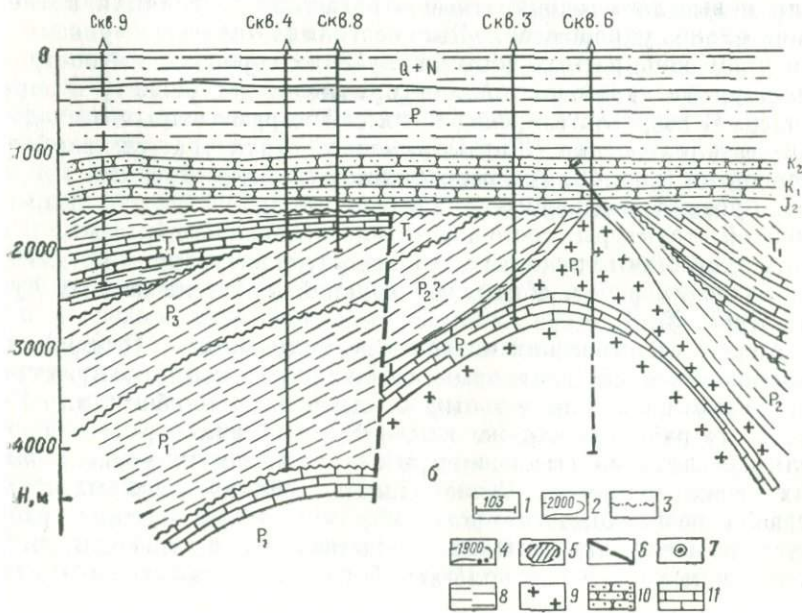
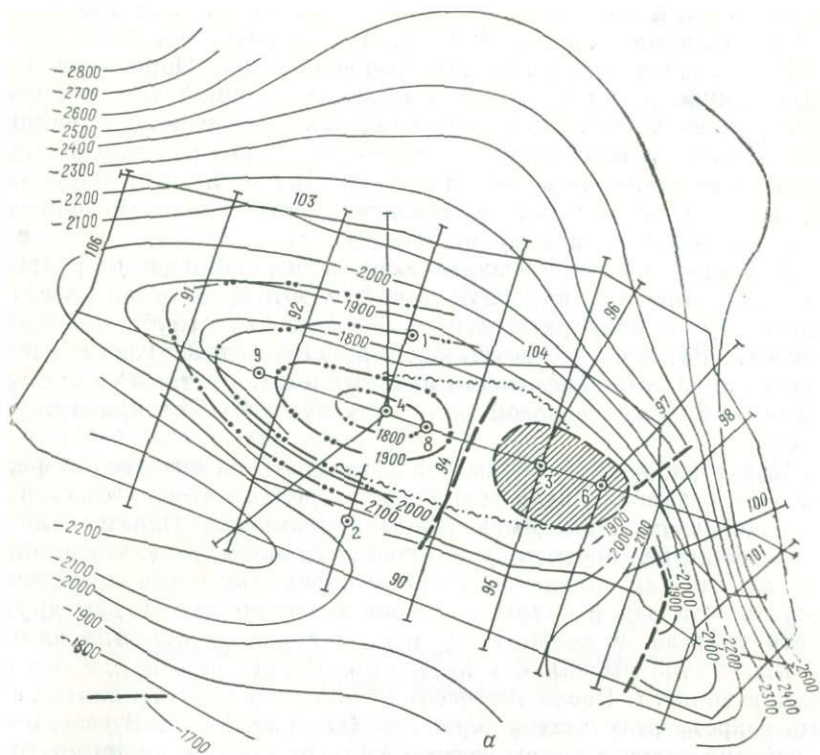
расположенных в юго-западной части Прикаспийской впадины и Центральных районах Русской платформы [93].

В геологическом отношении разрез на Шар-Царынской площади можно разбить на два комплекса. Нижний залегает несогласно на верхнем и с ними связана нефтесперспективность района. В этом комплексе обнаруживаются в основном локальные структуры и стратиграфические ловушки. Верхний комплекс — это терригенные отложения, залегающие горизонтально; он является основной кратнообразующей толщей.

Кратные волны, образующиеся в верхней части разреза, имеют бесконечную кажущуюся скорость и отличаются по этому параметру от однократных волн, связанных с глубокими горизонтами. Различие в кажущихся скоростях создает разницу в углах наклона осей синфазности кратных и однократных волн в пределах $1-2^\circ$ в присводовой части структур и $5-7^\circ$ в прибортовых зонах.

При обработке временных разрезов МОВ на оптическом фильтре они разбивались на секции, в пределах которых фильтр по кажущейся скорости имел разные параметры. Одним положением фильтра достичь удовлетворительного результата было нельзя, так как положение фильтра оптимальное для одной части разреза или одной волны являлось не оптимальным для другой части разреза, и наоборот. В пределах одного профиля длиной 20 км обычно выделялось пять-семь секций по оси x и две-три секции по оси t . После оптических фильтраций составлялись сводные разрезы результатов обработки (см. рис. 10, б). В результате обработки разреза на оптическом фильтре снято влияние кратных волн и выделены однократные отражения, корреляция которых значительно упрощается. Это позволило провести увязку по контурам однократных волн от глубоких горизонтов и построить структурные карты по юрским горизонтам и горизонту в пермтриасе. В результате проведенных сейсморазведочных исследований детализирована Шар-Царынская структура по глубоким горизонтам (рис. 45, а) и передана под глубокое бурение. По данным бурения подтверждено наличие западного крыла Шар-Царынской структуры, восточное крыло осложнено сбросами. В области отсутствия триасовых отложений, оконтуренной по данным сейсмических работ, обнаружен соляной купол по данным бурения (рис. 45, б).

Анализ сейсмических материалов, полученных в Центральных районах Русской платформы, выявил существенные различия в волновом поле сопредельных участков. Однако общим для Центральных районов, так же как и Русской платформы в целом, является наличие высокоскоростных волн-помех, уровень которых резко меняется. Разнородность сейсмического материала вызвала необходимость проведения комплекса опытных работ, которые предшествовали производственным и проводились на оптическом фильтре с целью выбора оптимальных параметров



оптической фильтрации для улучшения прослеживания волн, отраженных от горизонтов девона и додевона, имеющих обычно кажущуюся скорость, близкую к бесконечности.

В результате этих исследований следует отметить следующее.

1. Высокоскоростные волны-помехи можно ослабить в том случае, если используются двусторонние относительно оси частот заслонки с веером раскрытия 20° и смещенные одна относительно другой на угол не более 15° . При этой фильтрации без искажений остаются волны, оси синфазности которых прослеживаются на временном разрезе горизонтально или с наклоном не более $10-14^\circ$ к горизонту.

2. Фильтрацию по кажущейся скорости нужно проводить совместно с фильтрацией по частоте, при которых полосовым фильтром снимают частоты в пределах $10-22$ Гц, соответствующих волнам-помехам, а низкочастотным фильтром обрезают частоты выше $35-40$ Гц, соответствующие нерегулярному шуму и промышленным помехам частотой 50 Гц.

3. Параметры низкочастотного и полосового фильтров обычно мало меняются вдоль профиля, в то время как параметры фильтра по кажущейся скорости зависят от наклона границ. На участках, где залегание близко к горизонтальному, оптимальной следует считать фильтрацию, при которой используются заслонки с веером раскрытия $7-27$ или $5-25^\circ$ вправо и влево от оси частот, т. е. при шаге между каналами 1 мм пропускаются только волны с кажущейся скоростью более $25\,000$ м/с.

Материалы МОВ, полученные в условиях Волдайского прогиба на Сандовской площади, характеризуются сложной волновой картиной, обусловленной наложением на отраженные волны интенсивных помех различного типа, отличающихся по кажущимся скоростям от отраженных волн, в результате чего корреляция волн становится практически невозможной. В результате оптической фильтрации данных МОВ улучшена прослеживаемость отраженных волн вследствие вычитания волн-помех. По данным комплексной машинной обработки была осуществлена увязка отраженных волн по контурам и построены структурные карты по условным девонским горизонтам и силуру [93].

По результатам применения оптического фильтра при обработке материалов Русской платформы отмечено, что применение оптической фильтрации улучшает прослеживание волн, имеющих

Рис. 45. Структурная карта (а) и геологический разрез (б) по Шар-Царынской площади.

1 — профили МОВ и их номера; 2 — изогипсы (в м) по IV отражающему горизонту в триаса; 3 — область отсутствия IV отражающего горизонта по данным комплексной машинной обработки; 4 — изогипсы (в м) по II пачке известняков триаса (по данным бурения); 5 — область отсутствия триасовых отложений по данным бурения; 6 — тектонические нарушения; 7 — скважины разведочного бурения; 8 — глины; 9 — коренные породы; 10 — песчаники; 11 — известняки

кажущуюся скорость, близкую к бесконечности. Хотя сама по себе эта задача и очень важна, но при этом существует опасность улучшения прослеживания и кратных волн, особенно частично-кратных, которые присутствуют на сейсмическом временном разрезе и не отличаются по кинематическим признакам от однократных волн. Большой геологической эффективности от применения аналоговых или цифровых машин в комплексе с оптическим фильтром можно добиться при обработке материалов МОГТ [28, 51, 64].

Следует отметить, что при интерпретации материалов этих районов большое значение имеет знание точного положения первой жесткой границы. Но на многих участках строение таково, что оно близко подходит к поверхности, вследствие чего не может быть четко прослежена по сейсмическим разрезам. В то же время эта граница является источником образования интенсивных многократных волн. В этих условиях интерпретация автокоррелограмм, полученных оптическим способом по всем разрезам, дает возможность оценить не только поле кратных волн, но и уточнить положение первой опорной границы [67, 99]. Анализ особенностей прослеживания вторичных максимумов автокоррелограммы позволяет контролировать местоположение нарушенных зон и осуществлять увязку отражающих горизонтов по обе стороны сброса [71].

При обработке сейсмических материалов, полученных в условиях солянокупольной тектоники Днепровско-Донецкой, Припятской, Германской, Прикаспийской впадин, а также в условиях горизонтального залегания соли Западно-Сибирской низменности и других территорий, лазерные установки применялись для решения следующих задач: улучшения прослеживания отражений от горизонтов в подсолевой толще и кровле соли, выделения крутых осей синфазности в присводовой части соляных куполов, разрешения сложной волновой картины, улучшения прослеживания отражений от подсолевых горизонтов, спектрально-корреляционного анализа с целью определения кинематических характеристик кратных волн и выбора оптимальных фильтраций. Количество возможных вариантов оптической фильтрации по частоте, кажущейся скорости и волновому числу зависит от сложности волновой картины, степени геолого-геофизической изученности района исследований и характера задач. Оптическую обработку материалов обычно проводят секционным способом. В пределах каждой секции подбирают фильтры, наиболее оптимальные для выделения интересующей интерпретатора волны на фоне интерференции с другими волнами. Приведенные на рис. 46 фрагменты оптической фильтрации с целью выделения или вычитания некоторых волн иллюстрируют возможности применения лазерных установок при обработке такого рода материалов.

В период освоения оптических способов обработки (1967—1969 гг.) были сопоставлены результаты оптической фильтрации

и метода РНП, дающего наибольший эффект при разведке соляных куполов. Уже тогда было отмечено, что оптическая обработка дает близкие к МРНП результаты [56] и сокращает время обработки. В качестве примера можно привести результаты обработки

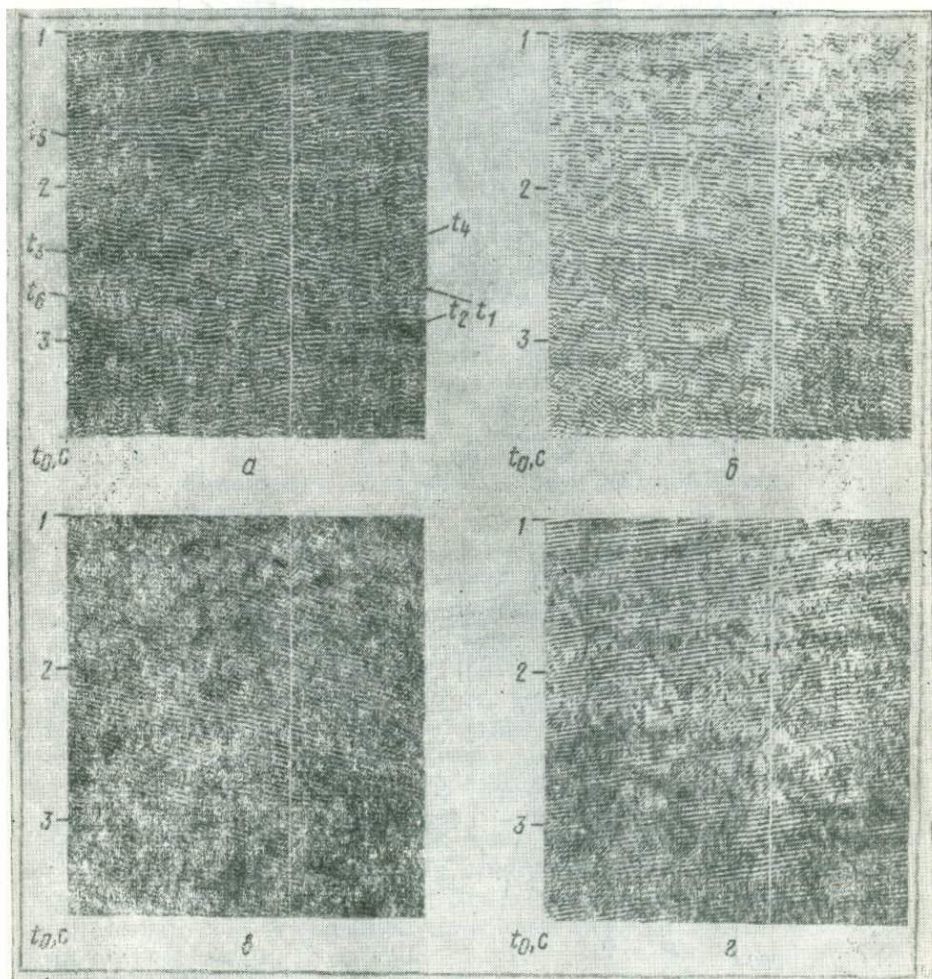


Рис. 46. Варианты применения оптической фильтрации для выделения или вычитания волн.

a — оригинал временного разреза; *б* — выделение волн с v_1 ; *в* — вычитание группы волн с v_4 ; *г* — выделение волн с v_4 .

материалов многократного профилирования МРНП и МОГТ и водноточечного МОВ на оптическом фильтре по профилю в Прикаспийской впадине. Результаты обработки, приведенные на

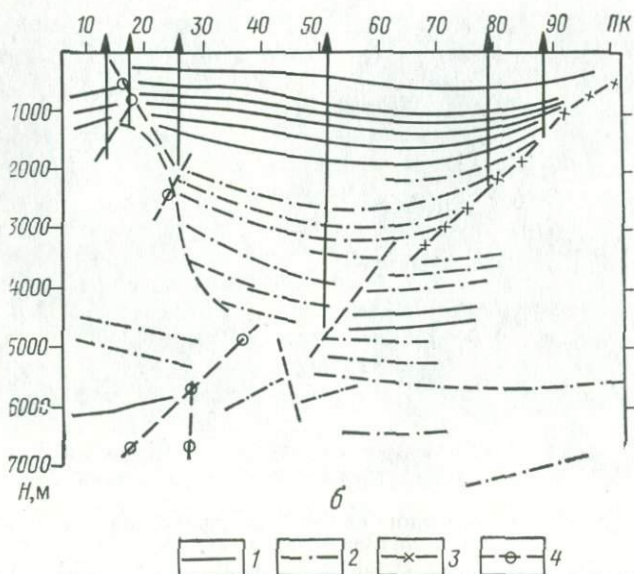
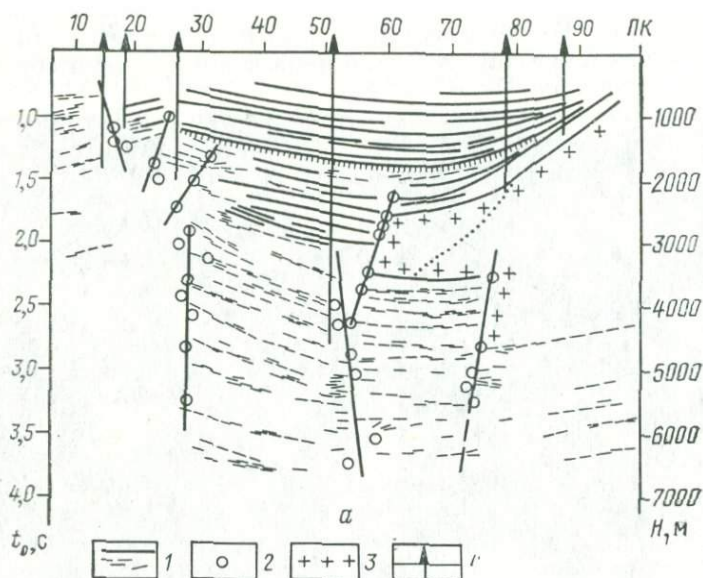


Рис. 47. Сейсмические разрезы.

а — данные МРНП: 1 — отражающие горизонты, 2 — узлы дифракции, 3 — соль; б — данные оптической фильтрации: 1 — отражающие горизонты, построенные по данным ПСЗ, 2 — отражающие горизонты, построенные по результатам оптической фильтрации, 3 — боковая стенка купола, 4 — нарушения

рис. 47, показывают на удовлетворительное совпадение данных МРНП и оптической фильтрации с некоторыми отличиями по глубоким горизонтам, что объясняется особенностями исходной информации и способов обработки.

Полученные впоследствии данные бурения довольно неплохо совпали с построениями, выполненными по данным оптической фильтрации и МРНП.

Материалы морской сейсморазведки часто характеризуются сложной волновой картиной, в значительной степени обусловленной влиянием кратных волн-помех реверберационного типа. Эти помехи обычно регистрируются с такой же длительностью, как и у полезной волны, их свойства тесно связаны с толщиной водного слоя и особенностями строения морского дна. Опыт оптической обработки материалов, полученных при работах в Черном, Балтийском, Карибском и других морях, свидетельствует о полезности применения оптического фильтра для ослабления кратных и других волн-помех, если они отличаются от однократных по кажущейся скорости и частоте. В этом случае обработка не отличается от той, которая применяется при решении задач сухопутной сейсморазведки на нефть и газ.

Применение оптических систем при обработке данных метода ОГТ

В общем комплексе машинной обработки сейсморазведочных данных МОГТ оптические способы могут применяться как для повышения соотношения сигнал/помеха на временных суммарных разрезах, так и для анализа временных разрезов с целью выделения тектонических нарушений, оценки эффективности подавления кратных волн системами ОГТ и решения ряда других задач. При этом оптические системы применяются в комплексе с аналоговыми машинами типа ПСЗ-4М либо с ЭВМ. В том и другом случае получают дополнительную информацию, важную для интерпретации сейсмических материалов, и значительный экономический эффект. На современных ЭВМ невозможно относительно быстро реализовать необходимый для повышения геологической эффективности метода ОГТ программно-алгоритмический комплекс, вследствие чего результаты обработки на ЭВМ ни по качеству, ни по скорости их получения часто не отличаются от обработки на ПСЗ-4М.

В настоящее время при обработке на ЭВМ практически не применяется даже обычная частотная фильтрация из-за больших затрат машинного времени. Так, на фильтрацию одной сейсмической трассы затрачивается около 30 с времени ЭВМ БЭСМ-4, поэтому частотная фильтрация, как правило, осуществляется на аналоговых машинах.

Для оптического фильтра операция частотной селекции волн является самой простой и осуществляется одновременно для

временного разреза, состоящего из нескольких стен сейсмических трасс. Получаемый при этом результат не отличается от результата обработки на ЭВМ, что можно проиллюстрировать приведенным на рис. 48 примером. Качество прослеживаемости основных отраженных волн и их динамическая выразительность на временных разрезах ОГТ с цифровой и оптической фильтрациями практически одинаковы.

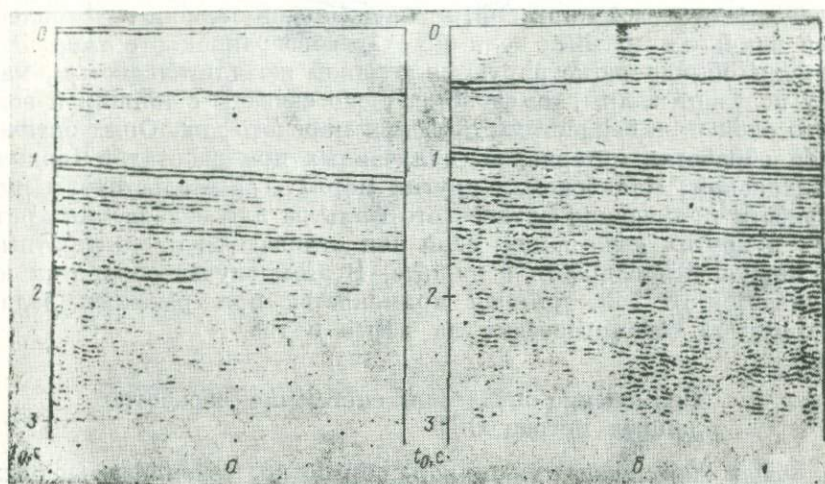


Рис. 48. Результаты обработки на ЭВМ (а) и на оптическом фильтре (б)

Время, необходимое для оптической частотной фильтрации, в 20 раз меньше (с учетом всех технологических процедур на лазерной установке) времени при цифровой фильтрации на ЭВМ второго поколения, а стоимость подобной обработки временных разрезов ОГТ уменьшается в 40 раз. Данное сравнение проведено с самой быстродействующей полосовой рекурсивной фильтрацией, осуществляемой на ЭВМ БЭСМ-4, при которой на фильтрацию одной трассы затрачивается приблизительно 10 с. Поскольку существуют еще большие резервы в улучшении технологии оптической обработки, то запас быстродействия частотной оптической фильтрации можно увеличить по крайней мере на порядок.

Помимо частотной фильтрации с высокой эффективностью применяется обычно веерная фильтрация или фильтрация по кажущейся скорости, с помощью которой улучшают прослеживание опорных отражений.

Улучшение прослеживания полезных волн

Объем оптической обработки материалов МОГТ исчисляется несколькими тысячами километров сейсмических профилей, отрабатанных в самых разнообразных сейсмогеологических условиях.

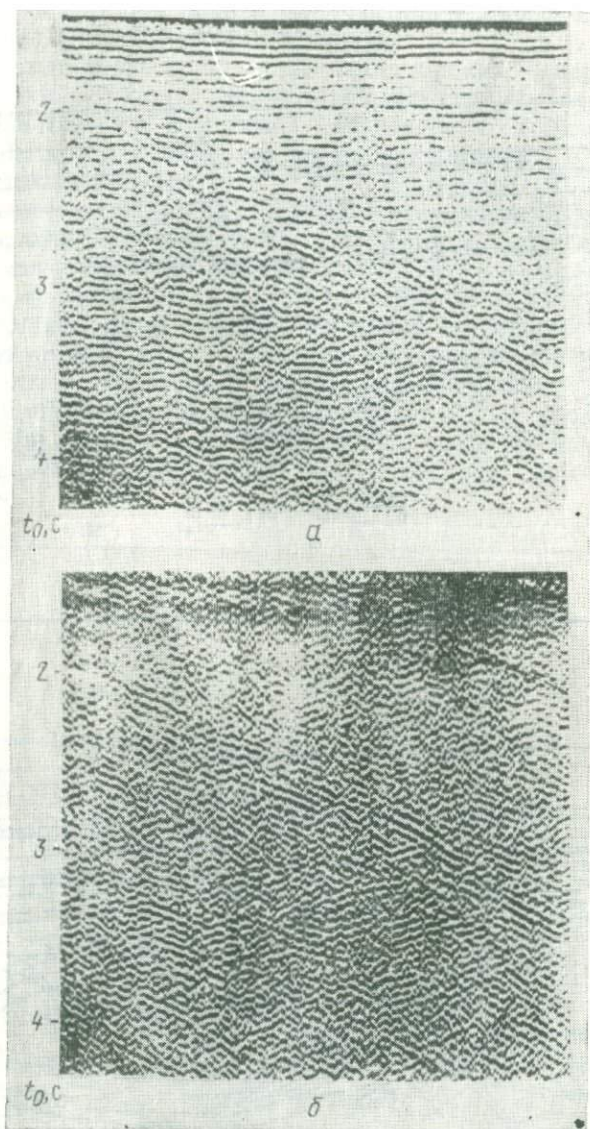
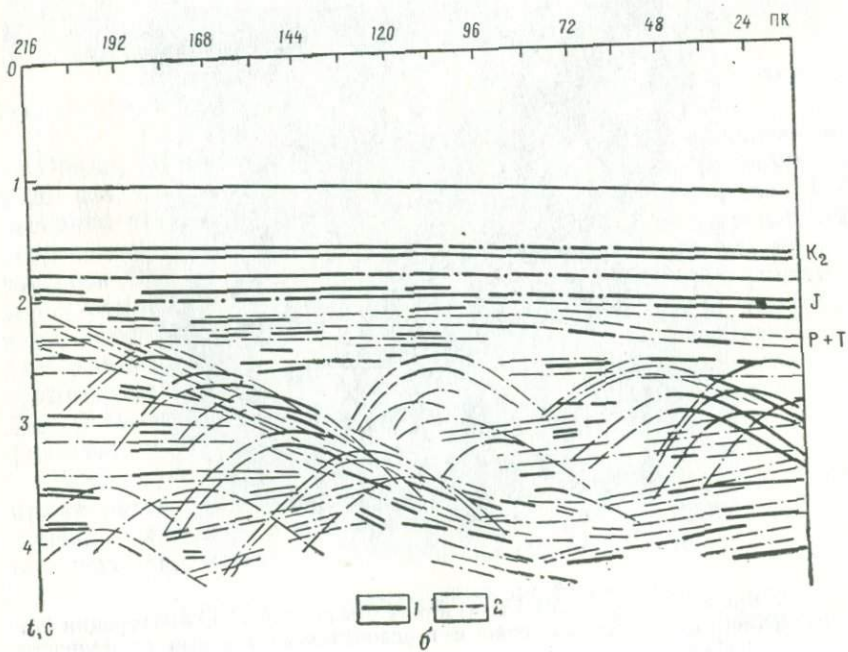
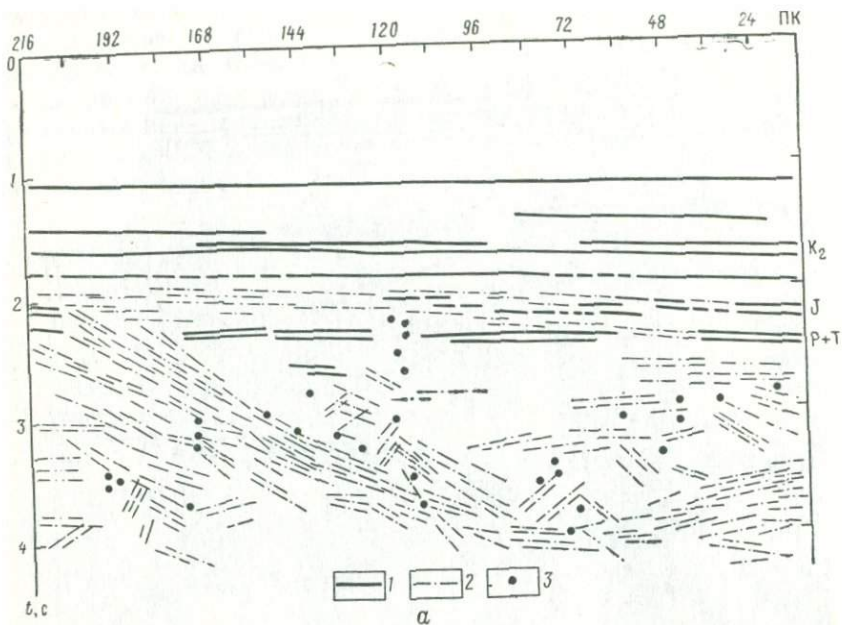


Рис. 49. Временной разрез МОГТ (а) и результат оптической фильтрации (б), направленной на вычитание волны с горизонтальными осями синфазности



Обработке подвергались материалы как отдельных профильных, так и площадных исследований методом ОГТ.

Приведем результаты применения оптической фильтрации при обработке материалов одного из участков южного склона вала Карпинского (Комсомольская площадь).

Продуктивной здесь считается толща юрских — пермо-триасовых отложений, от горизонтов которой регистрируются отражения в интервале 1,5—4 с. Эта толща характеризуется очень сложной структурой, которая наиболее полно раскрывается в результате суммирования по 12-кратным и более системам ОГТ. По данным одноточечного профилирования МОВ в этом временном интервале регистрируются многократные волны, формирующиеся в верхней части разреза и имеющие интенсивность в несколько раз большую, чем однократные волны от глубоких горизонтов. Они имеют бесконечную кажущуюся скорость в отличие от однократных отражений, связанных с горизонтами несогласно залегающей толщ по отношению к горизонтам верхнего структурного этажа.

В результате суммирования по системам ОГТ кратные волны ослабевают, однако некоторые из них остаются еще довольно интенсивными и затрудняют прослеживание полезных волн

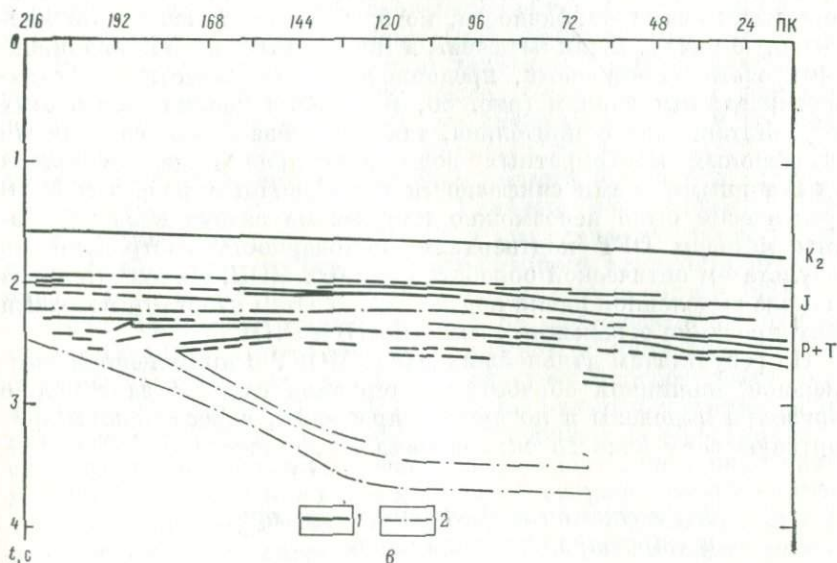


Рис. 50. Сводные разрезы (профиль 15 южного склона вала Карпинского).

a — результаты оптической фильтрации материалов одноточечного профилирования МОВ: 1 — отражения, построенные по данным воспроизведения записи, 2 — отражения, построенные по данным оптической фильтрации записей МОВ, воспроизведенных способом переменной плотности, 3 — минимумы голографов дифрагированных волн, выделенных по разрезам МОВ; *b* — результаты оптической фильтрации материалов 12-кратного перекрытия МОГТ: 1 — отражения, построенные по результатам суммирования данных МОГТ, 2 — отражения, построенные по данным оптической фильтрации разреза МОГТ; *в* — результаты ФОВ и МРНИ: 1 — отражения, построенные по данным ФОВ, 2 — отражения, построенные по данным МРНИ

(рис. 49, а). Применением оптической фильтрации их удается либо вычистить, либо значительно ослабить и тем самым повысить соотношение сигнал/помеха. На рис. 49, б приведен один из вариантов оптической фильтрации участка временного разреза ОГТ. В данном случае сняты волны, имеющие кажущуюся скорость, близкую к бесконечности. В результате улучшено прослеживание волн, имеющих наклонные оси синфазности. По другим вариантам оптической фильтрации, направленным на выделение дифрагированных и других волн, составлен сводный разрез, который приведен на рис. 50, б. Из его рассмотрения видно, что отдельные горизонты отраженных волн, которые коррелируются дискретно по разрезу, образуют пачку, резко выклинивающуюся на север в сторону вала Карпинского. На эти волны накладываются дифрагированные волны, образование которых может быть связано как с выклиниванием горизонтов, так и с нарушениями. Множество дифрагированных волн свидетельствует о сложной тектонике структурного этажа района исследований, что отрицалось до проведения здесь работ МОГТ.

Следует отметить, что ранее по результатам оптической фильтрации материалов одноточечного профилирования МОП по этому профилю были выделены отдельные волны с наклонными и очень короткими осями синфазности, которые тоже образовывали аналогичную пачку. Были намечены и минимумы волн с криволинейными осями синфазности, предположительно отнесенных к дифрагированным волнам (рис. 50, а). Однако достоверность этих результатов была сомнительна, так как из-за сильного влияния интенсивных многократных волн визуальное выделить волны с наклонными осями синфазности по первичным разрезам МОВ практически было невозможно или весьма затруднительно. Работы методом ОГТ подтвердили достоверность построений по результатам оптической обработки данных МОВ. Дополнительное наличие выделенной пачки подтверждено затем работами методами фокусирования отраженных волн (ФОВ) и РНП.

По результатам дальнейших работ МОГТ с применением комплексной машинной обработки материалов глубоко залегающие горизонты выделены и по другим профилям, пересекающим припортовую зону южного склона вала Карпинского.

Выделение тектонических нарушений и структурных осложнений

Для повышения геологической информативности данных МОГТ применялся спектрально-корреляционный анализ, проводимый для обнаружения тектонических нарушений, флексуобразных перегибов и зон выклинивания горизонтов. Из множества аномальных изменений результатов спектрально-корреляционного анализа временных разрезов МОГТ выбирали такие, которые имели сходные характеристики. При этом учитывали зависимость

корреляционных функций от сейсмогеологических условий. В работе [99] показано, что при согласном залегании кратнобразующих горизонтов и их наклоне до 15° присутствие на записи кратных волн еще будет отражаться функцией автокорреляции, т. е. побочные максимумы будут еще устойчивы.

Эффективность использования данных спектрально-корреляционного анализа при интерпретации разрезов МОГТ можно проиллюстрировать рис 51. В результате 6-кратного суммирования по ближним к пункту взрыва (до 1400 м системам) ОГТ получен временной разрез (рис. 51, а), по которому качество прослеживания отражений значительно повысилось по сравнению с однократным профилированием МОВ и результатами суммирования по дальним от пункта взрыва системам ОГТ (1400—2800 м).

Однако данные анализа оптическими способами свидетельствуют, что улучшение это видимое и произошло за счет суммирования кратных волн, о чем говорит как дискретный одномерный спектр (рис. 51, б), так и наличие на автокоррелограмме интенсивных побочных максимумов (рис. 51, в). Результаты анализа позволяют наметить нарушение в области флексуобразного осложнения отражающих горизонтов по разрыву активной полосы одномерного спектра с резким смещением ее в область высоких частот (см. рис. 51, б) и исчезновению в области нарушения побочного максимума автокорреляционной функции (см. рис. 51, в).

Дополнительную информацию получают по функциям взаимной корреляции сейсмических трасс. Если сброс не сопровождается изменением мощностей, то главный максимум функции взаимной корреляции между временным разрезом МОГТ и эталонной трассой резко меняет свое положение на оси τ ; сдвиг соответствует амплитуде сброса. Главный же максимум ФВК между временным разрезом МОГТ и его сдвинутой по оси x копией обрисовывает грабен, ширина которого соответствует величине сдвига по оси x , а амплитуда — амплитуде сброса [99].

Если флексуобразный перегиб не сопровождается изменением мощностей отложений (во временном представлении по обе стороны перегиба), то отмечаются следующие особенности поведения корреляционных функций. Те побочные максимумы функций автокорреляции, которые характеризуют реверберационные системы, не включающие дневную поверхность, не меняют своего положения на оси τ при переходе через флексуобразный перегиб. Побочные максимумы функции автокорреляции, связанные с реверберационными системами, включающими дневную поверхность, плавно меняют свое положение на оси τ вдоль профиля, с большей точностью отражая амплитуду флексуры. Главный максимум функции взаимной корреляции между сейсмическим разрезом и эталонной трассой также плавно сдвигается по оси τ в соответствии с амплитудой флексуры во временном представлении. Главный максимум функции взаимной корреляции между разрезом и его сдвинутой по оси x копией обрисовывает

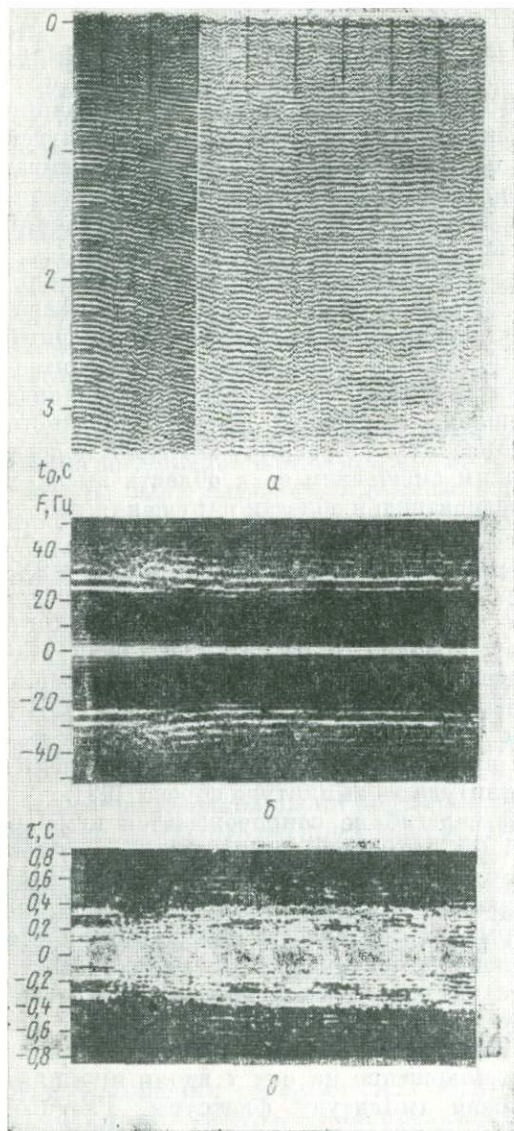


Рис. 51. Данные оптического спектрально-корреляционного анализа для интерпретации разрезов МОГТ.

a — временной разрез 16-кратного суммирования по ближним к пункту взрыва системам ОГТ (Московская синеклиза); *б* — одномерный спектр разреза МОГТ; *в* — автокоррелограмма разреза МОГТ

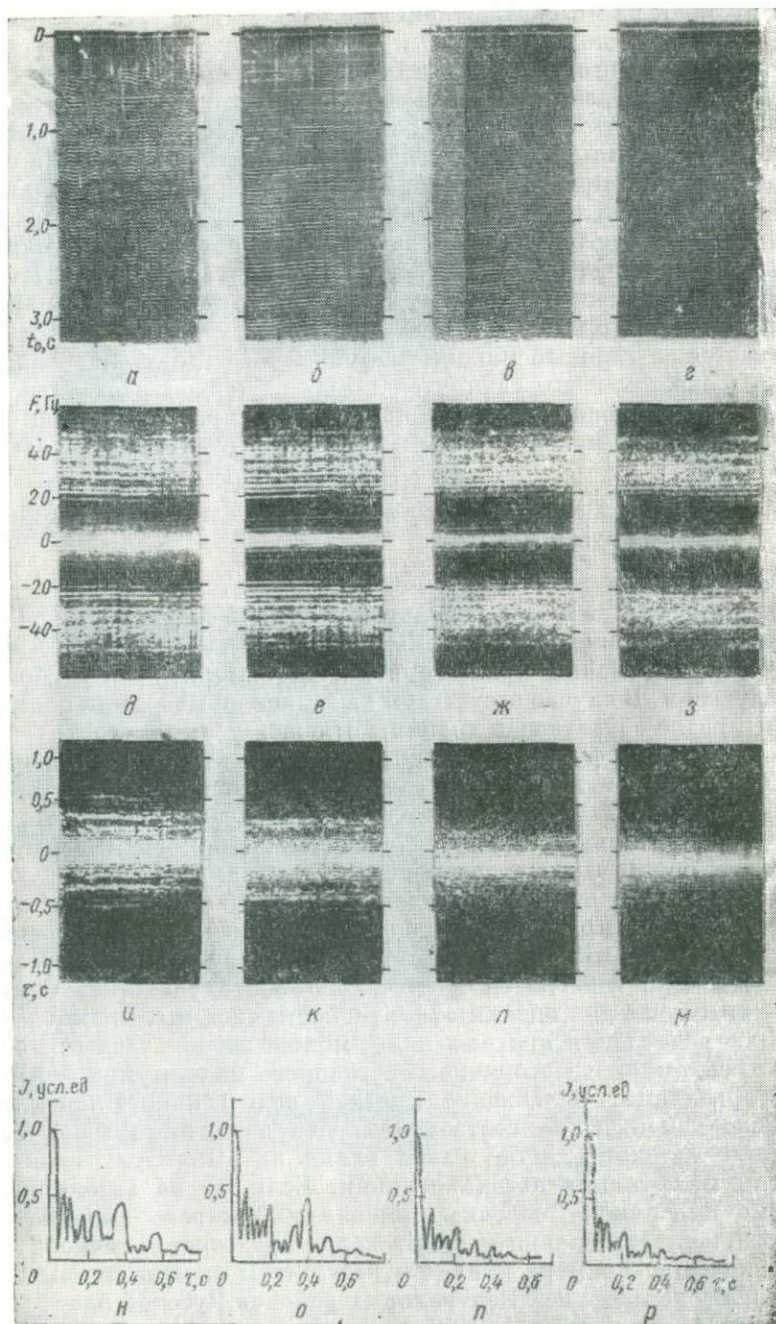
синклинальный перегиб амплитудой, соответствующей приращению времени на интервале сдвига по оси x .

Спектрально-корреляционный анализ может использоваться при изучении зон выклинивания лишь в том случае, если выклинивающийся горизонт является кратноюобразующим. Следует иметь также в виду, что резкое уменьшение коэффициента отражения изучаемой границы проявляется на сейсмических записях, а следовательно, и при их спектрально-корреляционном анализе, аналогично проявлению выклинивания. В случае выклинивания кратноюобразующего горизонта на функции автокорреляции временного сейсмического разреза МОГТ пропадает соответствующий ему, побочный максимум. Главный максимум функции взаимной корреляции между разрезом и эталонной трассой раздваивается, а главный максимум функции взаимной корреляции между разрезом и его сдвинутой по оси x копией раздваивается в зоне выклинивания и далее по профилю прослеживаются два максимума, Δt между которыми связано с величиной сдвига по оси x .

Оценка эффективности подавления кратных волн системами ОГТ

Приведенный на рис. 51 пример показывает, что спектрально-корреляционный анализ результатов суммирования по разным системам ОГТ может быть использован для быстрой оценки эффективности подавления кратных волн. Методика оценки состоит в следующем. В случае отсутствия на записи шумов и при наличии одной кратноюобразующей границы отношение амплитуды вторичного максимума функции автокорреляции к амплитуде главного максимума будет в точности соответствовать отношению интенсивности кратной волны к интенсивности образовавшей ее однократной. В реальных условиях, когда на сейсмограммах кроме сигналов, связанных с отражающими границами, регистрируются различного рода шумы, а каждая отражающая граница в принципе является кратноюобразующей, связь между соотношением амплитуд максимумов функций автокорреляции и отношением сигнал/помеха становится значительно более сложной. Однако и в этом случае для оценки эффективности системы, применяемой с целью ослабления кратных волн, можно воспользоваться соотношением амплитуд вторичного и главного максимумов функции автокорреляции. Ослабление кратной волны какого-либо типа вызывает уменьшение соответствующего вторичного максимума функции автокорреляции, слабо влияя на амплитуду главного максимума функции автокорреляции. Если же на автокоррелограмме выделяются побочные максимумы второго порядка, то коэффициент ослабления кратных волн определяется точно.

В качестве примера приведем результаты оценок систем ОГТ по одному из профилей Центральных районов Русской платформы (Дьяконовская площадь). Как видно из приведенных на рис. 52



разрезов, после 6-кратного суммирования по системам ОГТ на расстоянии $l = 0-700$ м от пункта взрыва хорошо прослеживается ряд отражений (рис. 52, б). При суммировании по другим системам в интервалах 700—2100 (рис. 52, в) и 1400—2800 м (рис. 52, г) от пункта взрыва видимое качество прослеживания отражений ухудшается. Данные спектрально-корреляционного анализа результатов суммирования говорят о том, что по ближним к пункту взрыва системам (0—700 м) суммируются кратные волны (рис. 52, е, ж, з). Интенсивность максимума на времени $\tau = 0,4$ с выше, чем аналогичного максимума на коррелограмме однократного профилирования (рис. 52, и, о). При суммировании по удаленным от пункта взрыва системам кратные волны ослабляются (рис. 52, п, р), но полностью не снимаются. Особенно это касается частично-кратных высокоскоростных волн с периодами 0,15—0,25 с, которые даже при суммировании в интервале 1400—2800 м от пункта взрыва остаются интенсивными (рис. 52, р). Наличием этих волн объясняется, видимо, низкая геологическая эффективность работ МОГТ на ряде площадей Русской платформы.

На графиках корреляционных функций, соответствующих монтажажам в интервале 0—700 м от пункта взрыва, выделяются интенсивные максимумы на $\tau = 0,2; 0,4; 0,53$ с; амплитуды их резко уменьшены на графиках, которые соответствуют монтажажам суммирования по системам ОГТ, удаленным от пункта взрыва. Величины соотношений указанных трех вторичных максимумов A и основного максимума A_0 функции автокорреляции ($K = A/A_0$), характеризующие соотношения кратных и однократных волн, приведены в табл. 4

Рассмотрение полученных значений K приводит к некоторым важным для применения МОГТ в данном районе выводам: выделенные основные типы кратных волн при суммировании ослабляются в 1,5—4 раза; применение годографов длиной до 700 м от пункта взрыва не приводит к ослаблению кратных волн и даже наоборот; суммирование по МОГТ в пределах интервалов 700—2100 и 1400—2800 м от пункта взрыва приводит к равноценным результатам и, по-видимому, в достаточной степени ослабляет лишь кратные волны с $\tau = 0,4, 0,53$ с; ни одна система не является достаточно эффективной для подавления кратных волн с временными интервалами кратности $\tau \leq 0,2$ с.

Рис. 52. Данные оптического спектрально-корреляционного анализа для быстрой оценки эффективности подавления кратных волн системами ОГТ.

а — данные одноточечного профилирования при $l = 0-700$ м; б — результат суммирования по 6-кратной системе ОГТ при $l = 0-700$ м; в — результат суммирования по 12-кратной системе ОГТ при $l = 700-2100$ м; г — результаты суммирования по 12-кратной системе ОГТ при удалении от пункта взрыва на 1400—2800 м; д, е, ж — одномерные спектры, соответствующие разрезам а, б, в, г; и, к, л, м — автокоррелограммы, соответствующие разрезам а, б, в, г; н, о, п, р — данные фотометрирования автокоррелограмм, соответствующих разрезам а, б, в, г

τ, с	Значение К для различных систем наблюдений			
	Одноточечное профилирование при $l=0-700$ м	Суммирование по МОГТ		
		6-кратное при $l=0-700$ мм	12-кратное при $l=700-2100$ м	12-кратное при $l=1400-2800$ м
0,2	0,35	0,40	0,26	0,24
0,4	0,42	0,46	0,12	0,11
0,53	0,18	0,17	0,09	0,08

*Изучение закономерностей
изменения частотного состава
сейсмических волн
с целью выбора оптимальной фильтрации*

Результат суммирования по системам ОГТ определяется правильным выбором параметров фильтров, что можно сделать путем перебора фильтраций при переходе с участка на участок либо путем предварительного изучения особенностей изменения спектрального состава сейсмических волн в зависимости от времени их регистрации и удаления от пункта взрыва. При решении этих задач использовалась лазерная установка. Быстрое вычисление спектров записи и уточнение оптимальной фильтрации путем простой смены фильтров и визуального просмотра результата фильтрации разреза МОГТ на телевизионном экране значительно расширяют практические возможности обработки, позволяя осуществлять переменную по площади и времени фильтрацию. Необходимую для этих операций информацию, облегчающую выбор оптимальных фильтров, получают по амплитудным спектрам дискретных участков сейсмической записи (см. рис. 17), по мгновенным спектрам отдельных трасс (см. рис. 14, б) или трансформированным временным разрезам МОВ или МОГТ (см. рис. 16).

Данные такого оптического спектрального анализа позволили изучить закономерности изменения частотного состава сейсмических волн в зависимости от времени их регистрации и удаления от пункта взрыва по некоторым сейсмогеологическим регионам. Так, например, для северо-восточной части Русской платформы отмечены следующие закономерности (см. рис. 16, 17): преобладающим в спектре полезных волн является диапазон частот 20—40 Гц (активная полоса спектра); концентрация частот в полосе 10—30 Гц с ростом времени непрерывно увеличивается; полоса частот 30—40 Гц имеет наибольшую концентрацию в интервале 0,7—2 с; частоты в полосе 40—50 Гц имеют максимальную

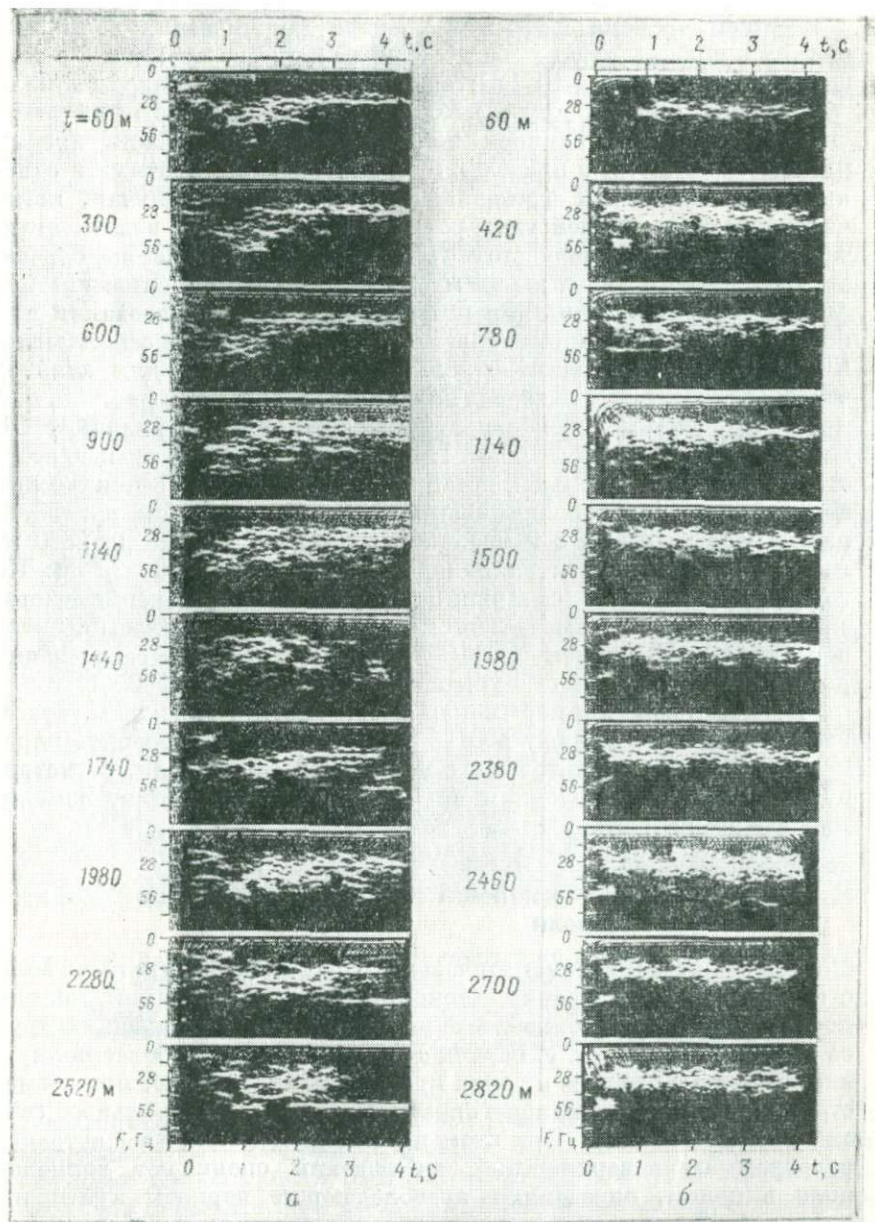


Рис. 53. Мгновенные спектры сейсмических трасс, выбранных для анализа по годографу МОВ при удалении от пункта взрыва на 60—2520 м (а) и по годографу ОГТ при удалении от пункта взрыва на 60—2820 м (б)

концентрацию в интервале 0,5—1,5 с и в целом играют незначительную роль в формировании спектра сейсмических колебаний; с течением времени максимум спектра сейсмических волн смещается в область низких частот (при разнице во времени 2 с смещение составляет 8—10 Гц); спектры временных разрезов мало отличаются друг от друга вдоль профиля, но участками отмечаются смещения активной полосы спектра в область низких или высоких частот в пределах 5—7 Гц; спектры кратных и однократных волн почти одинаковы, но встречались случаи, когда частотной фильтрацией удавалось ослабить кратные волны, отличающиеся более низкочастотным составом по сравнению с регистрируемыми на тех же временах однократными волнами.

Наглядной, удобной для интерпретации и использования при последующей машинной обработке представляется серия мгновенных спектров сейсмических трасс, выбранных для анализа через определенные интервалы вдоль профиля. На рис. 53, а, б приведены данные спектрального анализа по материалам МОВ и ОГТ Московской синеклизы. При его рассмотрении прежде всего отмечается относительная стабильность частоты сейсмических волн, регистрирующихся от общих глубинных точек (см. рис. 53, б) на временах до 3—4 с и удалении от пункта взрыва до 2820 м. Активная полоса спектра находится в пределах 20—35 Гц. По годографу же МОВ (см. рис. 53, а) диапазон изменения частот значительно шире, отмечается смещение активной полосы спектра в сторону низких частот при увеличении времени регистрации до 3—4 с и удалении от пункта взрыва.

Приведенный пример показывает, что по спектрам трасс, выбранным по годографу МОВ или ОГТ, легко определить параметры полосовой фильтрации с целью выделения волн, регистрирующихся на определенном времени, или фильтрации, изменяющейся во времени.

Определение кинематических характеристик кратных волн

Методика изучения кинематических характеристик кратных волн основана на использовании автокорреляционных функций, так как по ним имеется возможность определять период следующих друг за другом сигналов, т. е. период кратности [67]. Наиболее полную информацию о природе и типах кратных волн получают при совместном анализе материалов горизонтальных и вертикальных сейсмических профилей. При этом по обычным и текущим автокоррелограммам поверхностных наблюдений оценивают волновое поле в целом, определяют преобладающие периоды кратности и временной интервал регистрации выделенных кратных волн. Анализ автокоррелограмм сейсмических трасс ВСП позволяет уточнить интервал глубин, в пределах которых формируются кратные волны определенных типов. На основе результатов такого

анализа сейсмических материалов более обоснованно рассчитывают системы ОГТ, а затем оценивают их эффективность по описанной выше методике.

На рис. 54 приведен пример спектрально-корреляционного анализа данных МОВ, полученных на одном из участков Московской синеклизы. Спектрально-корреляционный анализ проведен в различных временных интервалах. Дискретный характер одномерных спектров (рис. 54, б, в, г) говорит о наличии на сейсмической записи периодически повторяющихся импульсов, особенно

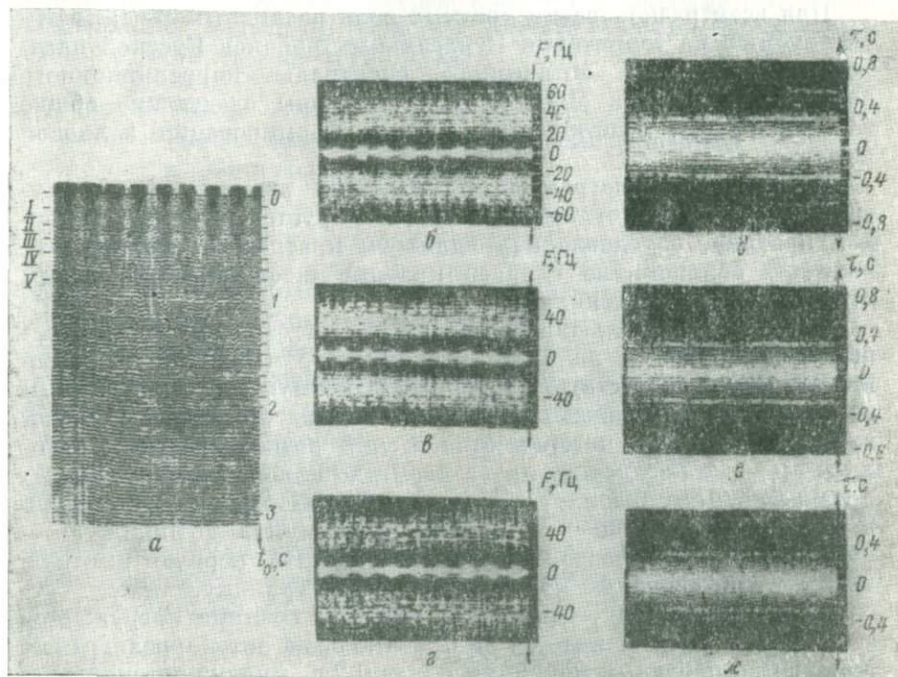


Рис. 54. Данные спектрально-корреляционного анализа сейсмических трасс для определения кинематических характеристик кратных волн.

а — оригинал сейсмического разреза МОВ; б, в, г — одномерные спектры сейсмических волн, зарегистрированных соответственно в интервалах 0—3, 1—3, 0—1 с; б, в, г — автокоррелограммы соответственно в интервалах 0—3, 1—3, 0—1 с

четко отмечающихся на оригинале (рис. 54, а) в интервале 1—3 с. Периодичность импульсов связана с наличием кратных волн, которые имеют период повторения от 0,1 до 0,7 с. Преобладают волны с периодом 0,12 и 0,3 с, которые отмечаются по всему временному разрезу. В интервале от 0 до 1 с кратные волны с периодом повторения более 0,3 с выражены слабо или присутствуют лишь спорадически (рис. 54, в).

Судя по текущим автокоррелограммам (см. рис. 14, д), кратные волны начинают регистрироваться со времени 0,5 с, а наиболее интенсивные из них с периодом 0,3 с появляются на времени 1 с. По автокоррелограмме данных ВСП (см. рис. 44, е), полученных в этом районе, четко видно, что наиболее интенсивные кратные волны формируются в верхней части разреза в интервале глубин до 600 м. Зная период повторения кратной волны, временной интервал ее регистрации и интервал глубин, в пределах которого она формируется, нетрудно установить кинематические схемы дополнительного прохождения волны в среде [24]

При всем разнообразии кратных волн различных типов, регистрируемых на территории Центральных районов Русской платформы по данным оптического спектрально-корреляционного анализа материалов МОВ и ВСП отмечены следующие общие закономерности участия этих волн в формировании волновой картины.

Всюду на сейсмограммах в интервале времен, соответствующих додевонским отложениям, регистрируется интерференционная картина, обусловленная наличием кратных и однократных волн. В большинстве случаев кратные и однократные волны имеют близкие значения t_0 .

Подавляющее большинство кратных волн формируется в верхней части разреза; на всех автокоррелограммах зондирований МОВ и ВСП присутствует вторичный максимум с τ , совпадающим со значением t_0 отражающей границы, отождествляемой с первой жесткой границей, которая относится к разновозрастным отложениям — от казанского яруса перми до нижнекаменноугольных отложений. Как правило, этот максимум выделяется по интенсивности среди остальных побочных максимумов функции автокорреляции, что позволяет характеризовать первую жесткую границу как основную кратнообразующую границу.

На всех участках, где первая жесткая граница погружается и ее время t_0 увеличивается до 0,3—0,5 с, на автокоррелограмме появляется побочный максимум с $\tau = 0,2$ с. Анализ автокоррелограмм ВСП и различных временных интервалов монтажей МОВ показывает, что соответствующая реверберационная система располагается выше первой жесткой границы. Это свидетельствует о наличии резких кратнообразующих границ в отложениях перми или мезозоя.

Анализ автокоррелограмм и сопоставление τ со значениями t_0 основных отражающих горизонтов позволяет утверждать, что практически всюду на исследуемой территории существуют полнократные волны, связанные с кровлей казанского яруса перми, с кровлей верейского горизонта среднего карбона, с горизонтом в верхней части девонских отложений и с кровлей ордовика.

Кроме указанных типов кратных волн, выделяются и другие, но они не отождествляются на соседних участках и, по-видимому, имеют локальное распространение.

Таким образом, данные спектрально-корреляционного анализа сейсмических материалов МОВ и ВСП, полученных в Централь-ных районах Русской платформы, показывают, что для этих районов характерно наличие большого количества разнообразных по типу кратных волн. При таком их обилии рассчитывать на эффективность обычной методики МОВ для изучения додевонских горизонтов не приходится. Для выделения однократных отражений от додевонских горизонтов нужны системы наблюдений с многократными перекрытиями, расчет которых должен базиро-ваться на знании параметров кратных и однократных волн, подлежащих изучению. Основной расчет системы должна быть схема районирования территории.

Расчет эффективных, пластовых скоростей и статических поправок

Определение эффективных скоростей при помощи лазерной устан-овки базируется на особенностях получения функций взаимной корреляции сейсмических трасс встречных наблюдений МОВ на одной и той же базе приема [29]. Принцип заключается в сле-дующем. Пусть на двух встречных годографах МОВ зарегистри-рована одна отраженная волна (рис. 55, а). Если вычислить на лазерной установке функции взаимной корреляции каждых двух трасс, зарегистрированных одним и тем же сейсмоприемником, по методике, изложенной в гл. II, и расположить результаты вычислений в соответствии с расстановкой сейсмоприемников, то главный максимум функции взаимной корреляции опишет пря-мую, представляющую собой разностный годограф (рис. 55, в). Эффективная скорость при этом может быть вычислена по известной формуле

$$v_{эф} = \sqrt{\frac{l}{t_{cp}} \frac{\Delta x}{\Delta \theta}}, \quad (3.7)$$

где l — взрывной интервал; t_{cp} — среднее время прямого и встреч-ного годографов; $\Delta x/\Delta \theta$ — наклон разностного годографа.

С точностью, достаточной для практических целей, значе-ние t_{cp} представляют в виде

$$t_{cp} = \frac{t_{cp \min} + t_{cp \max}}{2}.$$

При параболической аппроксимации годографа отраженной волны

$$t_{cp \min} = t_0 + \frac{\Delta t}{4}.$$

Тогда в формулу (3.7) можно подставить значение

$$t_{\text{ср}} = t_0 + \frac{3\Delta t}{8}.$$

Зная, что $\Delta x/\Delta\theta = 1/\text{tg}\alpha$, где α — угол наклона разностного годографа, и учитывая, что $2\Delta t/l \approx \text{tg}\alpha$, после подстановок и преобразований получим

$$v_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{\text{tg}\alpha \left(\frac{t_0}{l} + \frac{3}{16} \text{tg}\alpha \right)}}. \quad (3.8)$$

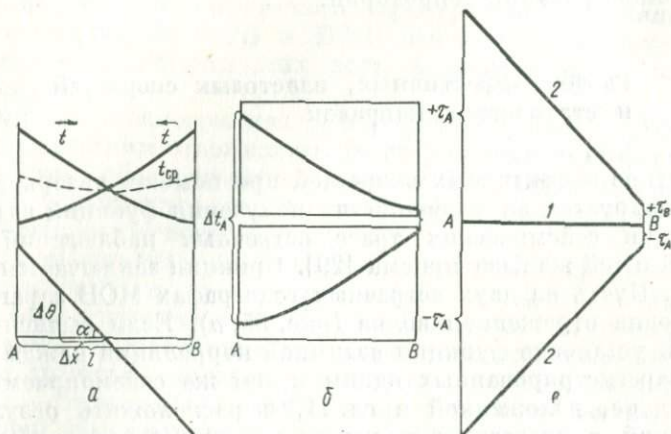


Рис. 55. Получение разностного годографа на лазерных установках.

а — встречные (\vec{t} и \vec{t}) и разностный годографы; *б* — подготовка годографов встречных наблюдений для взаимной корреляции трасс на лазерной установке; *в* — схематическое изображение максимумов функции взаимной корреляции, вычисленной оптическим способом: 1 — главный максимум функции автокорреляции, 2 — главный максимум функции взаимной корреляции

Реальные сейсмограммы содержат не одну отраженную волну, а несколько. Следовательно, при автоматическом построении разностного годографа при помощи лазерной установки получим несколько прямых в области максимума функции взаимной корреляции, соответствующего встречным наблюдениям МОВ. Угол наклона каждой прямой будет определять значение эффективной скорости.

В случае сильно дифференцированного скоростного разреза максимумы функций взаимной корреляции могут перекрываться, в связи с чем возникнут трудности в определении $v_{\text{эф}}$. Для повышения надежности определений $v_{\text{эф}}$ спектрально-корреляционный анализ осуществляют по временным интервалам сейсмического разреза, выбор которых зависит от особенностей волновой картины. При получении функций взаимной корреляции кроме

главного максимума будут выделяться побочные максимумы, которые расположатся вдоль разных разностных годографов, построенных по отрезкам осей синфазности различных волн, зарегистрированных в пределах изучаемого интервала времени. С помощью двумерного спектра этой картины или двумерной корреляционной функции определяют средний угол наклона полученного набора отрезков разностного годографа.

Используя обстоятельство, что при вычислении функций взаимной корреляции на лазерной установке формируются как прямые ($+\tau$), так и встречные ($-\tau$) ветви разностного годографа (рис. 55, ϵ), то с целью повышения точности определения угла α разностных годографов получают двумерные спектры и коррелограммы обеих ветвей совместно и определяют, таким образом, угол 2α . Точность определения угла 2α может быть повышена, если использовать методику фотоэлектрических измерений, которые осуществляют путем сканирования клинообразной щелью с углом при вершине $1-2^\circ$ двумерных спектров или двумерных коррелограмм, формирующихся в фокальной плоскости оптической системы.

Таким образом, процедура определения эффективных скоростей с помощью лазерной установки состоит в следующем.

1. Сейсмические записи МОВ, полученные из встречных пунктов взрыва вдоль профиля, воспроизводят способом переменной плотности без ввода кинематических поправок, но с поправками за линию приведения.

2. Полученный разрез разбивают на несколько временных интервалов для определения эффективных скоростей волн, зарегистрированных в пределах этих интервалов.

3. Два изображения интервала временного разреза, состоящего из 20 сейсмограмм, размещают один под другим так, чтобы встречные наблюдения расположились друг под другом на определенном расстоянии (см. рис. 28, a).

4. Путем двукратного преобразования Фурье на лазерной установке получают коррелограммы анализируемых участков трасс временного разреза (см. рис. 28, b).

5. Определяют углы наклона максимумов функций взаимной корреляции трасс встречных наблюдений (разностный годограф).

6. С целью повышения надежности определения угла α преобразовывают прямые и встречные ветви разностных годографов (см. рис. 28, b) в двумерный спектр Фурье и определяют угол 2α .

7. С целью дальнейшего повышения точности определения угла α двумерный спектр преобразовывают в двумерную корреляционную функцию и уточняют значение угла 2α .

8. По формуле (3.8) определяют значения эффективных скоростей сейсмических волн.

Последовательным применением перечисленных операций к другим интервалам временного разреза изучается скоростная характеристика участка исследований.

Предлагаемый способ характеризуется сравнительной быстротой и достаточно высокой точностью определения значений эффективных скоростей. Осуществимость указанных операций, проверенная на тестовом материале, иллюстрируется рис. 56, а. Теоретические годографы, рассчитанные по данным сейсмокаротажа скв. 1 Дьяконовской площади Московской синеклизы, были записаны в виде импульсной сейсмограммы и затем определены

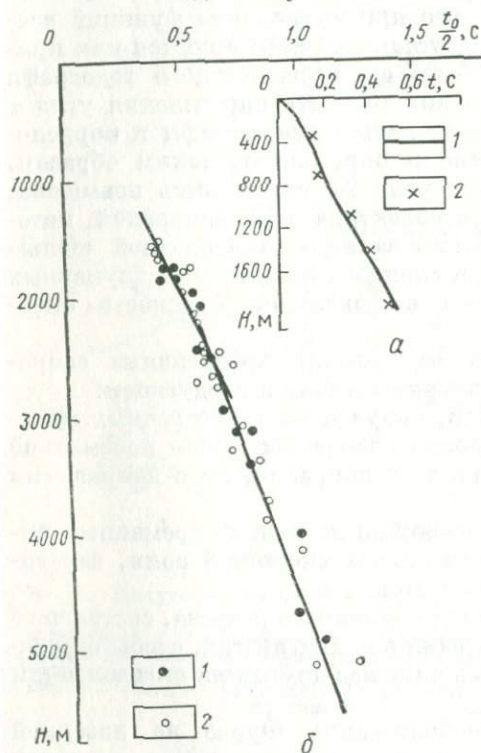


Рис. 56. Результаты вычисления эффективных скоростей.

а — вертикальный годограф: 1 — данные сейсмокаротажа, 2 — данные определения эффективной скорости оптическим способом; б — сопоставление результатов вычисления эффективной скорости: 1 — оптический способ; 2 — расчет вручную

эффективные скорости оптическим способом. Результаты расчета скоростей по описанному способу сопоставили с исходными сейсмокаротажными данными. Сходимость данных можно рассматривать как хорошую.

На рис. 56, б приведены данные определения эффективных скоростей вручную и при помощи лазерной установки по сейсмограммам МОВ Верхне-Камской впадины. Как видно из сопоставления, оптический способ дает несколько меньший разброс значений эффективной скорости, чем способ расчета вручную. Среднеквадратичные погрешности определения скоростей составляют: при ручной обработке 51 м/с, при оптическом способе 49 м/с, т. е. практически совпадают.

Возможность регистрировать при вертикальном сейсмическом профилировании устойчиво прослеживающиеся волны в последу-

ющей части записи создала предпосылки к широкому их использованию для определения скоростей. Так, использование множества осей синфазности падающих и восходящих волн на больших временах регистрации обеспечивает возможность прямого определения по ним пластовых скоростей. На продольных вертикальных профилях кажущиеся скорости равны пластовым уже начиная с прямых волн.

Если участки монтажей ВСП, соответствующие исследуемым пластам, преобразовать оптическим способом в двумерные спектры то определение пластовых скоростей сводится к определению угла наклона спектральных линий [50]. Последующие преобразования двумерного спектра в двумерную функцию автокорреляции дают возможность получить более отчетливую картину. Рассмотрим этот способ определения пластовых скоростей более подробно.

Различие пластовых скоростей на разных глубинах приводит к тому, что двумерный спектр монтажа ВСП в пределах всей скважины практически не содержит четких спектральных линий. Светящиеся пятна на двумерном спектре получаютя размытыми из-за реально существующего «спектра скоростей», соответствующего реальному геологическому разрезу. Двумерные спектры, соответствующие интервалам монтажа ВСП, расположенным в пределах пластов с одинаковыми акустическими свойствами, в случае продольного вертикального профиля будут крестообразными. Одна линия такого «креста» соответствует падающим, другая линия — выходящим волнам. Угол наклона α каждой из этих линий по отношению к оси частот и позволяет определить пластовую скорость по формуле [58]

$$v_{пл} = \frac{\Delta f}{\Delta k \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\Delta H T}{l \operatorname{tg} \alpha}, \quad (3.9)$$

где Δf — число герц соответствующее 1 мм на оси частот F ; k — число волновых чисел, соответствующее 1 мм на оси k ; ΔH — расстояние между точками наблюдения в скважине; T — число миллиметров, соответствующих 1 с оригинала монтажа ВСП (в ПСЗ-4, например, $T = 100$ мм); l — расстояние между трассами в миллиметрах на исходном монтаже ВСП, с которого сделана микрокопия.

Скважинными исследованиями показано, что даже при небольшом удалении пункта взрыва от устья исследуемой скважины возникают довольно интенсивные обменные волны, хорошо регистрирующиеся горизонтальными сейсмоприемниками скважинного зонда. Кажущиеся скорости этих волн на участках с SV -поляризацией близки к пластовым скоростям распространения поперечных волн (угол падения близок к вертикали), а их интенсивность повышает существенно интенсивность горизонтальной составляющей продольных волн. На двумерном спектре участка такого монтажа ВСП, соответствующего определенному пласту,

будут наблюдаться довольно четкие спектральные линии, соответствующие поперечным волнам. Намного меньшую интенсивность будут иметь спектральные линии, соответствующие продольным волнам. По наклону спектральных линий, соответствующих на двумерных спектрах поперечным волнам, пластовые скорости определяются по формуле (3.9).

Если наблюдения в пределах участка вертикального профиля, соответствующего одному и тому же пласту, выполнены наклонными сейсмоприемниками, ориентированными вдоль плоскости лучей, то на соответствующих двумерных спектрах будут, как правило, наблюдаться четкие спектральные линии, соответствующие продольным и поперечным волнам SV (при ненаправленном источнике колебаний). В таком случае при наличии двумерного спектра можно определить параметр $\gamma = v_s / v_p$ по формуле

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha_{vP} / \operatorname{tg} \alpha_{vS}. \quad (3.10)$$

Аналогичный результат можно получить при совместной обработке монтажей сейсмограмм ВСП, проводимого раздельно путем регистрации вертикальной и горизонтальной компонент волнового сейсмического поля. Если расположить рядом два таких монтажа, соблюдая параллельность осей времен и глубин, то в фокальной плоскости оптической системы двумерные спектры обоих монтажей сейсмограмм будут наложены друг на друга. Дальнейшая обработка таких спектров состоит из тех же операций, что и при записях, полученных наклонными сейсмоприемниками.

В случае непродольного вертикального профиля из анализа следует исключить начальную часть записи, где кажущаяся скорость существенно превышает пластовую.

Нередки случаи, когда записи ВСП засорены нерегулярными шумами, вследствие чего двумерные спектры, изучаемые по описанному способу, окажутся размытыми, и определение наклонов соответствующих спектральных линий может оказаться неоднозначным. В таких случаях двумерные спектры целесообразно преобразовывать в двумерные автокорреляционные функции, на которых регулярные оси синфазности при наличии фона шумов выделяются более четко. Это следует из того, что все шумы или помехи нерегулярного типа при формировании корреляционной функции будут находиться в области центрального максимума коррелограммы, полностью освобождая от фона вторичные корреляционные максимумы, которые связаны с регулярными волнами. При этом справедливыми остаются формулы (3.9) и (3.10), но соответствующие углы отсчитывают от оси линейных сдвигов, в которую преобразуется ось волновых чисел.

Операцию определения углов наклона спектральных линий (или линии максимальной освещенности на коррелограммах) можно осуществить как по фотоэлементам, так и прямым путем при помощи вращающейся сканирующей щели с фотоэлементом, помещаемой в плоскость двумерного спектра. По экстремальным

величинам графика зависимости предварительно усиленного фототока от угла наклона сканирующей щели и определяют угол наклона α наиболее интенсивных спектральных линий. Прямой отсчет путем фотометрических измерений в плоскости двумерного спектра обеспечивает большую производительность и точность результатов по сравнению с обработкой фотопленок двумерных спектров и коррелограмм.

Описываемый способ успешно опробован при обработке материалов ВСП, полученных в различных скважинах Московской синеклизы.

На рис. 57 представлены двумерные спектры участков монтажа сейсмограммы ВСП по скв. 3 Даниловской площади. Сопоставление двумерных спектров всего монтажа и отдельных его участков, соответствующих выделенным пластам, показывает, что в пределах спектров линии максимальной интенсивности имеют довольно однозначно определяемый угол наклона, в то время как в спектре всего монтажа (рис. 57, б) отдельные линии выделить трудно. При этом спектры (рис. 57, в, г) пластов, расположенных ниже 1650 м (подошва девона), отличаются гораздо более сильными спектральными линиями, соответствующими падающим волнам. Выше лежащие пласты (рис. 57, в, г) имеют характерный крестообразный спектр, обусловленный наличием волн обоих знаков, интенсивность которых уравнивается в результате действия АРУ и путем воспроизведения монтажей способом переменной плотности на контрастной фотобумаге. У пластов небольшой мощности (пласт в интервале 1650—1810 м) спектральные линии (рис. 57, в) менее четкие. Это объясняется тем, что по мере сокращения анализируемого интервала глубин (и соответственно уменьшения количества трасс, слагающих исследуемый интервал монтажа), уменьшается направленность оптической системы. С другой стороны, все больше начинают сказываться статические сдвиги между отдельными трассами, связанные как с аппаратурой, так и с неоднородностью пластов, состоящих нередко из слоев с различными упругими свойствами.

Для некоторых пластов наряду с двумерными спектрами были также получены и двумерные автокоррелограммы (рис. 57, ж). Линии максимальной интенсивности на них выражены более отчетливо, чем на двумерных спектрах (интервал 1810—2100 м).

В табл. 5 приведены данные пластовых скоростей, определенные на лазерной установке и вручную (по годографам первых вступлений и волн в последующей части записи).

Применяемые в настоящее время оптические системы и регистрирующая аппаратура позволяют исследовать пласты мощностью более 150 м. Совершенствование способа связано с необходимостью использования более точных приемов введения статических поправок в сейсмограммы ВСП и создания устройств, позволяющих с большой точностью ($\Delta\alpha = 15'$) определять величины углов по двумерным спектрам и коррелограммам.

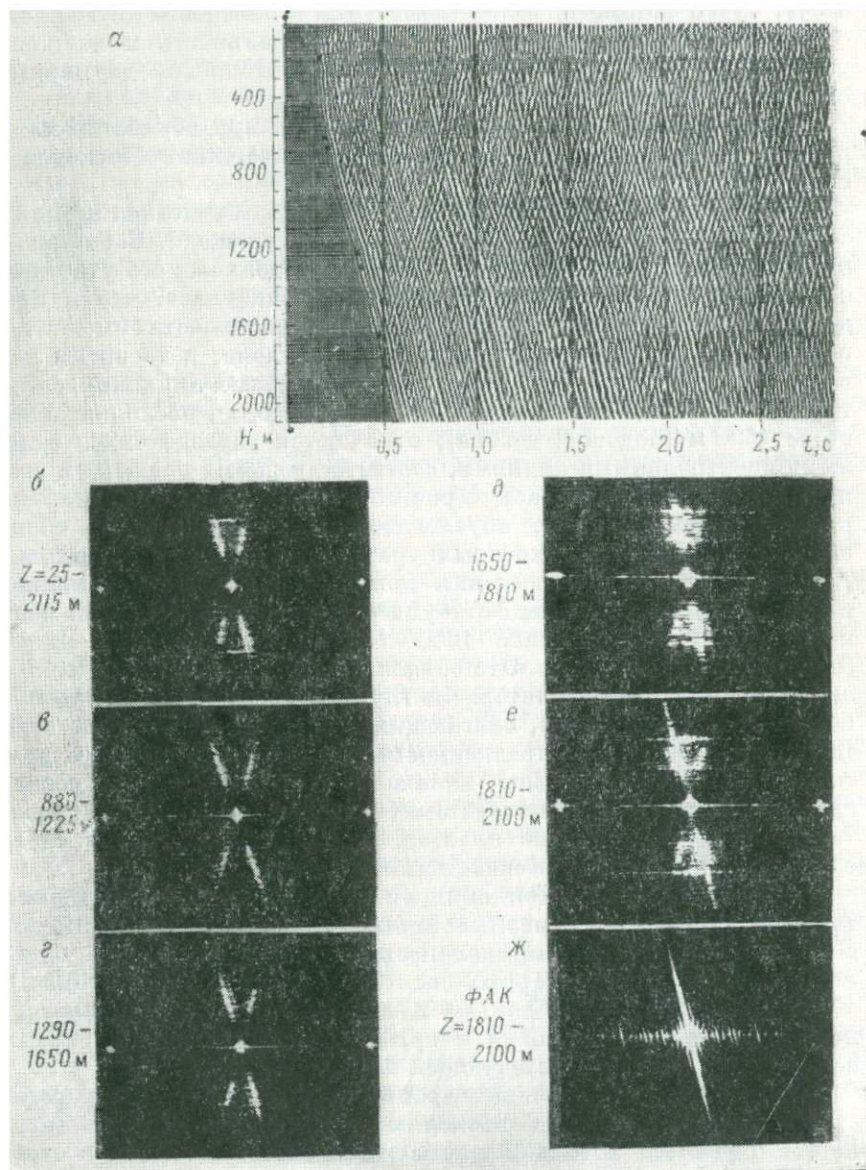


Рис. 57. Двумерные спектры участков монтажа сейсмограммы ВСП и автокоррелограммы, полученные для определения пластовых скоростей

Площадь и номер скважины	Интервал глубин, м	Мощность пласта, м	Расстояние от пункта взрыва до точки наблюдения l , м	Пластовая скорость (м/с), определенная на лазерной установке	Пластовая скорость (м/с), определенная вручную по годографам	Расхождение, %
Даниловская, скв. 3	880—1225	345	300	3170	3100	2
	1290—1650	360	900	3170		
			300	3610	3620	0
			900	3730		3
	1650—1810	160	300	5400	5150	5
1810—2100	290	300	4010	4060	1	
Даниловская, скв. 4	1150—1610	460	180	3740	3620	1
	1780—2960	1180	180	4040	4040	0
Даниловская, скв. 4	1150—1610	460	600	1980	1900	4
	1780—2960	1180	600	2340	2300	1
Солигаллическая, скв. 2	1475—270	1225	200	3820	3830	0
	2700—3100	400	640	3820		
			200	4460	4400	1
			640	4400		
	3100—3520	420	200	4900	4720	4
		640	4600		1	

Основными операциями, повышающими эффективность машинной обработки материалов МОВ, являются расчет и коррекции статических поправок. Большинство современных алгоритмов ввода статических поправок основано на использовании функций взаимной корреляции сейсмических трасс, их реализация требует значительных затрат времени ЭВМ. Данная операция может быть с успехом решена с помощью лазерной установки, так как при этом представляется возможным получение функций взаимной корреляции одновременно по нескольким десяткам пар сейсмических трасс. При этом достигается высокая точность определения статических поправок [29].

Рис. 58 иллюстрирует качество оптического корреляционного анализа с целью определения относительных временных сдвигов участков соседних трасс по максимумам функций взаимной корреляции. Заданный при изготовлении теста разброс значений статических поправок в пределах $\pm(1-15$ мс) четко отмечается на коррелограмме (рис. 58, е). Определение корректирующих поправок может быть произведено с погрешностью 1—2 мс. Точность определения значений временных сдвигов повышается, если

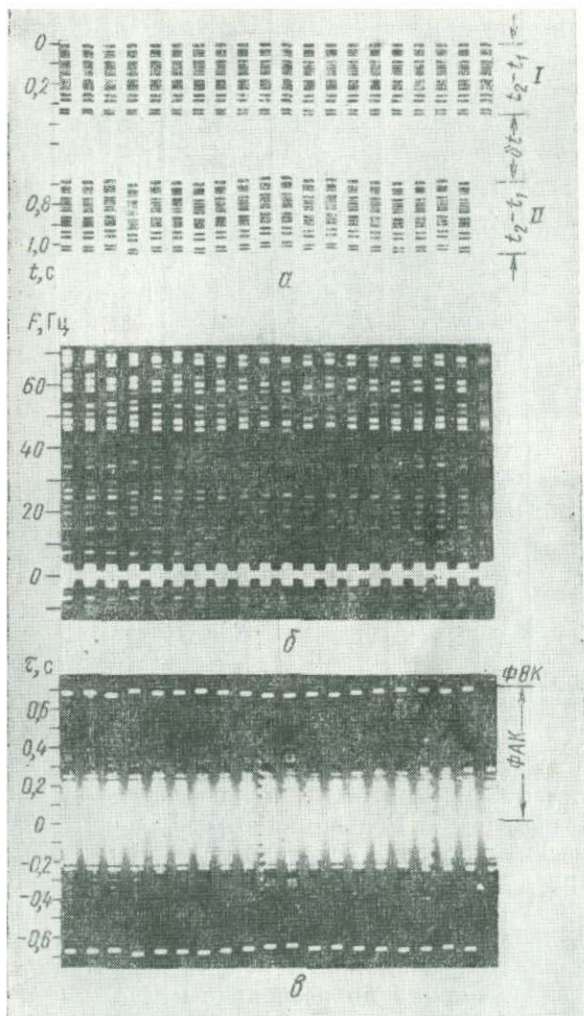


Рис. 58. Оценка точности определения статических поправок по функциям взаимной корреляции, получаемых оптическим способом.

а — участок временного разреза, подготовленный для корреляционного анализа; *б* — одномерный спектр; *в* — кореллограмма участков трасс (ФАК — область функции автокорреляции, ФВК — центральный максимум функции взаимной корреляции)

использовать функции ретрокорреляции, так как в этом случае ошибки определения статических поправок удваиваются.

Описанный способ определения эффективных [скоростей позволяет добиться удовлетворительного результата даже в условиях очень сложного волнового поля, когда визуально невозможно проследить какую-либо ось синфазности на сейсмограмме [99].

Обработка материалов рудной и нефтегазовой сейсморазведки

Данные рудной сейсморазведки часто осложнены фоном волн-помех типа кратных продольных отраженно-преломленных волн, обменных волн типа PS и других, связанных с резкой скоростной границей между рыхлой перекрывающей толщей и кристаллическими породами. Ослабление указанных помех традиционными аппаратурными средствами вызывает определенные трудности. Использование лазерной установки для обработки материалов, полученных в условиях рудного Алтая, Балтийского щита, некоторых районов Казахстана, Якутии и других районов, позволило снять волны-помехи, упростить волновую картину и произвести спектрально-корреляционный анализ сейсмической записи. При обработке материалов рудной сейсморазведки нередко удается достичь удовлетворительного результата применением только частотных пространственных фильтров. Однако эффект достигается применением веерных фильтров, так как отмечающееся в большинстве случаев отличие в кажущихся скоростях волн-помех и полезных волн является хорошей предпосылкой для проведения фильтрации по направлению осей синфазности.

При рудной сейсморазведке для наиболее полного освещения геологического разреза обычно применяют сложные системы наблюдений, причем каждая расстановка приборов отрабатывается из трех-четырех пунктов взрыва, удаленных от базы приема на расстояние от 1 до 5—10 км. Одним из достоинств применяемых систем наблюдений является регистрация удлиненных годографов, на которых отчетливо видны главные особенности волнового поля, имеющего сложный интерференционный характер, обусловленный сложной сейсмогеологической ситуацией. На сейсмограммах регистрируются отраженные волны с различными по величине и знаку кажущимися скоростями.

Стандартная машинная обработка материалов сводится к воспроизведению сейсмической записи на открытом канале или на широкополосной фильтрации с включенным АРУ, без смесителя, с одновременным введением статических поправок. По воспроизведениям выполняется корреляция полезных отражений, намечаются основные группы волн-помех, выделяются наиболее сложные участки, требующие дополнительного анализа. Для изучения таких участков волнового поля и используется в дальнейшем лазерная установка [46], с помощью которой, помимо подавления

присутствующих почти повсеместно регулярных волн-помех, решаются задачи разделения интерферирующих полезных волн.

Пример оптической фильтрации по кажущейся скорости показан на рис. 59, г. Сейсмический разрез (рис. 59, а, в) получен при изучении одной из структур рудного Алтая. Наблюдения проводились на участке профиля, пересекающего зону выхода на дневную поверхность эффузивно-осадочных отложений, имеющих крутые углы наклона.

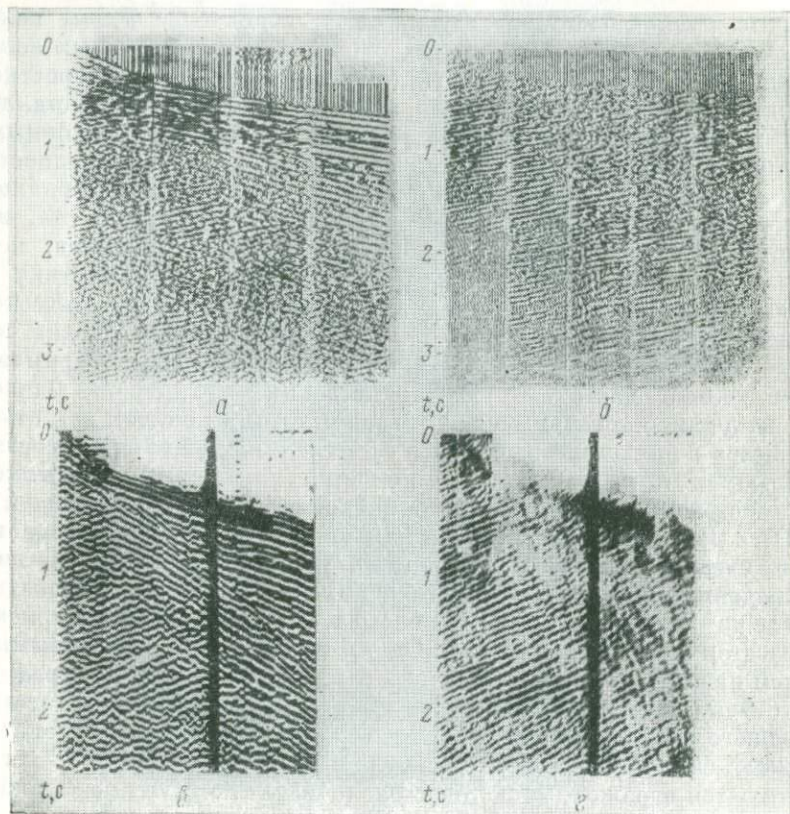


Рис. 59. Пример вычитания волн по материалам рудной сейсморазведки
а — исходная сейсмограмма; б — вычитание волн-помех электрическими фильтрами;
в — воспроизведение способом переменной плотности; г — результат оптического вычитания волн-помех

При наблюдениях из пунктов взрыва, расположенных по падению горизонтов, регистрируются отраженные волны, имеющие отрицательные значения кажущихся скоростей. Эти волны выходят в первые вступления на пикетах профиля, совпадающих

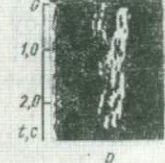
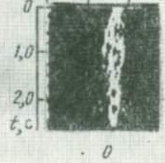
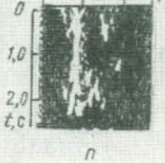
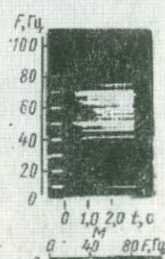
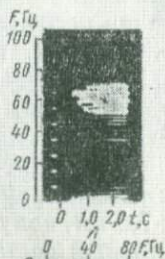
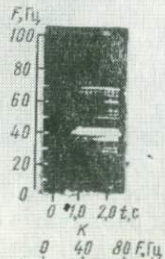
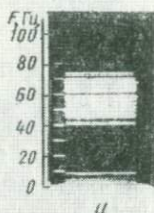
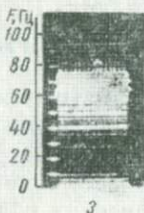
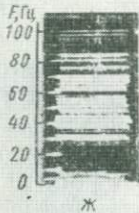
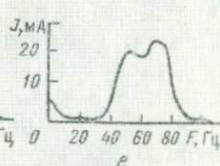
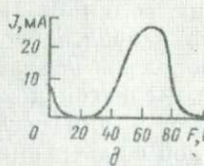
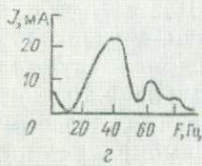
с выходами на поверхность границ раздела эффузивно-осадочной толщи. На сейсмограмме выделяются и группы волн с кажущимися скоростями, близкими по величине и совпадающими по знаку с кажущимися скоростями первых вступлений, а также интенсивные низкоскоростные волны-помехи.

С помощью оптического фильтра осуществлена линейная фильтрация для разделения волн, имеющих разные по знаку и значению кажущиеся скорости. На рис. 59, *г* приведен результат вычитания волн, которые мешают прослеживанию полезных отражений с отрицательными значениями кажущихся скоростей. Для сравнения приведен результат вычитания волн-помех при помощи электрических фильтров (рис. 59, *б*).

Результаты оптической фильтрации по кажущейся скорости в ряде случаев оказались достаточными для осуществления уверенной корреляции полезных отраженных волн. Однако вследствие ограниченного динамического диапазона фотоматериалов не всегда отчетливо прослеживаются полезные волны после вычитания более интенсивных волн-помех. Поэтому при последующей машинной обработке наиболее сложных участков сейсмических профилей использовалось направленное группирование, причем величина временных сдвигов между каналами при электрическом вычитании помех и для выделения полезных волн, а также параметры частотной фильтрации выбирались на основании результатов анализа материалов на лазерной установке [46].

По опыту обработки материалов рудной сейсморазведки на аналоговых машинах или на ЭВМ известно, что нередко случаи, когда не удается выбрать параметры фильтрации, оптимальные для всего временного интервала регистрации полезных сейсмических волн. На подбор параметров затрачивается много машинного времени, и часто выбор их не основан на каких-то знаниях о спектральном составе сейсмических волн. В этом случае, так же как и при обработке материалов нефтяной сейсморазведки, большую помощь могут оказать спектры, полученные на лазерной установке и характеризующие изменение частотного состава сейсмических волн, зарегистрированных на разных временах. На рис. 60 приведены данные спектрального состава сейсмических волн, регистрируемых в районе Печенгской структуры на Балтийском щите. Для трех сейсмических трасс, отстоящих от пункта взрыва на расстояния 1,5, 5 и 7,0 км, получены различные спектры, которые характеризуют: частотный состав волн для всей трассы (рис. 60, *ж, з, и*); полосу частот, преобладающих в сейсмической записи (рис. 60, *г, д, е*); характер изменения частотного состава волнового поля с увеличением времени регистрации сейсмических волн (рис. 60, *к, л, м*); характер изменения с течением времени частотного состава сейсмических волн, соответствующих временному интервалу 0,3 с (рис. 60, *н, о, п*).

Анализ частотных спектров по различным участкам Печенгской структуры позволил сделать следующие выводы: полоса



регистрируемых частот сейсмических сигналов составляет 20—70 Гц; активная полоса спектра сейсмических волн смещается в область низких частот на 15—20 Гц с удалением от пункта взрыва на 5—7 км; с увеличением времени регистрации сейсмических волн на 2 с максимум спектра смещается в область низких частот на 10—15 Гц; частотный спектр сейсмической записи определяется не только расстоянием взрыв — прибор, но и условиями возбуждения и приема; отмечены резкие изменения частотного спектра записи при изменении условий установки приборов.

Результаты частотного анализа, проведенного по различным районам, свидетельствуют, что активная полоса спектра волн при рудной сейсморазведке сдвигается в область высоких частот в среднем на 10—15 Гц по сравнению со спектром волн при нефтяной сейсморазведке.

Из других видов сейсморазведочных работ, материалы которых обрабатывались на лазерных установках, следует отметить штриховые разрезы МРНП, материалы сейсморазведки поперечными и обменными волнами, а также КМПВ.

Для когерентного монохроматического лазерного света штриховые разрезы МРНП представляют щелевые дифракционные решетки, характер дифракционных картин которых связан с особенностями разрезов. Следовательно, с этими разрезами можно проводить все фильтрации, которые проводятся с разрезами, записанными способом переменной плотности или площади. Фильтрация по кажущейся скорости осуществляется для снятия изображений тех векторов и площадок, которые по общим геологическим представлениям о строении данного района не отвечают истинному положению горизонтов и обусловлены различного рода помехами. Эта операция делает разрез более упорядоченным, что повышает его наглядность и улучшает прослеживание интересных горизонтов. Фильтрация по частоте для этих разрезов имеет несколько иной смысл. Снимая изображения высоких частот, мы оставляем низкочастотные составляющие в спектрах каждой щели и теряем тем самым четкое изображение отдельной щели. Это приводит к расфокусированию разреза, но позволяет на месте совокупности площадок, имеющих определенное направление на разрезе получить одну суммарную (осредняющую) линию. В результате получается разрез, похожий на разрез в виде переменной плотности, на котором выделяются полутона: местам, где на оригинале площадки были наложены часто, соответствуют более светлые участки, и наоборот.

Рис. 60. Частотный анализ материалов рудной сейсморазведки (Печенгская структура).

а, б, в — сейсмические трассы, выбранные для анализа; *г, д, е* — амплитудные спектры сейсмической записи; *ж, з, и* — одномерные спектры сейсмических трасс; *к, л, м* — тенюющие спектры сейсмических трасс; *н, о, р* — мгновенные спектры сейсмических трасс при $\Delta t = 0,3$ с

Такая фильтрация штриховых разрезов оказывается полезной в случаях, когда на оригинале трудно выделить основное направление площадок, а также тогда, когда нужно получить осреднение площадок. Штриховые разрезы по районам со сложными сейсмогеологическими условиями характеризуются обилием разнонаправленных площадок. В этих случаях, помимо оптической фильтрации применяют фотометрирование исходного разреза для выделения преобладающего направления штрихов, соответствующих определенному временному или глубинному интервалу [79].

Данные сейсморазведки поперечными волнами, характеризующиеся тем, что для интерпретации используют разностные сейсмограммы, составленные из сейсмических записей противоположного знака, часто оказываются весьма сложными. В то же время отмечено, что волны-помехи отличаются от полезных волн частотным спектром или значением кажущейся скорости. Это позволило с успехом использовать оптические системы как для фильтрации, так и для изучения закономерностей изменения частотного состава полезных волн и волн-помех.

Сейсмические записи КМПВ и метод проходящих обменных волн (МПОВ), воспроизведенные способом переменной плотности или переменной площади, по виду часто близки к данным ВСП. Прямолинейность осей синфазности преломленных волн и малая крутизна годографов отраженных волн позволяют осуществлять веерную фильтрацию для улучшения прослеживания волн, интересующих интерпретатора.

Районирование территорий с целью выделения участков, благоприятных для проведения работ методом ОГТ

Основой повышения геологической эффективности сейсморазведочных работ является применение систем наблюдения многократных перекрытий с последующим суммированием по методу ОГТ. Правильное использование этой методики, которая не является универсальным средством получения полезной информации в любых сейсмогеологических условиях, зависит от знания особенностей изменения характеристик кратных волн-помех исследуемого района. Для получения этой информации разработана методика районирования территорий, т. е. выделение площадей, благоприятных для прослеживания однократных отраженных волн с помощью многократных перекрытий.

Методика районирования базируется на оптическом спектрально-корреляционном анализе и оптической фильтрации сейсмических записей. В качестве дополнительной информации используют данные суммирования по криволинейным и прямолинейным осям синфазности [47, 82].

Рассмотрим принципы районирования, выполненного на основе экспериментального анализа материалов ВСП, зондирований МОВ и МОГТ, участков профильных наблюдений и статистической оценки полученных результатов с использованием эмпирических формул на территории Московской синеклизы. Успех районирования подтвержден практическими сейсморазведочными работами МОГТ, выполненными в пределах региона.

Сейсмические записи ВСП, МОВ, МОГТ по участкам Московской синеклизы воспроизводились на ПСЗ-4, Луч-1, ЦС-621 способом переменной площади или плотности с АРУ и без АРУ, на открытом канале и на фильтрациях в зависимости от задач последующей оптической обработки и анализа исходной информации. На лазерной установке выполнялась оптическая фильтрация с целью изучения диапазона кажущихся скоростей волн-помех и спектрально-корреляционный анализ материалов с целью изучения частного состава полезных волн и волн-помех, установления наличия кратных волн, изучения их кинематических и динамических характеристик, оценок соотношения кратных и однократных волн. По функциям автокорреляции, зарегистрированным фотозлектрическим способом, определялось количество вторичных максимумов, симметричных относительно центрального, их сравнительная интенсивность, величины временных (пространственных) сдвигов τ и их соответствие значениям z_0 основных отражающих горизонтов (основных кратно-образующих границ).

По результатам анализа материалов с помощью лазерной установки выделены общие характеристики волнового поля Московской синеклизы и некоторые закономерности его изменения. Так, всюду на сейсмограммах в интервале времен 1—1,7 с, соответствующих додевонским отложениям, регистрируется сложная интерференционная картина, обусловленная наложением кратных и однократных волн. В большинстве случаев кратные и однократные волны имеют близкие значения t_0 . Спектры кратных и однократных отраженных волн не отличаются, что делает невозможным разделение их с помощью частотной селекции. Подавляющая часть кратных отраженных волн формируется в верхней части разреза.

В интервале 0—1000 м от пункта взрыва кратные отраженные волны практически не отличаются от однократных по кинематическим признакам. В связи с этим разделение однократных и основных типов кратных волн с помощью МРНИ или верной фильтрации становится возможным лишь на больших удалениях от пункта взрыва и при базе суммирования 700 м. Однако всюду при достаточном удалении от пункта взрыва удается выделить однократные отраженные волны. Сопоставление выделенных однократных волн с данными каротажа ближайших скважин позволило отождествить по всем зондированиям ОГТ однократные отражения, связанные с отложениями среднего ордовика, вендского и рифейского комплексов протерозоя.

При интерпретации результатов экспериментальных работ выделен ряд характеристик, использование которых позволило отнести исследуемый участок к площади, благоприятной или неблагоприятной для выделения однократных волн на фоне кратных волн-помех.

По данным спектрально-корреляционного анализа материалов ВСП и МОВ определяли факторы, влияющие на методику последующих сейсмических исследований. Уменьшение количеств побочных максимумов или снижение их интенсивности при переходе от низкоскоростной толщи к высокоскоростной считалось благоприятным фактором, дающим основание предполагать, что кратные волны, слабо отличающиеся от однократных по кинематическим признакам, играют меньшую роль в формировании волнового поля. Благоприятным фактором считалось также уменьшение количества побочных минимумов или снижение их интенсивности при переходе в додевонскую толщу.

К неблагоприятным факторам относили: повышение интенсивности максимума, соответствующего кровле карбонатной толщи, по сравнению с интенсивностью других побочных максимумов (это свидетельствовало о наличии резкой кратнообразующей границы); наличие значительного количества побочных максимумов с малыми значениями τ , что свидетельствовало о наличии кратных волн, слабо отличающихся по кинематическим характеристикам от однократных; наличие нескольких интенсивных побочных максимумов, а также малые значения τ наиболее интенсивных побочных максимумов функции автокорреляции.

При использовании рассмотренных факторов должны возникать (и возникали) такие ситуации, когда с одних позиций участок можно было отнести к «легким», с других — к «тяжелым» для выделения однократных отраженных волн. С целью определения единой характеристики участка выполнена статистическая обработка данных. Благоприятным факторам присваивалось значение 2, неблагоприятным — значение 0, в случаях неоднозначности отнесения характеристики к тем или иным — значение 1. Эти значения выписывались в таблицы и вычислялись средние значения. Диапазон изменения средних значений делится на три зоны; каждой зоне присваивался значок, который и выносился на карту [82].

Использование результатов количественного спектрально-корреляционного анализа записей МОВ, ВСП и разрезов t_0 позволило получить дополнительные данные для районирования территории по принципу возможности выделения однократных волн на фоне кратных волн.

Автокоррелограмма, зарегистрированная фотоэлектрическим способом, содержит характерные показатели, которые должны быть учтены при оценке возможности выделения однократных волн. Основные из них следующие.

1. Положение на оси временных (пространственных) сдвигов τ

первого из побочных максимумов функции автокорреляции τ_1 . Очевидно, что возможность выделения однократных отраженных волн на фоне кратных возрастает с увеличением τ_1 , так как это указывает на большие различия в кинематических характеристиках кратных и однократных волн (большой период кратности соответствует большому дополнительному пути кратной волны).

2. Положение на оси τ наиболее интенсивного из побочных максимумов функции автокорреляции τ_2 . Из тех же соображений следует, что возможность выделения однократных волн возрастает с увеличением значения τ_2 .

3. Число побочных максимумов функции автокорреляции m . Очевидно, что чем больше m , тем больше кратных волн различных типов регистрируется на данном участке, а отсюда следует, что возможность выделения однократных волн уменьшается с ростом m .

4. Суммарная амплитуда побочных максимумов функции автокорреляции A . Для сопоставления этой величины по различным участкам графики функции автокорреляции должны быть нормированы, т. е. величина главного максимума функции автокорреляции должна быть принята за единицу. Так как рост величины A свидетельствует о возрастании интенсивности поля кратных волн в суммарном волновом поле, возможность выделения однократных волн с ростом величины A уменьшается.

5. Наличие на функции автокорреляции нескольких фаз, относящихся к главному максимуму, свидетельствует о периодичности записи, что снижает возможность выделения однократных отражений на фоне квазисинусоидальной (и, по-видимому, содержащей волны-спутники) записи. Обозначим длительность записи импульса, представляющего главный максимум функции автокорреляции, через τ_3 .

Из изложенного выше вытекает выражение для коэффициента P , являющегося количественным параметром сейсмогеологических условий и учитывающего перечисленные выше характеристики функции автокорреляции:

$$P = \tau_1 \tau_2 / m A \tau_3. \quad (3.11)$$

Участок считался благоприятным для выделения однократных волн при значениях $P \leq 2,0$ и неблагоприятных при $P \leq 0,9$.

Составленная в результате описанных работ схема районирования территории Московской синеклизы (рис. 61) дает представление об условиях выделения однократных отраженных волн в региональном плане и позволяет сделать ряд важных выводов о направлении сейсморазведочных работ с целью изучения додевонских горизонтов. Характеристики участков, определенные двумя независимыми способами (анализ зондирований МОГТ с помощью МРНП и спектрально-корреляционный анализ наблюдений ВСП, MOV) совпадают. Результаты проведенных позже

Рис. 61. Схема районирования территории Московской синеклиз.

1, 2 — связанные, соответственно вскрывшие и не вскрывшие фундамент; 3 — скважины по которым получена функция авторрелиеги; 4 — изогипсы поверхности карбонатного комплекса; 5 — профили МОГТ; 6, 7 — зондирования МОВ и МОГТ; 8 — локальные поднятия и структурные осложнения, выявленные сейсморазведкой и бурением; 9 — то же, но предполагаемые по данным геофизических работ и геологических съемок; 10, 11, 12 — соответственно участки, благоприятные, неблагоприятные и средней сложности для выделения однократных волн; 13 — границы зон благоприятных для постановки работ МОГТ

работ МОГТ и МРНП хорошо согласуются с данными проведенного районирования [28, 51, 82].

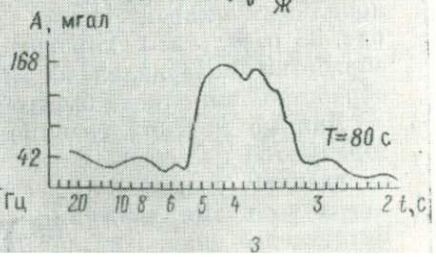
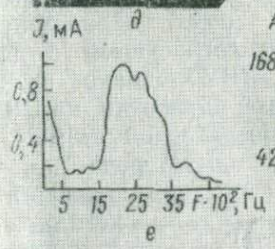
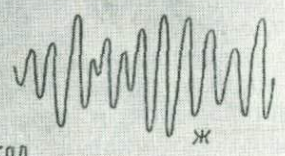
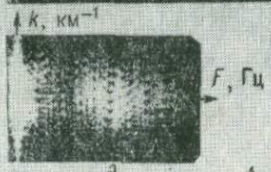
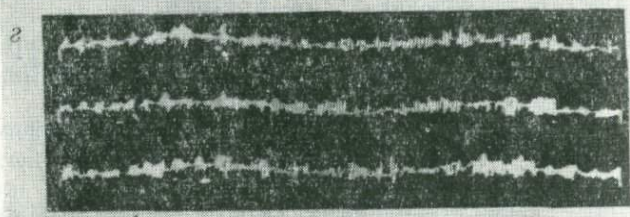
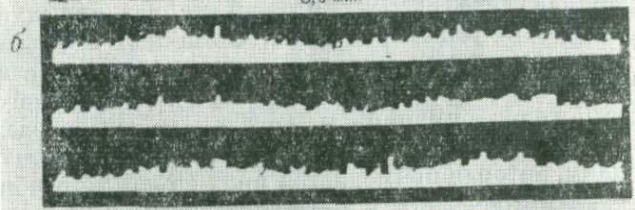
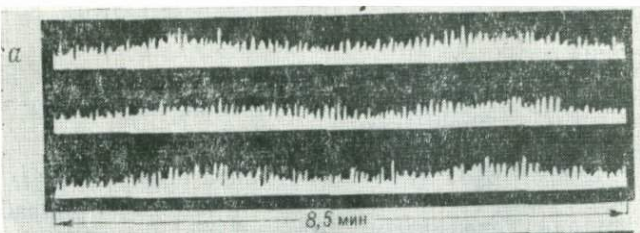
Обработка аэромагнитных, гравиметрических и других данных маршрутных съемок

К настоящему времени накоплен большой опыт применения когерентных оптических систем для обработки и анализа графических материалов различных съемок. Общность решаемых задач, связанных с необходимостью выделения из наблюдаемых данных региональной и локальной составляющей того или иного поля, его трансформации и пересчеты на определенные уровни вниз или вверх, позволяет использовать методику, которая применяется при оптической обработке гравиметрических и магнитных данных (см. гл. II). Рассмотрим некоторые результаты ее применения на примере обработки материалов аэромагнитной съемки в Восточных Саянах и материалов морской гравиметрии, полученных при работах на Черном море.

Примеры графиков ΔT аэромагнитной съемки района Восточных Саян приведены на рис. 37, а. Графики наблюдаемого магнитного поля построены по профилям, пересекающим вкрест простирающиеся основные региональные структуры исследуемой территории (Минусинскую впадину, Дербинский антиклинорий, Рыбинско-Асульскую наложенную впадину).

С помощью лазерной установки осуществлены одновременная для всех исходных графиков частотная фильтрация наблюдаемого поля, фильтрация по направлению осей локальных аномалий и спектрально-корреляционный анализ исходного поля. Это позволило решить задачи осреднения графиков, выделения составляющих поля, квазипересчета поля в верхнее и нижнее полупространство, анализа спектральных составляющих и периодичности повторения помех или локальных характеристик поля. Приведенные на рис. 38 результаты хорошо согласуются с данными обработки материалов на ЭВМ, однако оптическая обработка выполнена быстрее обработки на ЭВМ.

Данные морской гравиметрической съемки характеризуются наложением различного рода помех, обусловленных спецификой регистрации показаний гравиметра во время движения судна, на истинное гравиметрическое поле. При обработке этих данных решают задачи ослабления наложенных помех, для чего используют трудоемкие операции, выполнение которых



требует больших затрат ручного труда и времени ЭВМ. Например, перфорационная подготовка для ввода в ЭВМ записи гравиметра длительностью 5 мин занимает около 3 ч времени. При использовании лазерных установок время обработки значительно сокращается, при этом решают те же задачи, которые перечислены для материалов магниторазведки.

Так как низкочастотная фильтрация равносильна процессу сглаживания графиков, то выделение региональной составляющей поля выполняют путем низкочастотной оптической фильтрации. Применение этой фильтрации равносильно операции продолжения поля вниз, так как при этом снимают влияние коротковолновых компонент поля, которые возникают вследствие различных причин.

Выделение локальной составляющей или коротковолновых помех осуществляют либо непосредственно высокочастотной оптической фильтрацией, либо используют способ, при котором результат выделения региональной составляющей накладывают на исходные графики и разницу переносят на кальку.

На рис. 62 приведены примеры оптической фильтрации гравиметрических данных, полученных по профилям в Черном море. Для обработки взяты участки, соответствующие продолжительности записи морского гравиметра 8,5 мин. Применением низкочастотного фильтра с разными параметрами получены разные варианты сглаживания (осреднения) графиков, один из которых приведен на рис. 62, б. И, наконец, в результате выделения очень низких частот, получена региональная составляющая (рис. 62, в) наблюдаемого поля. Высокочастотными фильтрами выделены локальные аномалии и помехи наблюдаемого поля (рис. 62, г). Используя результаты оптической фильтрации и исходные графики, осуществлен квазипересчет поля на разные уровни.

Задача изучения спектральных составляющих поля решается на лазерной установке простым преобразованием Фурье исходных графиков с получением двумерных либо одномерных спектров с последующей их регистрацией фотографическим или фотоэлектрическим способом. Спектр эталонируют или путем использования специальной шкалы «елочки», которая изготавливается в масштабе реального времени полевой записи данных, или расчетным путем по формулам (2.37).

Пример спектрально-корреляционного анализа приведен на рис. 62, д, е и 63, б, из которых видно, что высокочастотные

Рис. 62. Примеры оптической фильтрации и спектрально-корреляционного анализа материалов морской гравиметрии.

а — графики гравиметрических наблюдений; б, в — результат применения низкочастотного фильтра; г — результат применения высокочастотного фильтра; д, е — двумерный спектр исходных графиков, зарегистрированный соответственно фотографическим и фотоэлектрическим способами; ж, з — участок исходной гравиметрической записи и его спектр, рассчитанный на ЭВМ

составляющие наблюдаемого поля имеют спектр с активной полосой частот от $15 \cdot 10^{-2}$ до $35 \cdot 10^{-2}$ Гц. Для сравнения на рис. 62, *в* приведен спектр, рассчитанный на ЭВМ с использованием скользящего окна шириной 80 с по записи длительностью 40 мин (рис. 62, *ж*).

Приведенные на рис. 63, *б, в* одномерные спектры и автокоррелограммы позволили оценить частотный состав поля и установить наличие на исходных графиках помех, имеющих период

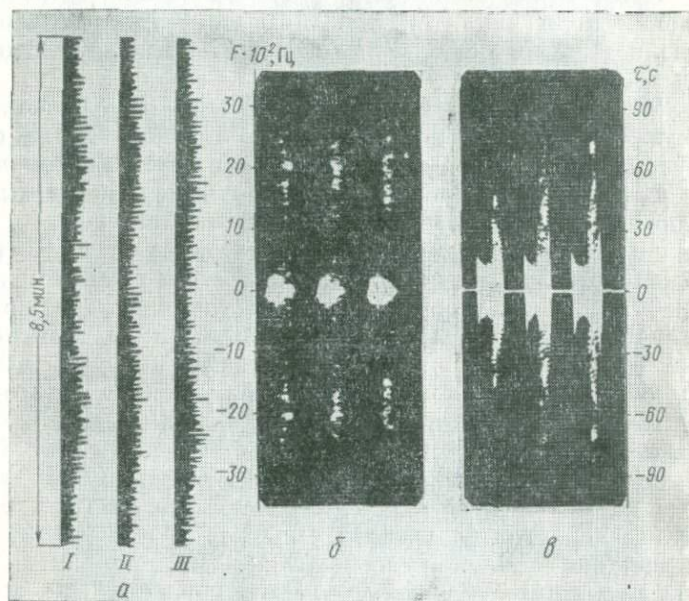


Рис. 63. Данные одномерного спектрально-корреляционного анализа исходных гравиметрических материалов.

а — исходные графики; *б* — одномерные спектры анализируемых графиков; *в* — автокоррелограммы исходных данных

повторения 4 с, а также аномальных значений поля с периодом повторения 45 с на I; 35 с — на II; и 35, 50, 75 с — на III графике.

Аналогичные результаты получены при обработке материалов гамма-спектрометрии и геохимических наблюдений.

Обработка и анализ геологических материалов

Наиболее полное промышленное опробование оптической обработки геологической информации проведено на аэрофотоснимках, структурно-геологических картах, палеонтологических и литолого-петрографических объектах. При этом использовались как

когерентные, так и некогерентные оптические системы, в результате чего можно сказать, что при решении задач обработки, не требующих применения частотной фильтрации, с успехом можно применять некогерентные системы, если мощность источника света достаточно большая.

Независимо от вида геологической информации, основная задача обработки заключалась в преобразовании Фурье входных данных и регистрации полученных спектров фотографическим и фотоэлектрическим способом по определенной программе сканирования спектра и его развертки. Часто использовалась веерная фильтрация с целью выделения объектов, характеризующихся заметной ориентацией.

Трудности обычного дешифрирования аэрофотоснимков определяются тем, что фотографируемые площади нередко покрыты лесом, который закрывает поверхность и не дает возможности выделять направления трещин и мелкие формы рельефа. В этих условиях лазерные установки применялись для решения следующих задач: снятие изображения леса и при необходимости изучение его состава; изучение трещиноватости земной поверхности и определение преобладающего направления трещин; изучение структур, погребенных под четвертичным рельефом.

Первая и третья задачи решаются с использованием оптического частотного фильтра. Возможность фильтрации вытекает из того, что различные виды деревьев и кустарников имеют свою частоту посадки или произрастания в естественных условиях, а четвертичный рельеф имеет более мелкие формы и сильнее изрезан овражно-балочной сетью и руслами рек, чем поверхность третичного рельефа. Решение второй задачи возможно с использованием только веерного фильтра; при этом, наряду с фотографической регистрацией результатов оптической фильтрации, осуществляют фотоэлектрическую развертку спектра.

Данные дешифрирования, снесенные на один лист, часто оказываются весьма сложными для геологической интерпретации. Такие штриховые карты (рис. 64, а) подвергают дальнейшей оптической обработке с целью определения преобладающего направления трещин (рис. 64, в).

На рис. 65, а представлен фрагмент изображения ледяного поля одного из северных морей с различной ориентацией трещин, о чем говорит и вид двумерного спектра (рис. 65, б). Количественный анализ спектра позволил выделить две основные аномалии трещиноватости северо-западного направления (рис. 65, в), которые затем были подтверждены способом оптической фильтрации. Результаты такого анализа необходимы при прокладывании маршрутов кораблей в Ледяном поле и для решения ряда других задач.

Опыт работ показывает, что, применяя фотоэлектрический способ регистрации, можно решать широкий круг задач в самых различных исследованиях: установление закономерностей

распределения изолиний на карте, анализ гидрографической сети, выбор места строительства гидротехнических сооружений, исследование грунтов, анализ шлифов, изучение ископаемой фауны и микрофауны и др.

Результаты применения спектрального анализа и оптической обработки аэрофотоснимков, структурно-геологических карт и фауны рассмотрим на следующих примерах.

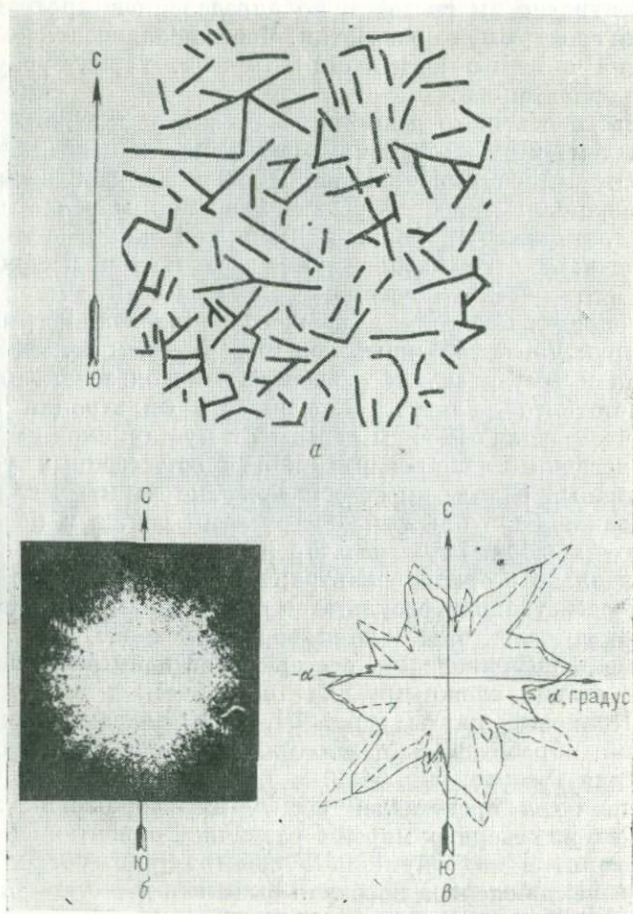


Рис. 64. Штриховая геологическая карта развития трещиноватости на одном из участков (а) и соответствующие ей двумерный спектр интенсивности (б) и розы-диаграммы (в), построенные по данным ручной обработки карты (пунктир) и по данным фотометрирования двумерного спектра (сплошная линия)

С целью оценки особенностей формирования эолового рельефа исследовалась асимметрия гряд песчаных наносов барханного

типа в районе Западной Туркмении. Оценка спектров показала, что барханы характеризуются стабильной асимметрией; левый по отношению к ветру рог бархана более развит, при этом биссектриса угла между левым и правым рогом всегда правее вектора ветра. В количественном отношении полученные данные хорошо соответствуют теоретическим. При обработке данных мегатрещиноватости Момо-Зырянского района вся территория была раз-

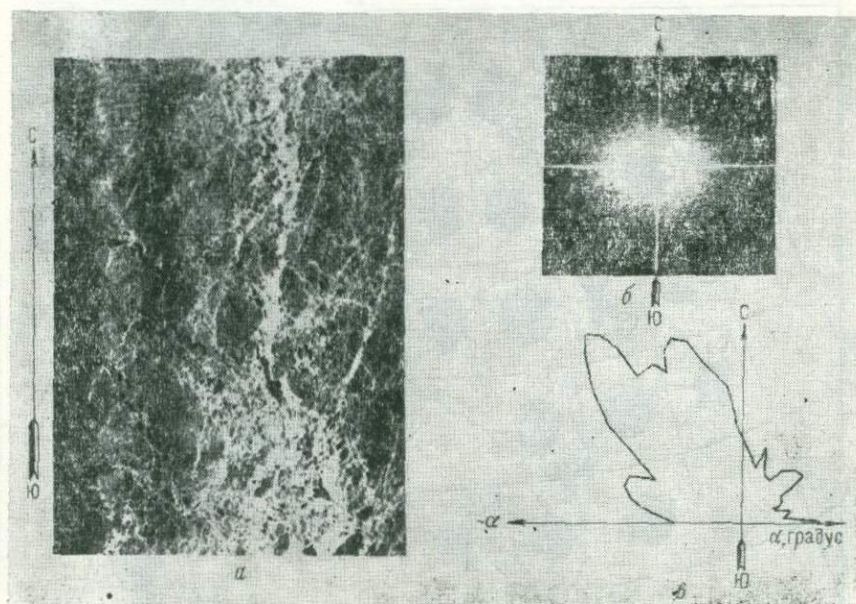


Рис. 65. Количественное определение преобладающего направления трещиноватости ледяного поля.

a — участок моря, покрытый льдом; *b* — двумерный спектр изображения; *c* — результат фотоэлектрической регистрации интенсивности светового потока

делена по сетке на элементарные участки. По этим участкам были получены спектры — аналоги круговых диаграмм, используемых в геологии. Путем корреляции спектров между собой вся территория была разделена на ряд структурно-тектонических зон. Подобная задача решалась при анализе данных мегатрещиноватости территории Западной Сибири, данных распределения осей магнитных аномалий по Восточной Сибири и данных батиметрии акватории Анадырского залива (Г. Р. Миркин).

Результаты проведенных работ позволили сделать вывод о высокой экономической эффективности оптической обработки по сравнению с применяемой для тех же целей традиционной ручной обработкой геологического материала. Анализ этих результатов

показывает, что чем больше объем одновременно обрабатываемого материала, тем выше эффективность оптических методов.

Изучение по двумерным спектрам распределения геомагнитного поля на территории Восточной Сибири (рис. 66) позволило сделать структурно-тектоническое районирование исследуемой площади и выявить определенные закономерности плотности и ориентации осевых линий магнитных аномалий.

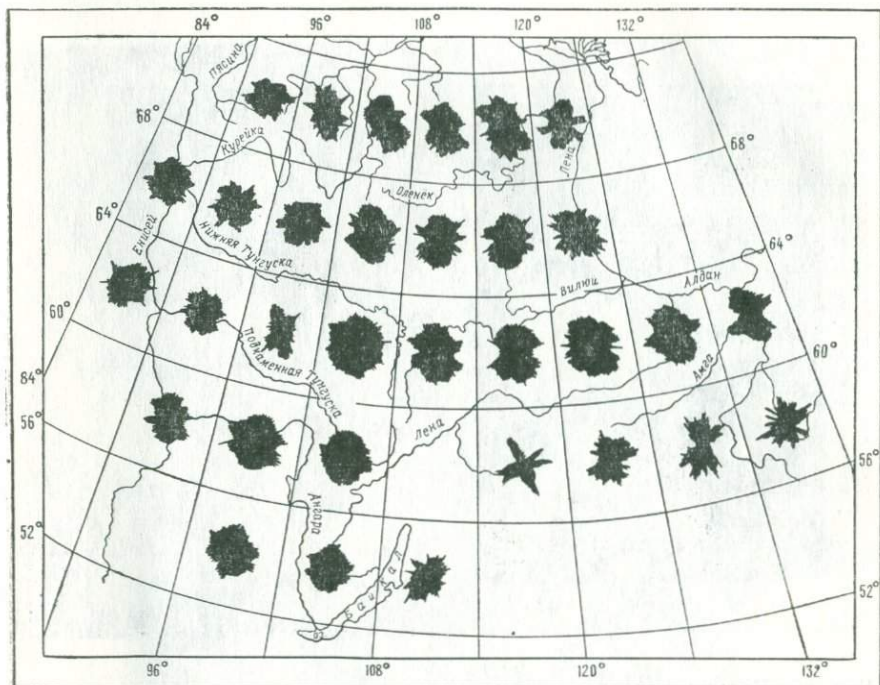


Рис. 66. Карта пространственных спектров распределения геомагнитных аномалий на территории Восточной Сибири

Оптическая обработка прозрачных шлифов показала, что, например, наблюдаемые обычно на спектре шлифа диабазы боковые максимумы связаны с тонкой линейной структурой, определяемой двойникованием плагиоклаза. Расположение этих максимумов свидетельствует о закономерном пространственном расположении двойникованных кристаллов, в то время как на изображении породы эта закономерность не выступает столь отчетливо (Г. Р. Миркин).

Анализ палеонтологических или микробиологических объектов, фотоснимки которых получены на электронном микроскопе, заключается в изучении спектральных особенностей исходных изображений и двумерной оптической фильтрации. Последнее имеет важное практическое значение при обработке фотоснимков

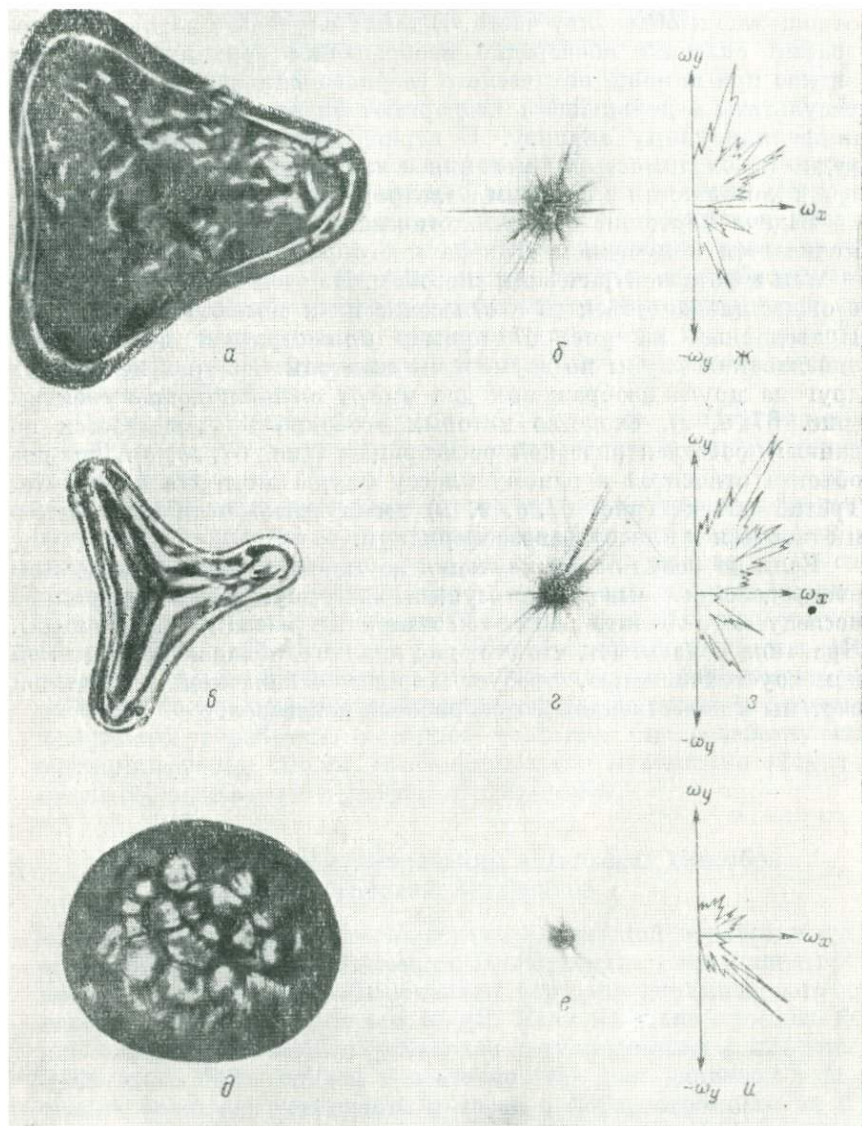


Рис. 67. Спектральный анализ палеонтологических объектов.

a, в, д — изображения фауны; *б, г, е* — двумерные спектры; *ж, з, и* — данные фото-электрической регистрации спектров

с электронного микроскопа, так как в силу плоского изображения объекта невозможно изучать нижнюю часть объекта. Если объект имеет спиралеобразную форму, то исследователей обычно интересует не только шаг спирали, но и ее поведение в нижней по отношению к объективу части. В таких случаях с исходной фотографии снимают поочередно изображения верхних и нижних витков при помощи оптического веерного фильтра, а полученные результаты в дальнейшем подвергают оптическому спектрально-корреляционному анализу. В период обработки возникает нередко необходимость применения и частотного оптического фильтра в комбинации с веерным фильтром.

Задача изучения палеонтологических объектов обычно ограничивается получением спектра и его регистрацией фотографическим и фотоэлектрическим способом. На этой основе производят отождествление объектов и отнесение их к тем или иным видам. Приведенный на рис. 67 пример иллюстрирует возможности опознавания фауны по двумерным спектрам. Из трех непохожих друг на друга изображений два имеют очень похожие спектры (рис. 67, б, з), сходство которых особенно подчеркивается по данным фотоэлектрической регистрации (рис. 67, ж, з). Эти два объекта относятся к одному классу фауны циатерия куспидата. Третий объект (рис. 67, д, е, и) имеет резко отличный спектр и относится к классу фавозасферидиум.

Если по результатам изучения двумерных спектров получены неопределенные выводы, то осуществляют двумерную корреляцию исследуемого объекта с 100—150 эталонами (известными формами). Практика показывает, что этот вид анализа, обладающий высокой помехоустойчивостью, требует хорошо отлаженной оптической системы и качественной фотообработки негативов.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Изложенное выше свидетельствует о больших возможностях лазерных установок при решении вопросов повышения скорости и эффективности обработки геологических и геофизических материалов. Имеющийся опыт и результаты промышленного опробования когерентных оптических систем говорят о необходимости их более широкого внедрения в практику геологических и геофизических исследований вследствие простоты их устройства, небольшой стоимости, быстрой реализации нужных алгоритмов и гибкости обработки.

Развитие оптической обработки на основе голографических преобразований возможно с использованием систем, изображенных на рис. 2 и 4.

Для получения голограмм Фурье нужно часть лазерного света направить в одну из плоскостей формирования спектра преобразования Фурье, минуя все элементы лазерной установки. За счет интерференции проходящих дифрагированных волн и опорного пучка формируется голограмма Фурье, с получением которой возможна разработка новых способов анализа и обработки материалов. Однако на данном этапе большое значение имеет разработка более совершенной аппаратуры и способов обычной оптической обработки, а также создание быстродействующих оптико-цифровых систем, необходимых для повышения эффективности геологических и геофизических работ.

Пути совершенствования оптических способов и систем обработки материалов

Наряду с большими возможностями оптической обработки существуют и некоторые ограничения. Применяемые в настоящее время носители информации обеспечивают передачу динамического диапазона сигналов в пределах 40 дБ. Если на этапе простого комплексования лазерных установок с аналоговыми и цифровыми ЭВМ этого было вполне достаточно, так как диапазон сейсмических сигналов временного разреза с фотопостроителя не превышает 20—25 дБ, то при создании оптико-цифровых систем обработки динамический диапазон должен быть на уровне цифровой регистрации данных.

Ввод в лазерную установку исходных данных, ориентировка массива информации, выбор и ввод программ обработки

осуществляется вручную. При проведении сложных операций, таких как фильтрация решетками или полупрозрачными экранами, когда требуется скрупулезная точность установки фильтра, ручной ввод программ обработки оказывается далеко не оптимальным, хотя и является, видимо, основным, так как при этом визуально на экране телевизора можно наблюдать результат обработки и с оперативностью, которую нельзя получить на других обрабатывающих системах, менять программу. Подготовка информации к вводу в лазерную установку сейчас занимает больше времени, чем чистое машинное время обработки. Поэтому основные перспективы развития обработки геолого-геофизической информации должны быть связаны с разработкой оптико-электронных комплексов, обладающих большой оперативной памятью, позволяющих автоматизировать некоторые операции в процессе обработки и сохранять высокий динамический диапазон сигналов.

Первоочередной задачей дальнейшего совершенствования лазерных установок, как части оптико-цифровых систем, является повышение разрешающей способности. В настоящее время применяемые линзы и фотоматериалы обладают разрешающей способностью 50 линий на 1 мм, хотя имеются сведения [9, 14, 17, 26], что достигнуто более высокое разрешение восстановленного изображения. Существует реальная возможность повышения разрешающей способности лазерных установок, по меньшей мере, на порядок путем использования специальных линз и фотоматериалов, например, тех типов, которые используются при фотосъемках поверхности Земли из околоземного космического пространства. Это позволит соответственно на два и более порядка повысить емкость оперативной памяти лазерных установок, т. е. довести ее до величины 10^9 — 10^{10} бит информации путем изготовления микрокопий с соответствующим коэффициентом уменьшения.

Другой важной проблемой является автоматизация подготовки информации к вводу, операций ввода и вывода информации, преобразования выведенной из лазерной установки информации. Совершенствование систем вывода информации при проведении работ качественного характера (без фотоэлектрических измерений) требует не слишком больших усилий. Автоматизация работ по фотографированию, фотообработке получаемых пленок и размножению их увеличенных копий с помощью проекционной аппаратуры в значительной мере проведена в кинопромышленности; прямое заимствование разработок из этой области почти полностью решает указанную проблему.

Проблема автоматизации вывода при количественных измерениях световых потоков является более сложной, хотя и вполне решаемой. Частичное решение ее обеспечивается отделением процесса фотометрирования от процесса обработки на лазерной установке путем фотографирования картины, подлежащей фотометрированию, и проведения количественных измерений на спе-

циальном приспособлении (например, микрофотометре ИФО-451), так как эта операция в принципе не нуждается в когерентном излучателе. Частично эта проблема решается проведением фотоэлектрических измерений непосредственно на лазерной установке.

Проблема вывода информации рассмотрена здесь с той точки зрения, что обработанные на лазерной установке материалы не подвергаются дальнейшей машинной обработке, а визуализируются и передаются интерпретатору. Такое решение проблемы вывода не может считаться исчерпывающим, так как, с одной стороны, сужает роль лазерных установок в комплексе машинной обработки, с другой — информация на выходе лазерной установки далеко не всегда представляет собой окончательный вариант геологической интерпретации. Несомненно более правильным решением проблемы вывода является вывод информации из лазерной установки на специальный носитель в закодированной для последующего ввода в ЭВМ форме.

Автоматизация процесса подготовки сейсмической информации к вводу в лазерную установку в настоящее время может быть обеспечена укомплектованием вычислительных машин специальным плоттером с записью на микрофильм, который разработан и выпускается отечественной промышленностью. Более важной проблемой является проблема сохранения на выходе ЭВМ и на выходе лазерной установки динамического диапазона полевой сейсмической записи.

Получивший широкое распространение способ вывода данных из ЭВМ на фотоноситель имеет несколько недостатков, основными из которых являются: сравнительно низкий динамический диапазон, ограничивающий возможность использования воспроизведения способом переменной плотностью; необходимость фотопроявления, что вводит дополнительные нелинейные искажения и замедляет процесс визуализации данных обработки; сложность дальнейшего преобразования для ввода информации в ЭВМ при последующей обработке материалов.

Большую часть существующих недостатков можно избежать, если использовать способы и средства записи выводной информации на термопластические или фотопластические материалы, позволяющие представить выходные данные в виде микрорельефа пластического слоя. Эти материалы выпускаются отечественной промышленностью и внедрены в смежных областях науки и техники [13]. Рельефная или термопластическая запись подобно магнитной может найти широкое применение в устройствах ввода — вывода информации и запоминающих устройствах вычислительных машин. При этом значительно увеличивается плотность записи, упрощается воспроизведение и реализуется возможность прямого ввода данных в лазерную установку.

Из существующих способов наиболее приемлемым является матричный способ термопластической записи двоичных сигналов, основанный на том, что пробивное напряжение воздушного

промежутка, разделяющего два электрода, имеет минимум, определяемый произведением давления воздуха на величину воздушного промежутка. Если напряжение превысит этот минимум, то произойдет разряд, в результате которого заряд переносится с электрода на поверхность термопластического носителя [13]. Если после этого термопластик нагреть, то он деформируется в соответствии с величиной заряда. Записанная информация фиксируется в результате охлаждения носителя и сохраняется до нового нагрева.

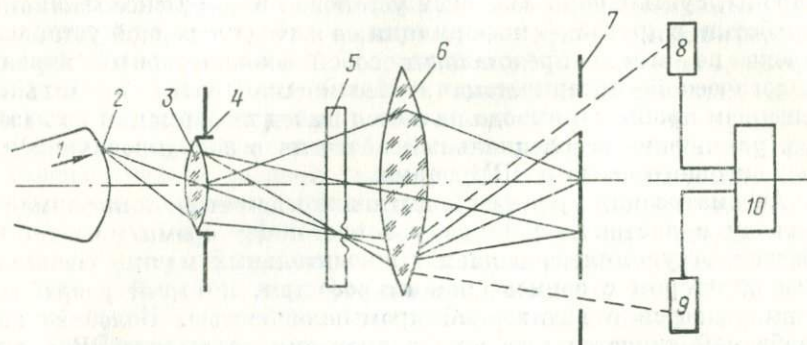


Рис. 68. Схема щелевого оптического устройства считывания двоичной термопластической записи для ввода информации в ЭВМ.

1 — электронный луч; 2 — светлое пятно; 3, 6 — линзы; 4 — системы щелей; 5 — носитель записи термопластик; 7 — выходная решетка; 8, 9 — фотоэлектронные приемники (ФЭУ); 10 — логическая система [13]

Применяемое в этом способе записи тепловое проявление, которое осуществляют электрическим нагревом проводящей подложки, имеет значительное преимущество по сравнению с приемами обработки экспонированных слоев в фотографии, в частности, осуществляется намного быстрее и легче поддается автоматизации. Время проявления составляет в данном случае 0,25 с, и изображение, составленное из 2000 линий, записывается за 0,2 с.

Записанная матричным способом на выходе ЭВМ информация может быть мгновенно визуализирована, отправлена в картотеку на хранение, введена в лазерную систему или при необходимости снова введена в ЭВМ для другого вида обработки. Матричный способ записи информации на термо- или фотопластик может быть использован и на выводе лазерной установки при считывании данных в ЭВМ.

Считывание выведенной информации при необходимости ввода ее в ЭВМ осуществляется щелевой оптической системой, приведенной на рис. 68. Выходная решетка 7 имеет вид двух щелей. За решеткой расположены два фотоумножителя 8 и 9. При считывании электронным лучом 1 от стенок рельефа термопластика 5, отражаются два луча одинаковой интенсивности, которые и реги-

стрируются фотоумножителями. Сигналы от фотоумножителей подаются на входы логической системы 10, которая формирует сигнал только при одинаковой работе двух фотоумножителей. В случае ложной единицы, вызванной какими-либо помехами, неравномерная засветка фотоумножителей приведет к тому, что система 10 не работает.

Можно использовать оптические устройства с неподвижным световым лучом, мимо которого протягивают термопленку с за-

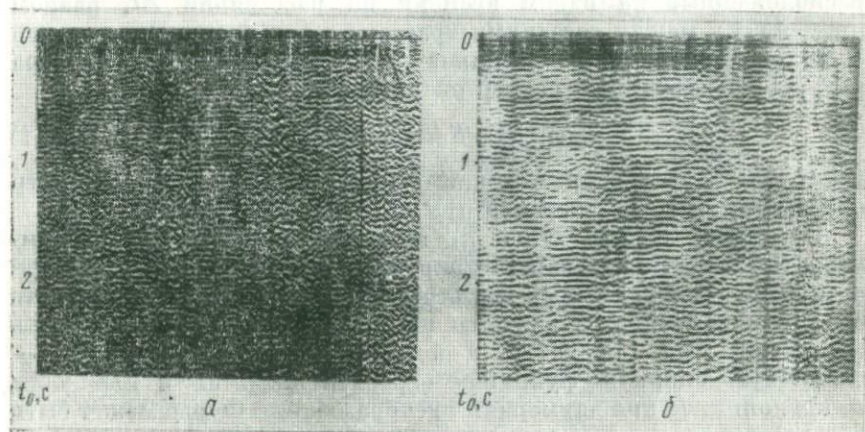


Рис. 69. Ослабление нерегулярных волн-помех путем фильтрации автокоррелограммы временного разреза.

a — исходный временной разрез; *b* — результат оптической обработки

писью информации или устройства со сканирующим лучом, осуществляющим последовательную выборку, и устройства другого типа.

Все те преобразования сейсмической информации, которые в настоящее время производятся вручную либо с помощью цифровых и аналоговых обрабатывающих машин, в принципе могут быть осуществлены на лазерных установках. Следует упомянуть также, что возможны такие способы преобразования сейсмической информации, которые даже не намечаются к разработке с помощью цифровых и аналоговых машин. К последним относятся способность проведения на лазерных установках операций по фильтрации корреляционных функций, что дает возможность резко снижать уровень нерегулярного шума (рис. 69), имеющего одинаковый с полезными сигналами спектр, а также осуществлять подавление кратных волн-помех.

С помощью лазерных установок можно осуществить все те алгоритмы обработки, составленные на основе гармонического анализа. Отсюда следует, что можно моделировать любые

интерференционные системы, например суммирование по МОГТ и по способу общей точки приема, осуществлять Д-преобразование сейсмических разрезов, пересчет полей и т. д. Некоторые из этих алгоритмов уже внедрены в производство, о чем говорилось выше, а часть из них находится в стадии опытно-методической разработки.

Так, например, операция смещения трасс разреза $2 \times 100\%$ равносильна его двумерной свертке в координатной плоскости с оператором $M(x, t)$, представляющим две единичные δ -функции, расположенные на одном времени на расстоянии Δl , равном промежутку между соседними трассами на разрезе. В частотной области эта операция равносильна умножению двумерного спектра разреза на двумерный спектр оператора

$$A(\omega, k) = S(\omega, k)M(\omega, k), \quad (4.1)$$

где $S(\omega, k)$ — спектр исходного разреза; $M(\omega, k)$ — спектр оператора; $A(\omega, k)$ — спектр отфильтрованного разреза.

Поскольку спектр $M(\omega, k)$ является в общем случае комплексной величиной, зарегистрировать его непосредственно невозможно. Голограммные фильтры позволяют зарегистрировать его функцию. Если в качестве источника одной из волн взять описанный выше оператор, а в качестве источника другой — единичную опорную функцию и расположить их в плоскости микрокопии, то при двумерном преобразовании Фурье может быть зарегистрирован квадрат модуля спектра. Спектр, зарегистрированный фотографическим способом, представляет собой голограммный фильтр.

Помещая исходный разрез в плоскости микрокопии, а полученный фильтр — в плоскости Фурье, мы получим в плоскости восстановления несколько изображений, соответствующих обратному преобразованию произведения спектра разреза и характеристики фильтра

$$A_1(\omega, k) = S(\omega, k) + S(\omega, k)[M(\omega, k)]^2 + \\ + S(\omega, k)M(\omega, k)e^{i2\pi(a\omega+bk)} + S(\omega, k)M^*(\omega, k)e^{-i2\pi(a\omega+bk)} \quad (4.2)$$

где a и b — функций координат единичного источника.

Интерес для нас представляет третий и четвертый члены в формуле (4.2), обратные преобразования Фурье которых изображают отфильтрованный разрез. Вследствие наличия фазовых множителей эти изображения будут смещены вверх и вниз относительно основного, обусловленного обратным преобразованием первого и второго членов в формуле (4.2).

Голограммные фильтры могут использоваться для создания практически любых интерференционных систем с постоянным оператором. Однако технология их получения и процесс фильтрации с их помощью имеет особенности, связанные с отношением

интенсивностей опорной волны и волн, образуемых микрокопией, а также точностью установки фильтров.

В соответствии с имеющимися способами оптического анализа лазерные установки способны поставлять все необходимые данные для расчета оптимальных и обратных фильтров. Однако операция обратной фильтрации, связанная в настоящее время с применением ЭВМ, также может быть осуществлена на лазерных установках.

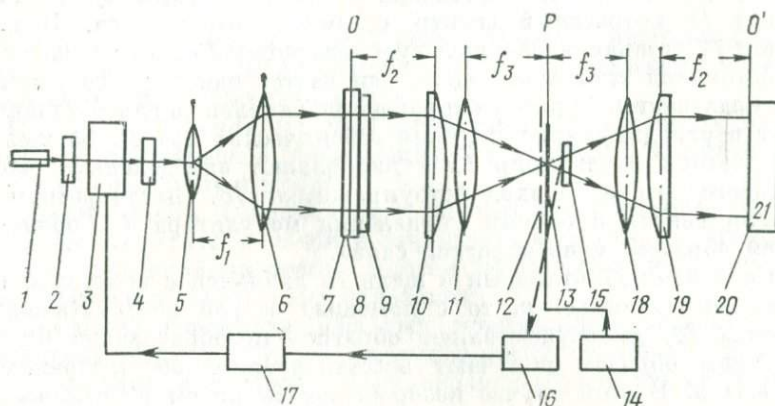


Рис. 70. Блок-схема лазерной установки для осуществления амплитудной деконволюции.

1 — лазер; 2, 4 — поляризаторы; 3 — модулятор света; 5 — объектив; 6 — коллимирующая линза; 7 — носитель разреза; 8 — микрокопия исходного разреза; 9 — диафрагма; 10, 19 — цилиндрические линзы оптической системы; 11, 18 — сферические линзы оптической системы; 12 — плоскость Фурье; 13 — шелевая диафрагма; 14 — блок управления шелью; 15 — полупрозрачное зеркало; 16 — фотоумножитель; 17 — блок управления модулятором; 20 — фотокамера; фотопленка

Осуществление ее оптическим способом может оказаться предпочтительнее проведения этой операции на ЭВМ, учитывая возможность выполнения обратной фильтрации одновременно для большого количества трасс.

В настоящее время деконволюцию осуществляют на ЭВМ. При этом даже амплитудная деконволюция (т. е. деконволюция в приближении нулевой фазы) считается весьма трудоемкой операцией, так как на преобразование Фурье квантованного колебательного процесса затрачивается много времени в связи с необходимостью оперировать с большими массивами информации и осуществлять большое количество вычислений. Эту операцию может выполнить лазерная установка, схема которой приведена на рис. 70. В этом устройстве используется принцип действия модуляторов света, основанный на электрооптических эффектах в кристаллах. Под действием приложенного напряжения, поступающего от блока управления модулятором 17 (БУМ), поворачивали плоскость поляризации лазерного излучения и изменяли тем самым интенсивность лазерного пучка. Оптическую

деконволюцию с использованием установки, приведенной на рис. 70, можно осуществить следующим образом.

С выхода коллиматора 6 расширенный параллельный пучок лазерного излучения падает на микрокопию 8 сейсмического временного разреза, содержащего несколько сотен сейсмических трасс во временном интервале записи от 0 до 4—6 с. При помощи астигматической оптической системы 10, 11 осуществляют преобразование Фурье одновременно всех трасс и формируют в плоскости 12 потрассный спектр сейсмического разреза. В плоскости 12 устанавливают щелевую диафрагму 13 и перемещают ее с постоянной скоростью вдоль оси частот одномерного спектра преобразования Фурье в направлении каналов (щель устанавливают перпендикулярно к линии сейсмических трасс). За щелью располагают отражатель 15 и направляют определенную часть светового потока на вход фотоумножителя 16. Выход фотоумножителя связан с блоком управления модулятора 17, образуя, таким образом, цепь обратной связи.

Если блок 17 отключен и щель 13 движется с некоторой постоянной скоростью v , то с помощью второй астигматической системы 18, 19 осуществляют обратное преобразование Фурье и таким образом получают восстановленное 20 изображение разреза 8. В этом случае изображение 20 ничем не отличается от изображения 8.

Можно выбрать лазер достаточной мощности, такой, чтобы при некоторой большой скорости перемещения щели 13 (при выключенной схеме обратной связи) изображение O' получалось с нормальной экспозицией. Деконволюцию же необходимо проводить при скорости перемещения щели на порядок ниже.

Если теперь блок 17 включен и работает линия обратной связи, то, когда щель начинает свое движение в плоскости Фурье, модулятор открыт и находится под напряжением, обеспечивающим интенсивность света $J_{гр}$. Когда щель подходит к области спектра, где интенсивность превышает значение $J_{гр}$, с ФЭУ поступает повышенное напряжение на блок 17, под действием которого модулятор поворачивает плоскость поляризации; при этом уменьшается интенсивность лазерного излучения. Когда щель подходит к области спектра, в которой интенсивность меньше значения $J_{гр}$, срабатывает линия обратной связи и увеличивается интенсивность лазерного излучения. В результате спектр временного разреза выравнивается и приближается к спектру белого шума. При непрерывном движении щели происходит непрерывная засветка фотоленки в плоскости 20, в результате чего регистрируется отфильтрованное по алгоритму деконволюции изображение 20 исходной микрокопии 8.

В настоящее время при сейсмологографических преобразованиях сейсмической информации на цифровых ЭВМ затрачивается значительное машинное время, что заставляет искать пути создания специализированных быстродействующих аналоговых или

цифро-аналоговых процессоров. В этом отношении определенные перспективы связаны с устройствами оптической обработки информации и специализированными устройствами для визуализации объемных изображений, в которых используют жидкие кристаллы [4].

Некоторые возможные схемы оптико-электронных систем обработки материалов

Усложнение процесса обработки сейсмических данных выдвигает в настоящее время следующие требования к техническим устройствам вычислительного центра:

1) наличие автономных быстродействующих устройств ввода и вывода сейсмической информации, связанных с внешней памятью основного процессора;

2) возможность оперировать с достаточно большим числом сейсмических трасс в течение короткого промежутка времени, для чего основной процессор должен иметь диски или большой объем памяти на магнитных барабанах;

3) наличие специализированных процессоров, позволяющих выполнять широкий набор операций (быстрое преобразование Фурье, свертка, корреляция трасс, различные виды суммирования и т. п.);

4) большой объем оперативной памяти и высокое быстродействие основного и предварительного процессоров;

5) развитое математическое обеспечение, позволяющее применять различные алгоритмы обработки и быстро модифицировать их в процессе работ;

6) возможность непосредственного диалога человека и машины, т. е. ЭВМ должна выдавать результаты обработки на любом ее этапе в форме, позволяющей интерпретатору быстро их оценивать и в случае необходимости тут же задавать новые параметры или новые варианты обработки.

В настоящее время требования к техническим средствам, удовлетворяющих перечисленным требованиям, практически нет. Отечественный и зарубежный опыт использования оптических систем для обработки геофизической информации показывает, что их комплексирование с ЭВМ позволит решить целый ряд существующих проблем обработки и значительно ускорить процесс получения конечных результатов с применением ЭВМ даже среднего класса. Специализированные оптические устройства, характеризующиеся сравнительной простотой, в сочетании с преобразователями лучистой энергии частично или полностью уже сейчас способны выполнять требования, перечисленные в пунктах 2—4, 6.

Блок-схема одного из вариантов оптико-цифрового комплекса обработки геофизических материалов показана на рис. 71. Рассмотрим эту схему на примере обработки материалов многократного сейсмического профилирования по системам ОГТ.

Воспроизводящее устройство ВУ визуализирует полевую запись 1, представляя ее в виде сейсмического временного разреза способом переменной плотности или переменной площади 2. На первом этапе лазерная установка работает как установка экспресс-анализа и оптической фильтрации.

В качестве анализатора лазерная установка характеризует временной разрез по составу волнового поля (диапазону кажущейся

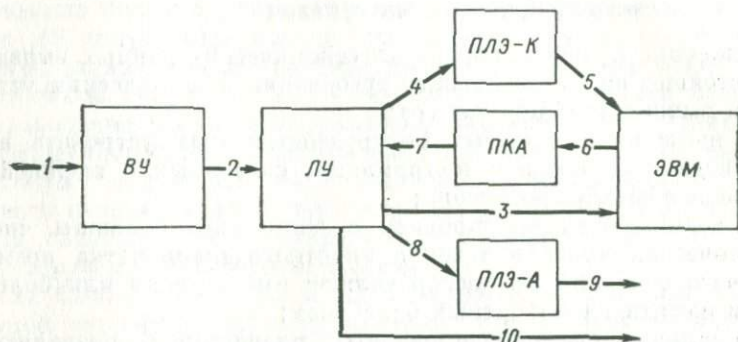


Рис. 71. Блок-схема оптико-цифрового комплекса обработки и анализа сейсмических материалов МОГТ.

1 — полевая запись; 2, 7 — временной разрез способом переменной плотности или площади; 3 — характеристика временного разреза; 4, 8 — дифракционное изображение разреза; 5, 6 — сейсмический разрез в цифровом коде; 9 — окончательный сейсмический разрез; 10 — оценка эффективности применения комплекса

щихся скоростей, частотному составу, наличию кратных волн, периодам кратности), дает необходимые количественные параметры для расчета оператора обратной фильтрации. Характеристики временного разреза 3 поступают в ЭВМ. Кроме того, лазерная установка очищает разрез от помех разного рода: некоррелированных шумов, регулярных волн-помех, не относящихся к классу отраженных, при благоприятных условиях ослабляет кратные отраженные волны; проводят предварительную фильтрацию по частоте и кажущейся скорости. Улучшенный сейсмический разрез 4 кодируется в преобразователе лучистой энергии — код (ПЛЭ — К) и передается в цифровом виде 5 на ЭВМ. Предварительное очищение сейсмического разреза значительно облегает и упрощает процесс обработки сейсмических данных по МОГТ на ЭВМ, освобождая ее от ряда трудоемких операций по корреляционному анализу, верной фильтрации, частотной фильтрации и т. п. ЭВМ производит суммирование по МОГТ и обратную цифровую фильтрацию с учетом сведений, полученных при экспресс-анализе. Выведенная из ЭВМ информация 6 визуализируется способом переменной плотности или площади 7 на преобразователе код — аналог (ПКА) и направляется снова в лазерную установку (ЛУ). На конечном этапе обработки с помощью лазерной установки производят дополнительную

частотную и свернутую фильтрацию (или несколько вариантов ее), а также оценку оптимальности примененного комплекса обработки корреляционного анализа. После визуализации окончательного варианта сейсмического временного разреза 8 на преобразователе лучистой энергии — аналог (ПЛЭ — А) разрез 9 вместе с оценкой эффективности обработки 10 поступает к интерпретатору для геологического истолкования.

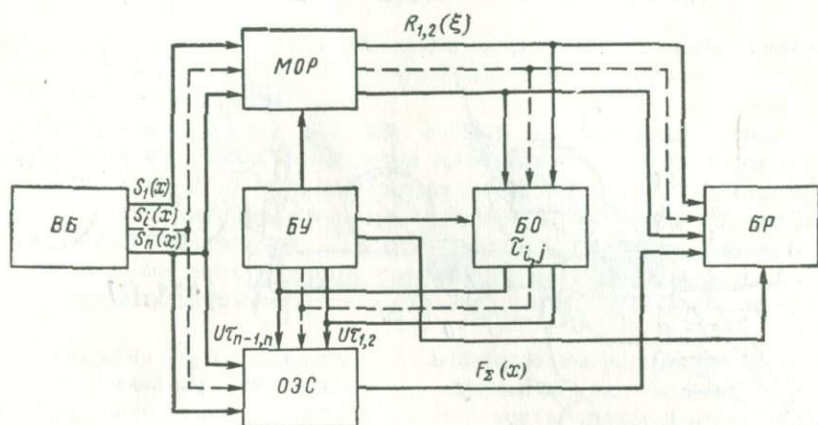


Рис. 72. Блок-схема оптико-электронного устройства

Разработка и внедрение рассмотренного оптико-цифрового комплекса позволит повысить производительность вычислительных центров, обеспеченных ЭВМ среднего и более высокого класса.

Оптико-электронные устройства уже при современных технологических возможностях допускают наиболее успешное сочетание достоинств оптических и электронных систем при автоматической обработке сейсмических материалов [22]. Рассмотрим оптико-электронные устройства на базе некогерентных оптических систем (рис. 72). Устройство позволяет осуществлять автоматическую корреляцию сейсмических записей $R_{1,2}(\xi)$ и по данным корреляционной обработки производить направленное суммирование трасс. Обработка информации в устройстве производится параллельно по 24 каналам. Устройство может также выполнять ряд массовых операций при обработке сейсмограмм: определение автокорреляционной функции и функций взаимной корреляции, спектров сигналов, разновременное суммирование $F_{\Sigma}(x)$ и т. д.

Устройство включает многоканальный оптический регулятор (коррелятор) МОР, оптико-электронный сумматор ОЗС, электронные блоки определения БО временных сдвигов τ_{ij} и управления БУ, блок регистрации БР. Исходная информация для обработки записывается в вводном блоке ВВ на фотоленку шириной 70 мм. Запись

на фотопленку может производиться способом переменной площади или переменной плотности. Предусматривается последовательная запись на фотопленку и непрерывная обработка в устройстве 24-канальных сейсмограмм. Упрощенная функциональная схема опико-электронной части устройства приведена на рис. 73.

В оптическом корреляторе используется точечный источник излучения S , лучистый поток от которого преобразуется в параллельный однородный пучок сферической линзой L_1 . Пленки

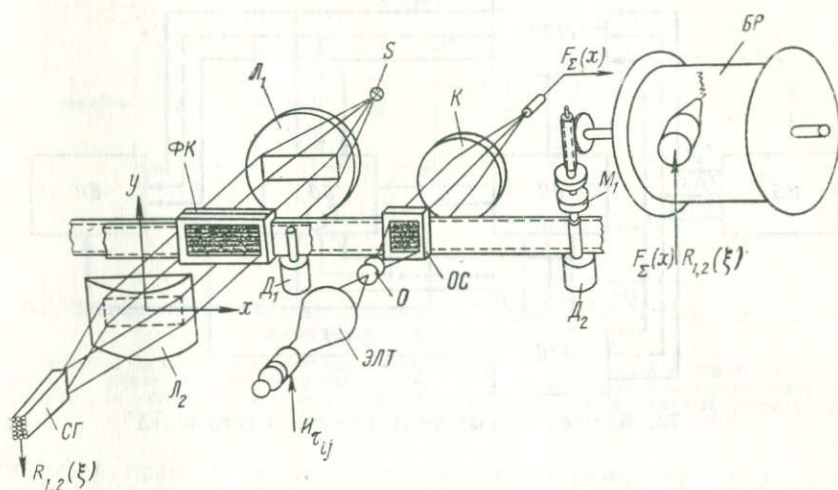


Рис. 73. Упрощенная функциональная схема опико-электронного устройства

с записью сейсмических трасс поступают в фильмный канал ΦK коррелятора, в котором производится поканальное сравнение. Цилиндрическая линза L_2 осуществляет пространственное интегрирование лучистого потока по оси x . Величина пространственного интервала интегрирования D_x устанавливается диафрагмой фильмного канала ΦK . В зависимости от способа записи сейсмических сигналов на фотопленку в корреляторе могут производиться одномерные корреляционные преобразования типа

$$R_1(\xi) = K \int_0^{D_x} S_i(x) S_j(x + \xi) dx, \quad (4.3)$$

$$R_2(\xi) = K \int_0^{D_x} |S_i(x) \pm S_j(x + \xi)| dx, \quad (4.4)$$

$$R_3(\xi) = K \left[\int_0^{D_x} |S_i(x) - S_j(x + \xi)| dx \pm \int_0^{D_x} |S_i(x) + S_j(x + \xi)| dx \right], \quad (4.5)$$

где $S_i(x)$; $S_j(x)$ — сравниваемые изображения сейсмических трасс на фотопленках; ξ — пространственный сдвиг; K — масштабный коэффициент.

При спектральном анализе запись сейсмических трасс на одной из фотопленок заменяется набором эталонных гармонических сигналов. В фокальной плоскости цилиндрической линзы L_2 располагается светоделительная головка $СГ$, состоящая из набора волоконных световодов. Лучистый поток по каждому каналу передается соответствующим световодом на фотоэлемент, в качестве которых применяются фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-60.

Величина D_x определяет методическую погрешность вычисления статических характеристик сейсмических записей, объем выборки входного сигнала N и частотную разрешенность корреляционного анализа. В корреляторе значение D_x может регулироваться от 50 до 200 мм. При этом максимальный объем выборки $N \approx 10^3$, частотная разрешенность при скорости записи сейсмических колебаний $v_3 = 200$ мм/с составляет 1 Гц. Протяжка пленок в устройстве осуществляется шаговыми двигателями D_1 , D_2 типа ШД-4. Скорость протяжки пленок может регулироваться в широких пределах путем изменения частоты напряжения питания шаговых двигателей. Нестабильность скорости протяжки пленок не превышает 0,05%.

Сигналы с выхода ФЭУ, пропорциональные значениям корреляционных функций (спектров) сейсмических записей, могут поступать в зависимости от выбранного режима работы либо непосредственно на регистратор $БР$, либо на электронный блок определения временных сдвигов $\tau_{i,j}$ (см. рис. 72).

В корреляторе в режиме суммирования записей по данным корреляционного анализа производится попарное вычисление функций взаимной корреляции анализируемых участков трасс $R_{i,j}(\xi)$ по 23 каналам. По одному каналу, определяющему начало отсчета сдвигов $\tau_{i,j}$, например первому, производится вычисление функции автокорреляции $R_1(\xi)$. В этом режиме напряжения с выхода ФЭУ поканально поступают на электронный блок определения $\tau_{i,j}$, в котором осуществляется формирование коротких импульсов привязки к положению наибольших значений $R_1(\xi)$, $R_{i,j}(\xi)$. Временные интервалы между импульсом привязки к наибольшему значению функции автокорреляции $R_1(\xi)$ и

импульсами привязки к наибольшим значениям функций взаимной корреляции $R_{i,j}(\xi)$ определяют величину среднего сдвига между анализируемыми участками трасс. В блоке определения $\tau_{i,j}$ временные интервалы, пропорциональные пространственным сдвигам $\xi_{i,j}$, преобразуются в напряжения и запоминаются. С выхода этого блока напряжения одновременно поступают на цифровую индикацию и оптико-электронный сумматор, в котором напряжения поканально преобразуются в пропорциональные отклонения яркостных штрихов на экране электроннолучевой трубки ЭЛТ (рис. 73). В устройстве применяется трубка типа 13ЛК5Б, обладающая высокой разрешающей способностью. Поперечный размер штрихов на экране ЭЛТ не превышает 0,15 мм. Изображения штрихов с экрана ЭЛТ проектируются с помощью объектива 0 на установленный в окне суммирования участок пленки для которого ранее производилось определение временных сдвигов $\tau_{i,j}$. Установка участка пленки в окне суммирования, рассматриваемого для режима работы, производится автоматически с блока управления устройством. В устройстве предусмотрена возможность исключения из обработки участков первых вступлений волн. Лучистый поток, проходящий через пленку с записью трасс, собирается конденсором K на входной зрачок фотоприемника сумматора. При перемещении пленки изменение потока будет осуществляться по закону

$$\Phi(x) = \Phi_0 \sum_{i=1}^n S_i(x \pm \xi_{i,j}), \quad (4.6)$$

где n — число суммируемых трасс, устанавливаемое оператором в процессе обработки материала.

В то время, когда в сумматоре производится направленное сложение колебаний для первого участка пленки, в корреляторе осуществляется вычисление корреляционных функций и определение сдвигов для следующего участка пленки. В процессе суммирования движение от шагового двигателя D_2 также передается через электромагнитную муфту M на барабан блока регистрации. Сигнал с выхода фотоприемника $F_2(x)$ поступает на оптическую головку блока, с помощью которой осуществляется его запись на фотоносителе.

Далее цикл обработки повторяется для следующих сейсмограмм и суммарные колебания регистрируются на фотоносителе в виде сжатого временного разреза. При обработке осуществляется жесткая пространственная синхронизация положения пленки и барабана, чем обеспечивается корреляционная увязка суммарных записей вдоль профиля в соответствии с номером обрабатываемого участка. В режиме разновременного суммирования напряжение на оптико-электронный сумматор задается с блока управления устройством. Форма линии суммирования и направления может изменяться оператором в процессе обработки. Время обра-

ботки одной 24-канальной сейсмограммы в режиме суммирования по данным корреляционного анализа составляет 12 с.

Структурная схема спектрального анализа сейсмических колебаний на базе некогерентной оптической и электронной системы приведена на рис. 74. Сейсмическая трасса дважды воспроизводится на экране электроннолучевой трубки ЭЛТ с высокой разрешающей способностью в виде одинаковых строк. Воспроизведение может осуществляться способом переменной ширины или

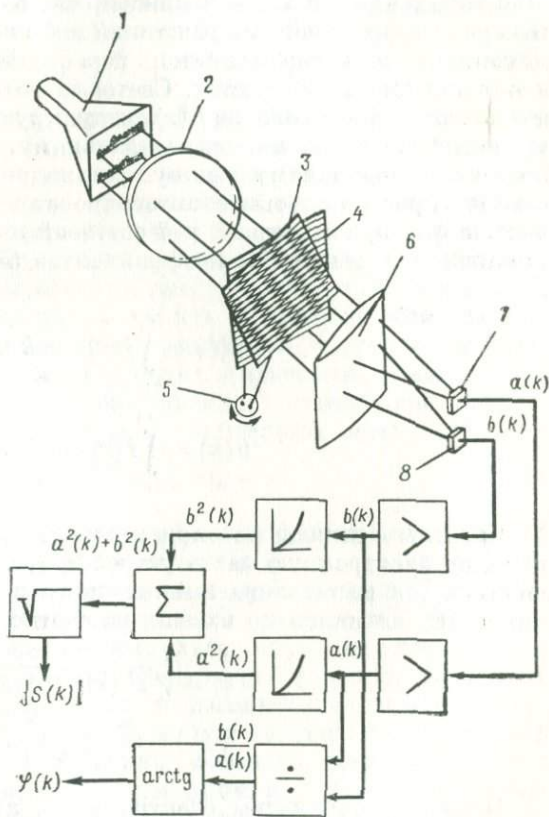


Рис. 74. Структурная схема оптико-электронного спектрального анализатора

плотности. Изображение сигналов проектируется с помощью объектива 2 в плоскость ввода базисных функций. Ввод базисных гармонических функций типа $\sin \omega x$ осуществляется модулятором, представляющим собой комбинацию из двух скрещенных дифракционных решеток 3 и 4. Модуляция светового потока такой комбинацией решеток будет осуществляться по закону

$$\Phi = a_0 + b \cos \left(\frac{4\pi}{d} x \sin \alpha - \varphi \right), \quad (4.7)$$

где a_0 — постоянная составляющая; α — угол между штрихами решеток; d — период решетки; φ — начальная фаза, зависящая от относительного положения штрихов решеток.

Для получения коэффициентов Фурье базисные функции должны иметь синусную и косинусную составляющие. В этой связи линии на дифракционных решетках нанесены со сдвигом на одной половине решеток относительно другой. В верхней половине решеток создается пространственная модуляция, пропорциональная $\sin kx$, а в нижней части решеток — $\cos kx$. При повороте дифракционных решеток 3 и 4 с помощью колебательного механизма 5 осуществляется перестройка муаровой картины в нужном диапазоне частот. Световые потоки, несущие информацию о записанном сигнале $f(x)$, модулируются в верхней половине муаровой картины по синусоидальному, а в нижней половине по косинусоидальному закону. Цилиндрическая линза 6 осуществляет пространственное интегрирование световых потоков. На выходе фотоприемников 7 и 8 световой поток в этом случае пропорционален значениям коэффициентов Фурье $a(k)$ и $b(k)$

$$a(k) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \cos kx, \quad (4.8)$$

$$b(k) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \sin kx. \quad (4.9)$$

Сигналы с выхода фотоприемника 7 и 8 после усиления поступают на электронную часть устройства, с помощью которой осуществляется вычисление амплитудного и фазового спектров сейсмических сигналов по известным соотношениям

$$c(k) = \sqrt{a^2(k) + b^2(k)}, \quad (4.10)$$

$$\varphi(k) = \arctg \frac{b(k)}{a(k)}. \quad (4.11)$$

Основные параметры спектрального анализатора, собранного по описанной схеме, определяются шириной интервала интегрирования D_x , периодом дифракционных решеток d , скоростью записи и разрешающей способностью ЭЛТ. В макете анализатора $D_x = 80$ мм; $d = 0,4$ мм.

Время записи сигнала, равное периоду развертки T_p , характеризует нижнюю частоту разрешения анализатора: $f_n = 1/T_p$. Верхняя частота анализа связана с максимальным волновым числом k_{\max} и определяется по формуле

$$f_n \cong \frac{1}{T_p} k_{\max} = f_n \frac{D_x}{q_{\min}} \text{ при } q_{\min} \geq r, \quad (4.12)$$

где q_{\min} — шаг комбинационных полос муара; $q_{\min} = d/2\sin(\alpha/2)$; r — диаметр пятна электронного луча.

Так как муаровая картина наблюдается лишь при углах скрепления α , не превышающих 30° , то $q_{\min} = 0,8$ мм. Поэтому частотный диапазон анализатора при $T_p = 0,5$ с составляет 2—200 Гц с разрешающей способностью 2 Гц, а при $T_p = 1$ с — 1—100 Гц с разрешающей способностью 1 Гц.

В случае применения дифракционных решеток с периодом 0,2 мм полоса частот анализатора расширяется в сторону верхних частот и при $T_p = 0,5$ с составляет 2—400 Гц с разрешающей способностью 2 Гц, а при $T_p = 1$ с — 1—200 Гц с разрешающей способностью 1 Гц.

Объем выборки входного сигнала N у анализатора составляет приблизительно 10^3 , время анализа определяется скоростью колебательного вращения и может быть доведено до нескольких миллисекунд. Таким образом, предлагаемый вариант анализатора сравнительно просто позволяет определять как амплитудные, так и фазовые спектры сейсмических сигналов. На макете анализатора изучены изменения формы фазового спектра участков сейсмической записи при перемещении вдоль трассы с определенным шагом.

Импульс неинтерферированной отраженной волны может быть аппроксимирован рядом аналитических выражений. Наибольшее распространение получило представление отраженной волны в виде колоколообразного импульса следующего вида:

$$f(t) = a_0 e^{-\beta t^2} \sin(2\pi f_0 t + \psi), \quad (4.13)$$

где a_0 — амплитудный коэффициент; β — коэффициент затухания; f_0 — частота синусоидального заполнения; ψ — начальная фаза.

Форма такого аппроксимирующего импульса может быть симметричной при $\psi = \pi/2$ и асимметричной при $\psi \neq \pi/2$. При $\psi = \pi/2$ возможно разложение импульса лишь по косинусным составляющим, поэтому фазовый спектр $\varphi(\omega)$ равен нулю на всех частотах. При других значениях ψ фазовый спектр $\varphi(\omega)$ принимает значения от $-\pi/2$ до $+\pi/2$, но для каждого конкретного ψ наблюдается постоянство величины фазового спектра во всем частотном диапазоне, составляющем примерно $(0,5-1,5)f_0$. Амплитудный спектр для всех ψ одинаков и соответствует

$$|S(\omega)| = \frac{\sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\frac{\omega_0}{4\beta^2} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]} \text{Sh} \left[\left(\frac{\omega_0}{\beta}\right)^2 \frac{\omega}{2\omega_0} \right], \quad (4.14)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Анализ моделей сейсмической отраженной волны и исследование реальных импульсов показали, что их фазовый спектр имеет стационарный участок в диапазоне частот, на которых сосредоточена основная энергия сигнала. Указанное свойство фазовых спектров импульсов может быть использовано для определения

временного положения отраженной волны на сейсмограмме. Для этого на каждой трассе производится определение текущего фазового спектра и осуществляется его оценка с точки зрения стационарности в выбранном диапазоне частот. Начало участка, фазовый спектр которого имеет стационарный характер, принимается за момент вступления отраженной волны. При этом интервал интегрирования выбирается равным трем видимым периодам волны, что приблизительно соответствует длительности сейми-

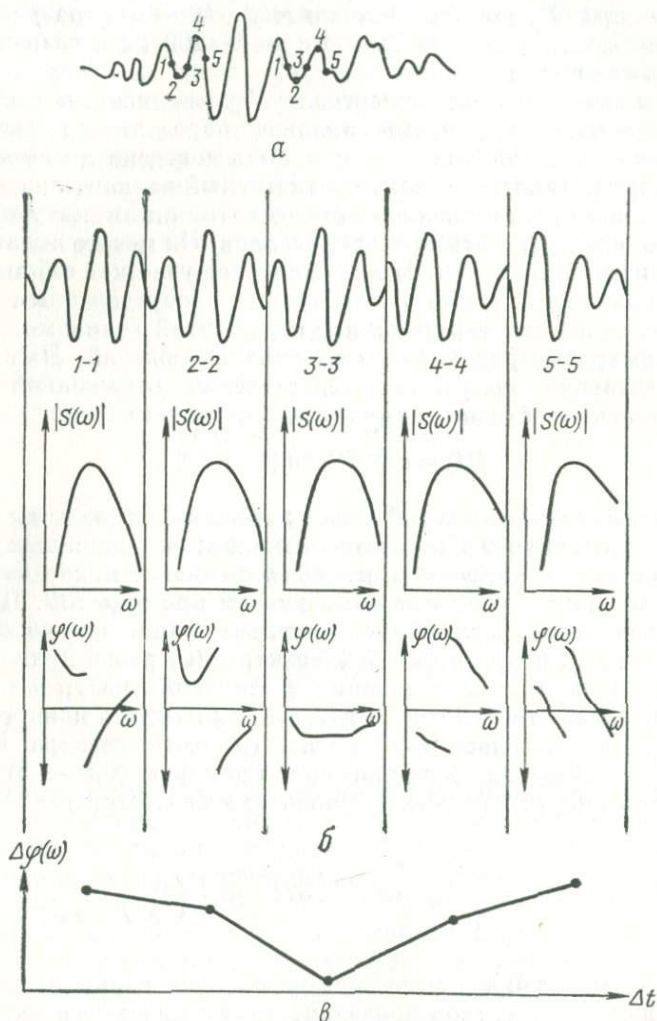


Рис. 75. Отрезок сейсмической трассы (а), амплитудные и фазовые спектры участков трассы (б), график изменения стационарности фазового текущего спектра (в)

ческого импульса. На рис. 75, а, б показаны отрезок сейсмической трассы и спектры его различных участков. Длительность интервала интегрирования в этом случае равна 90 мс, частотный диапазон анализа составлял 10—50 Гц. Анализ текущих фазовых спектров сейсмической трассы показывает, что участок 3—3 содержит большую часть отраженной волны. Оценку стационарности фазовых спектров различных участков сейсмической трассы можно производить с помощью следующего критерия:

$$\Delta\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^M [\varphi(\omega_i) - \varphi(\omega_{i+1})]^2, \quad (4.15)$$

где $\Delta\varphi(\omega)$ — среднеквадратическое приращение фаз спектральных составляющих; $\varphi(\omega_i)$, $\varphi(\omega_{i+1})$ — значения фаз, соответствующие i -й и $i + 1$ гармонике; M — число гармоник.

Изменение $\Delta\varphi(\omega)$ вдоль трассы при анализе отрезка реальной сейсмической трассы показано на рис. 75, в. При этом за местоположение отраженной волны принимается участок, для которого $\Delta\varphi(\omega)$ имеет минимальное значение.

Спектральный анализатор целесообразно использовать в комплексе с малой вычислительной машиной М-6000. Опытная обработка сейсмических материалов [23] показала, что с помощью описанного алгоритма определения текущего фазового спектра возможно определение точного времени положения отраженной волны с погрешностью 1—2 мс.

Есть все основания считать, что комплексирование оптических и электронных систем позволит в дальнейшем разработать и другие алгоритмы, позволяющие оптимально решать многие задачи сейсморазведки и максимально автоматизировать процесс интерпретации сейсмической информации, значительно сократив при этом дорогостоящее время мощных ЭВМ.

Перспективы применения оптических устройств в системах хранения информации

Для значительной части геологической и геофизической информации в настоящее время с помощью ЭВМ нельзя организовать хранение, а следовательно, и оперативный поиск, удовлетворяющие требованиям автоматизированных систем сбора, обработки и хранения информации (АССОХ). Вследствие необходимости выполнения трудоемких промежуточных преобразований образной информации в цифровой массив затрачивается значительный объем времени ЭВМ. При этом неизбежно происходит потеря определенной части информации, которая усугубляется ограниченностью объема оперативной памяти даже лучших моделей ЭВМ по сравнению с информативной емкостью обрабатываемого материала. Поэтому приходится либо значительно упрощать

решаемые задачи, либо идти на большие затраты машинного времени.

С применением цифровых способов обработки сейсмических материалов и их постоянным совершенствованием возникает необходимость периодически возвращаться как к первичным материалам, так и к результатам последующих этапов обработки их на ЭВМ. Это требует хорошо организованных систем хранения сейсмической информации. Отсутствие последних объясняется тем, что до последнего времени не существовало носителей цифровой информации и способов записи, удовлетворяющих требованиям ее высокой плотности и возможности длительного хранения без перезаписи.

Применение в качестве носителей информации перфокарт и перфолент исключается из-за низкой плотности записи и невозможности длительного хранения. Лучшими данными обладает магнитная лента, имеющая более высокую плотность записи. Однако при длительном хранении магнитные ленты с цифровой записью требуют периодической перезаписи. Если учесть, что перезапись ведется через ЭВМ, то окажется, что для длительного хранения магнитных лент потребуются специальные ЭВМ и штат сотрудников, занимающихся перезаписью, что экономически невыгодно.

Успехи последних лет в области голографии дают основание полагать, что применение голограмм позволит организовать системы хранения любой геолого-геофизической информации. Основное достоинство голографических способов записи информации состоит в ее высокой плотности. При использовании фотоэмульсий или термопластиков с высокой разрешающей способностью (2000 линий на 1 мм) получены записи с плотностью до 10^7 бит/мм², а при использовании толстослойных эмульсий или щелочно-галоидных кристаллов — 10^{13} бит/мм². Для сравнения можно сказать, что плотность записи на магнитную ленту регистратором МРЦ станции ССЦ-3 составляет только 11 бит/мм². Методы голографии позволяют максимально использовать возможности фотоматериалов или термопластических носителей. Так, серийно выпускаемая пленка типа «Микрат-300» с разрешающей способностью только 300 линий на 1 мм допускает плотность записи до 9×10^4 бит/мм². В худшем случае при тридцатипроцентном использовании возможности этого носителя на пластинке размерами 6 × 9 см должна уместиться информация примерно с трех лент длиной по 340 м, записанная на сейсмостанции ССЦ-3. Если учесть, что объем пластинки на стеклянной подложке толщиной 2 мм около 11 см³, а трех катушек ССЦ-3 около 2260 см³, то выигрыш в объемной плотности записи, которая наиболее важна при архивном хранении, станет очевидным. Выпускаемые в настоящее время специально для голографии пластинки с более высокой разрешающей способностью позволяют получать записи с более высокой плотностью, что играет большую роль при хранении

двумерной геологической информации. В кадре 50×60 мм можно разместить $15 \cdot 10^7$ характеристических точек, что при динамическом диапазоне фотоносителя в 40 дБ составит массив в $15 \cdot 10^{11}$ бит/мм². В кадре 24×35 мм массив составит соответственно $35 \cdot 10^6$ точек или $35 \cdot 10^{10}$ бит/мм² информации.

При аэрогеофизической съемке один залет по маршруту в 40 км при погрешности в 10 м позволяет получить по профилю для каждого параметра 4000 характеристических точек, следовательно, такой профиль займет в кадре линейку длиной 20 мм. Естественно, что на носителе можно разместить столько подобных линеек, сколько позволит разрешающая способность носителя по его второму измерению, т. е. в кадре 20×20 мм можно разместить 4000 таких линеек. Считая, что динамический диапазон фототранспаранта в общем соответствует динамическому диапазону записи, можно свободно разместить массив из нескольких сотен залетов по одному параметру на площади фототранспаранта 35×24 мм или 9 таких массивов (по 9 параметрам) в кадре 70×70 мм.

Немаловажным фактором для длительного хранения информации является высокая помехоустойчивость голограмм к микродефектам фотоэмульсии, микроцарапинам, пылинкам.

Создание на основе голограмм картотеки полученной и законсервированной на долгие годы информации, систем быстрого поиска и ввода информации в оптико-цифровое устройство, программ обработки и вывода новой информации сыграет важную роль в развитии систем АССОХ.

Список литературы

1. Анализ апертурно-ограниченных оптических систем, применяемых при обработке геофизической информации. — «Прикладная геофизика», вып. 76. М., «Недра», 1975, с. 26—40 с ил. Авт.: М. К. Полшков, О. А. Потапов, И. А. Кузнецов и др.
2. Афанасенков В. И., Беклемишев А. Б., Нефедова Н. Ю. Голография и интерференционная обработка геофизической информации. — «Информационное сообщение», № 33, М., изд. ВИЭМС, 1969, 13 с. с ил.
3. Бегунов Б. Н. Трансформация оптических изображений. М., «Искусство», 1965, 230 с. с ил.
4. Беклемишев А. Б., Кутуков Д. А. Жидкие кристаллы и некоторые проблемы обработки сейсмической информации. — «Обзор». М., изд. ВИЭМС, 1972, 16 с. с ил.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., «Наука», 1970, 855 с. с ил.
6. Бремерман Г. Распределения, комплексные переменные и преобразования Фурье. М., «Мир», 1970, 855 с. с ил.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969, 576 с. с ил.
8. Возенкрафт Д., Джекобс И. Теоретические основы техники связи. М., «Мир», 1969, 658 с. с ил.
9. Вьено Ж., Смигельский П., Руайс А. Оптическая голография. М., «Мир», 1973, 241 с. с ил.
10. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Оптическое моделирование антенн СВЧ с отражателем переменного профиля. — «Радиотехника и электроника». Т. XIII, № 7. М., «Наука», 1968, с. 1176—1189 с ил.
11. Голосов В. П., Потапов О. А., Соинов И. В. Применение лазеров в геофизике. «Обзор». М., изд. ВИЭМС, 1973, 34 с. с ил.
12. Горелик Г. С. Колебания и волны. М., Физматгиз, 1959, 572 с. с ил.
13. Гуцко Ю. П. Фазовая рельефография. М., «Энергия», 1974, 168 с. с ил.
14. Гудмен Д. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970, 364 с. с ил.
15. Дитчберн Р. Физическая оптика. М., «Наука», 1965, 631 с. с ил.
16. Джеймс Т., Хиггинс Дж. Основы теории фотографического процесса. М., изд-во иностр. лит-ры, 1954, 280 с. с ил.
17. Де Велис Дж., Рейнольдс Дж. Голография. М., Воениздат, 1970, 245 с. с ил.
18. Джакоция В. Е. Запись телевизионных изображений. Л., «Энергия», 1972, 141 с. с ил.
19. Завьялов В. Д. О применении принципов голографии в сейсмо-разведке. «Обзор», М., изд. ВИЭМС, 1969, 37 с. с ил.
20. Зверев В. А., Орлов Е. Ф. Оптические анализаторы. М., «Советское радио», 1971, 239 с. с ил.
21. Зоммерфельд А. Оптика. М., изд-во иностр. лит-ры, 1953, 487 с. с ил.
22. Иванченков В. П., Потапов О. А., Кувшинов А. М. Оптические и оптико-электронные устройства для анализа сейсмических материалов. — «Разведочная геофизика», вып. 73. М., «Недра», 1975, с. 24—29 с ил.
23. Иванченков В. П., Потапов О. А., Шлотгауэр В. А. Частотный анализ сейсмограмм МОГТ оптическими способами.

- В кн.: Повышение геологической и экономической эффективности сейсморазведки на основе внедрения метода ОГТ и машинных способов обработки полевых материалов. М., изд. ВНИГеофизика, 1975, с. 110—121 с ил.
24. Использование автокоррелограмм для определения кинематических характеристик кратких волн. — «Разведочная геофизика», вып. 54. М., «Недра», 1972, с. 42—47 с ил. Авт.: О. А. Потапов, Е. А. Кошелевич, Б. В. Шальнов и др.
25. Использование оптического фильтра при выполнении маршрутных гравиметрических съемок на море. — «ДАН СССР», т. 196, № 3, 1971, с. 573—574 с ил. Авт.: В. А. Кузванов, И. А. Маслов, И. И. Науменко-Бондаренко и др.
26. Кок У. Лазеры и голография. М., «Мир», 1971, 136 с. с ил.
27. Кондратенков Г. С. Обработка информации когерентными оптическими системами. М., «Советское радио», 1972, 205 с. с ил.
28. Кошелевич Е. А., Шальнов Б. В., Потапов О. А. Методика сейсморазведочных работ МОВ в Московской синеклизе. — «Обзор». М., изд. ВИЭМС, 1973, 32 с. с ил.
29. Кофсман С. М., Потапов О. А., Шальнов Б. В. Методика получения функций взаимной корреляции на оптическом фильтре и некоторые возможности их использования при обработке сейсморазведочных данных. — «Экспресс-информация», № 90. М., изд. ВИЭМС, 1971, с. 1—13, с ил.
30. Кофсман С. М., Потапов О. А. Способ количественных измерений при обработке информации оптическими системами. — «Разведочная геофизика», вып. 66. М., «Недра», 1975, с. 18—22 с ил.
31. Кноринг Л. Д., Деч В. Н. Изучение колебательных движений методов выявления скрытых периодичностей. — «Советская геология», 1972, № 5, с. 81—103 с ил.
32. Кравцов В. И., Мягков С. М. Особенности гляциологического дешифрования аэроснимков. — В кн.: Теория и практика дешифрования аэроснимков. М.—Л., «Наука», 1966, с. 192—197, с ил.
33. Кудрицкий Д. М. Изучение поверхностных вод. — В кн.: Аэрометоды и изучение природных ресурсов. М., Географиздат, 1962, с. 158—166 с ил.
34. Куниский А. С. О двумерной фильтрации микроскопических изображений. — В кн.: Современные проблемы машинного анализа биологических структур. М., «Наука», 1970, 190 с. с ил.
35. Курочкин Л. П. Оптическое моделирование антен СВЧ. — «Радиотехника и электроника». Т. 13, № 7. М., «Наука», 1968, с. 1169—1175 с ил.
36. Лебедев Д. С. Линейные двумерные преобразования изображений увеличивающие помехоустойчивость передачи. — В кн.: Иконика. М., «Наука», 1968, 135 с. с ил.
37. Лихтерман В. А., Потапов О. А. Некоторые возможности оптического фильтра при дешифровании аэрофотоснимков. — «Труды ЛГИ», вып. 3, 1971, с. 57—64 с ил.
38. Лихтерман В. А., Потапов О. А. Фото пленки и их обработка при оптической фильтрации аэрофотоснимков и геолого-геофизических данных. — «Труды ЛГИ», вып. 4, 1971, с. 6—9 с ил.
39. Майкляр П. В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. М., «Наука», 1972, 399 с. с ил.
40. Методы обработки и интерпретации геофизических наблюдений на ЭВМ. — «Обзор». М., изд. ВИЭМС, 1971, 98 с. с ил. Авт.: В. А. Болдырева, Н. П. Жигалина, Б. Д. Поletaев и др.
41. Методика и некоторые результаты изучения волновой картины в Центральных районах Русской платформы. — «Разведочная геофизика», вып. 52. М., «Недра», 1972, с. 27—33 с ил. Авт.: Б. В. Шальнов, И. Я. Троянская, Е. А. Кошелевич и др.
42. Миклулин В. П. Фоторецентурный справочник. М., «Искусство», 1960, 223 с.

43. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М., «Мир», 1964, 295 с. с ил.
44. Михель К. Основы теории микроскопа. М., Гостехиздат, 1955, 276 с. с ил.
45. Мерц А. Интегральные преобразования в оптике. М., «Мир», 1969, 179 с. с ил.
46. Меламуд М. Е., Потапов О. А. Опыт применения оптического фильтра для анализа материалов рудной сейсморазведки в Печенгском районе. — «Разведочная геофизика», вып. 58. М., «Недра», 1973, с. 3—9 с ил.
47. Некоторые приемы суммирования и анализа получаемых результатов в методе ОГТ на базе применения аналоговой техники. — В кн. — «Современное состояние сейсморазведки методом ОГТ». М., изд. ВИЭМС, 1974, с. 129—136 с ил. Авт.: Е. А. Кошлевич, С. М. Кофман, О. А. Потапов и др.
48. Никаноров С. И., Парыгин В. Н. Электронно-оптическое устройство для создания двумерного изображения. — «Автоматрия», вып. 6. Новосибирск, «Наука», 1972, с. 41—45 с ил.
49. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. М., «Мир», 1966, 254 с. с ил.
50. Оптический способ определения пластовых сейсмических скоростей. — «Экспресс-информация», № 16. М., изд. ВИЭМС, 1973, стр. 8—19 с ил. Авт.: Г. А. Шехтман, О. А. Потапов, Б. В. Шальнов и др.
51. Опыт применения метода ОГТ в Московской синеклизе. — «Разведочная геофизика», вып. 52. М., «Недра», 1972, с. 19—26 с ил. Авт.: Е. А. Кошлевич, В. Я. Локшин, Б. В. Шальнов и др.
52. Орлов Л. А., Попов Ю. М. Оптоэлектронное быстродействующее арифметическое устройство на управляемых транспарантах. — «Автоматрия», вып. 6. Новосибирск, «Наука», 1972, с. 8—12 с ил.
53. Островский Ю. И. Голография и ее применение. Л. «Наука», 1973, 177 с. с ил.
54. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М., «Мир», 1971, 495 с. с ил.
55. Полшков М. К., Потапов О. А., Кофман С. М. Способ оптической обработки сейсмической информации. Авт. свид. № 335641. — «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 13.
56. Потапов О. А. Оптическая фильтрация записей при интерпретации сейсморазведочных данных МОВ. — «Разведочная геофизика», вып. 46. М., «Недра», 1971, с. 27—38 с ил.
57. Потапов О. А. Краевой эффект и его влияние на результаты оптической фильтрации. — «Разведочная геофизика», вып. 48. М., «Недра», 1971, с. 81—87 с ил.
58. Потапов О. А. Особенности двумерных спектров и палетки для интерпретации результатов оптической фильтрации сейсмических записей. — «Разведочная геофизика», вып. 48. М., «Недра», 1971, с. 87—99 с ил.
59. Потапов О. А. Анализ данных ВСП способом оптической фильтрации. — «Реферативный журнал», вып. 26. М., изд. ВИЭМС, 1971, с. 26—31 с ил.
60. Потапов О. А. Возможности оптической фильтрации при обработке данных МОВ, осложненных кратными волнами. — «Разведочная геофизика», вып. 50. М., «Недра», 1972, с. 16—22 с ил.
61. Потапов О. А. О фотометрических измерениях при обработке сейсморазведочных данных на оптическом фильтре. — «Разведочная геофизика», вып. 62. М., «Недра», 1972, с. 12—19 с ил.
62. Потапов О. А. Изучение закономерностей изменения частотного состава сейсмических волн при помощи оптического фильтра. — «Разведочная геофизика», вып. 54. М., «Недра», 1972, с. 24—29 с ил.
63. Потапов О. А. Разрешающая способность оптического фильтра. — «Разведочная геофизика», вып. 56. М., «Недра», 1973, с. 3—10 с ил.

64. Потапов О. А. Применение оптических систем при обработке данных МОГТ. — В кн.: Современное состояние сейсморазведки методом ОГТ», серия 9. М., изд. ВИЭМС, 1974, с. 119—129 с ил.
65. Потапов О. А. Состояние и перспективы развития оптической обработки геолого-геофизической информации. — В кн.: Современные проблемы прикладной голографии. М., «Знание», 1974, с. 51—56.
66. Потапов О. А. Основы оптической обработки геофизической и геологической информации. — «Обзор» М., изд. ВИЭМС, 1975, с. 1—72 с ил.
67. Потапов О. А., Шальнов Б. В. Оптические способы получения одномерных спектров и коррелограмм сейсмических трасс. — «Обзор» М., изд. ВИЭМС, 1971, 35 с с ил.
68. Потапов О. А., Шальнов Б. В., Копилевич Е. А. Количественная оценка эффективности способа ОГТ с помощью оптического фильтра. — «Экспресс-информация», № 85. М., изд. ВИЭМС, 1971, 4 с с ил.
69. Потапов О. А., Шальнов Б. В., Кофсман С. М. Методы оптической обработки геофизических данных. — «Обзор» М., изд. ВИЭМС, 1972, 41 с с ил.
70. Потапов О. А., Шальнов Б. В., Кофсман С. М. Технология получения коррелограмм оптическим способом. — «Разведочная геофизика», вып. 56. М., «Недра», 1973, с. 29—35 с ил.
71. Потапов О. А., Шальнов Б. В., Копилевич Е. А. Выделение тектонических нарушений по одномерным спектрам и коррелограммам сейсмотрасс. — «Разведочная геофизика», вып. 58. М., «Недра», 1973, с. 30—35 с ил.
72. Потапов О. А., Шальнов Б. В., Шехтман Г. А. Определение динамических характеристик сейсмических волн оптическим способом. — «Разведочная геофизика», вып. 60. М., «Недра», 1974 с. 8—12 с ил.
73. Потапов О. А., Кофсман С. М., Шальнов Б. В. Способы и методика спектрального анализа сейсмических записей на лазерных установках. — «Разведочная геофизика», вып. 62. М., «Недра», 1974, с. 3—10 с ил.
74. Потапов О. А., Тараянц К. Г. Лазерная установка для обработки геофизической информации. — «Разведочная геофизика», вып. 62. М., «Недра», 1974, с. 28—34 с ил.
75. Потапов О. А., Хазанова Р. А. Расчет параметров оптических систем, предназначенных для обработки геофизической информации. — «Прикладная геофизика», вып. 77. М., «Недра», 1975, с. 14—25 с ил.
76. Потапов О. А., Матвеев Е. Ф., Потапова К. Ф. Применение лазерной установки для обработки данных аэромагнитной съемки. — «Изв. вузов. Геология и геофизика», вып. 7. М., 1975, с. 111—116 с ил.
77. Потапов О. А., Лихтерман В. А. Система для оптической обработки геологической и геофизической информации. — «Советская геология», 1975, № 1, с. 116—124 с ил.
78. Потапов О. А., Лихтерман В. А., Черкасов И. А. Исследование закономерностей формирования изображений Фурье — преобразования неперiodических сигналов при их обработке на лазерных установках. — «Экспресс-информация», вып. 10. М., изд. ВИЭМС, 1974, с. 1—28 с ил.
79. Потапов О. А., Лихтерман В. А., Черкасов И. А. Оценка точности фотоэлектрической регистрации данных оптической обработки геолого-геофизической информации. — «Экспресс-информация», вып. 10. М., изд. ВИЭМС, 1974, с. 29—53 с ил.
80. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. М., «Мир», 1974, 399 с с ил.
81. Применение лазеров. М., «Мир», 1974, 445 с с ил.
82. Районирование Московской синеклизы на основе данных машинной обработки и анализа сейсмических записей. — «Обзор» М., изд. ВИЭМС,

1973, стр. 28 с. с ил. Авт.: Б. В. Шальнов, О. А. Потапов, Е. А. Копилович и др.

83. Рейхель Т., Иедличка М. Фотоэлектронные катоды. М., «Энергия», 1968, 159 с. с ил.

84. Русинов М. М. Техническая оптика. М. — Л. «Машгиз», 1964, 327 с. с ил.

85. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. Л., «Энергия», 1967, 261 с. с ил.

86. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971, 616 с. с ил.

87. Способ обработки сейсмической информации. Авт. свид. № 329492. — «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 7. Авт.: М. К. Полшков, И. А. Мушин, Г. А. Шехтман и др.

88. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. М., «Мир», 1968, 374 с. с ил.

89. Теория и практика сейсмического метода РНП. Под ред. Л. А. Рябинкина. М., Гостоптехиздат, 1962, 290 с. с ил.

90. Тимошин Ю. В. Основы дифракционного преобразования сейсмических записей. М., «Недра», 1972, 264 с. с ил.

91. Технология машинной обработки материалов ОГТ. — В кн.: Современное состояние сейсморазведки методом ОГТ. М., изд. ВИЭМС, 1974, с. 63—79 с ил. Авт.: В. А. Иванов, С. К. Гуревич, С. М. Кофман и др.

92. Тимошин Ю. В., Мегель Г. В., Шварцман Ю. П. Оптическое устройство для пространственной фильтрации временных и сейсмических разрезов. — В кн.: Вопросы методики и техники геофизических исследований, вып. 2. М., изд. ВИЭМС, 1970, с. 29—32 с ил.

93. Увеличение глубины сейсмических исследований на основе применения машинной обработки и усовершенствованной методики полевых работ. — «Экспресс-информация», № 3. М., изд. ВИЭМС, 1972, с. 12—24 с ил. Авт.: Е. А. Копилович, О. А. Потапов, Б. В. Шальнов и др.

94. Устройство для определения динамических характеристик сейсмических волн. Авт. свид. № 373676, — «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1973, № 14. Авт.: М. К. Полшков, О. А. Потапов, Б. В. Шальнов и др.

95. Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскоп. М., Физматгиз, 1960, 180 с. с ил.

96. Франсон М. Голография. М., «Мир», 1972, 246 с. с ил.

97. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., Физматгиз, 1962, 234 с. с ил.

98. Хазен А. М. Интерференция, лазеры и сверхбыстродействующие ЭВМ. М., «Знание», 1972, 48 с. с ил.

99. Шальнов Б. В., Потапов О. А. Зависимость свойств корреляционных функций сейсмических записей от сейсмогеологических условий. — «Обзор». М., изд. ВИЭМС, 1974, 30 с. с ил.

100. Шальнов Б. В., Потапов О. А. Определение эффективных скоростей при помощи лазерной установки. — «Разведочная геофизика», вып. 66. М., «Недра», 1975, 12—18 с ил.

101. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., «Советское радио», 1967. 344 с. с ил.

102. Яштолд-Говорко В. А. Фотосъемка и обработка. М., «Искусство», 1967. 443 с. с ил.

103. Anderson W. L., Beisser R. E. Counting and Classifying Small Objects by Far-Field Light Scattering. — «Applied Optics», vol. 10, No. 7, 1971, p. 1503—1508.

104. Anderson W. L., Berger L. S. Realization of a Wiener optical Spatial filter. — «Phys. Letters», vol. 29A, 1969, p. 619—620.

105. Bayer A., Fontanel A., Grau G. The application of optical filtering in coherent light to the study of aerial photographs of Greenland glaciers. — «J. of Glaciology», vol. 6, No. 48, 1967, p. 782—793.

106. Chevallier R. Application du filtrage optique a l'etude des pho-

- tographies aeriennes, — «Bull. Sos. franc. photogramm.», No. 32, 1968, p. 1—16.
107. Correlateur optique d'analyse sismique CTS-1. — «Institut Francais du Petrole.», 1965, p. 3—27.
108. Cutrona L. I., Leith E. N., Palermo C. J. Optical data processing and filtering systems. — «IRE Transactions on Information Theory.», No. 6, 1960, p. 386—400.
109. Cheatham T. P., Kohlenberg A. Optical filterstheir egivalence to and differences from electrical networks. — «IRE Conv. Record», part. 4, 1954, p. 6—12.
110. Dobrin M. B., Ingalls A. L., Long I. A. Velocity and friquency filtering of seismic data using laser light. — «Geophysics, vol. 30, No. 5, 1965, p. 1144—1178.
111. Filter optique FO-100. — «Institut Francais Du Petrole», 1966, p. 3—44.
112. Fontanel A. Le filtrage optique en lumiere coherente. — «Kodak-Pathe Photogr. aeriennne.», No. 23, 1969, p. 34—35.
113. Fontanel A., Grau G. Correlation optique en lumiere coherente. — «Geophysical prospecting», No. 1, 1971, p. 98—117.
114. Gabor D. A new microscopic principle. — «Nature», 1948, No. 161, No. 4098, p. 777—778.
115. Gabor D. Les transformations de l'information en optique. — «Optica Acta», 1966, vol. 13, No. 4, p. 299—310.
116. Gibson R. New tools for Geophysicist. — «World Petroleum», No. 23, 1967, p.
117. Hilderbrand B. P. Hologram bandwidth reduction by space-time multiplexing. — «J. Opt. Sos. Amer.», vol. 60, Feb., 1970, p. 259—264.
118. Huntington I. F. Fracture trace analysis. — «Geol. MAG», vol. 106, No. 5, 1969, p. 430—451.
119. Hons W. On basic analoges and principal differences between optical and electronic information. — «Progress Optics», vol. 1, Amsterdam, 1961, p. 155—210.
120. Ingalls A. L. The effect of film thickness variations on coherent light. — «Proc. SCI. Eng.», vol. 4, 1960, p. 135.
121. Jackson P. Analysis of variable-density seismogram by means of optical diffraction. — «Geophysics», vol. 30, No. 1, 1965, p. 5—23.
122. Jackson P. Correlation function spatial filtering with incoherent light. — «Appl. Opt.», vol. 6, No. 7, 1967, p. 1272—1273.
123. Jones M. P., Kitchener O. A., Prosser A. P. Mineral Technology. — «Chemistry in Britain», vol. 5, No. 5, 1969, p. 193—198.
124. Jones M. P., Gavricovic I. Automatic Quantitative Mineralogy in Mineral Technology. — «Rudy», vol. 18, No. 5, 1970, p. 168—187.
125. Marechal A., Croce P. Un filtre de frequences spatiales pour famelioration du contraste des images optiques. — «Compt. Rendues», vol. 237, 1953, p. 607—609.
126. Pincus H., Dobrin M. Geological application of optical data processing. — «J. of Geophysical Research», vol. 70, No. 20, 1966, p. 4851—4869.
127. Vienot I. C. Differentiation spatiale et filtrage par hologramme de signaux optiques faiblement decorreles. — «Optica Acta», vol. 14, No. 1, 1967, p. 57—70.
128. Tichonov D. A., Gvodman I. W. Coherent transfer function. — «JOSA», Febr., 1972, p. 293—295.
129. Wyatt P. J. Differentian light scattering: a physical method for identifying living bacterial cells. — «Appl. Opt.», vol. 7, 1968, p. 1879.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Оптические преобразования — новый вид обработки геофизической и геологической информации	5
Преобразования Фурье, выполняемые линзой	6
Формирование дифракционного и восстановленного изображений исходной геолого-геофизической информации	10
Аппаратура для оптической обработки геолого-геофизических данных	14
Глава 2. Способы и методика оптической обработки исходной информации	20
Методика двумерной оптической фильтрации сейсморазведочных данных и интерпретации получаемых результатов	20
Методика одномерной оптической фильтрации и выбор оптимальных параметров оптической системы	32
Спектральный анализ сейсмических записей	34
Корреляционный анализ сейсморазведочных данных	43
Помехоустойчивость автокоррелограмм, получаемых оптическим способом	53
Соотношение амплитуд максимумов функции автокорреляции	61
Методика получения суммоэлектронных РНП	66
Количественный анализ сейсмических данных	68
Помехоустойчивость способа фотоэлектрической регистрации данных оптической обработки сейсмических материалов	80
Возможные пути реализации оптической согласованной фильтрации	82
Обработка данных аэромагнитной и гравиметрической съемок	84
Методика оптической обработки геологических материалов	90
Глава 3. Применение оптических систем при обработке геофизических и геологических материалов	94
Анализ волнового поля	95
Обработка и анализ данных ВСП	99
Разделение волн в условиях их интерференции при наземных наблюдениях МОВ	104
Применение оптических систем при обработке данных метода ОГТ	111
Определение кинематических характеристик кратных волн	124
Расчет эффективных, пластовых скоростей и статических поправок	127
Обработка материалов рудной и нефтегазовой сейсморазведки	137
Районирование территорий с целью выделения участков, благоприятных для проведения работ методом ОГТ	142
Обработка аэромагнитных, гравиметрических и других маршрутных съемок	147
Обработка и анализ геологических материалов	150
Глава 4. Основные направления развития оптической обработки геологической и геофизической информации	157
Пути совершенствования оптических способов и систем обработки материалов	157
Некоторые возможные схемы оптико-электронных систем обработки материалов	165
Перспективы применения оптических устройств в системах хранения информации	175
Список литературы	178

2064

1 р. 84 к.

НЕДРА