

ВАСИЛЕВСКИЙ М. М., НЕКРАСОВА Ж. А., БЕККЕР А. М.,
БУХТОЯРОВА Н. И., ТУРУХАНО Б. Г.

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ ЭНДОГЕННОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Напряжения, возникающие в земной коре под воздействием сил эндогенных процессов, как правило, вызывают разрушение земной коры. Простейшими и тривиальными фигурами являются конусы разрушения, встречные относительно вектора напряжений, и различного рода плоскости разрыва сплошности горных пород. Проекция фигур разрушения на дневную поверхность, названные нами фактурами (от английского fracture — разрушение), представляют собой в общем случае либо линейные следы разрывов, так называемые линеаменты, либо кольцевые зоны. Подобные фигуры разрушения широко известны в теории разрушения (Си, Либовиц, 1975; Оберт, 1976) и практике горных работ (Ханукаев, 1962). Они наблюдались и нами в местах проявления различной по своей природе эндогенной активности: в рудных районах, узлах и полях, на отдельных месторождениях и даже в участках бонанцевых руд, на месторождениях термальных вод, в областях интенсивного проявления магматического и газового давления, таких, как зоны ареального вулканизма (Василевский, 1977, 1978; Василевский и др., 1979). Структурообразование, приводящее к разрушению кровли, наблюдается и на нефтегазовых месторождениях и диапировых соляных куполах.

Естественно, что свидетельства эндогенной активности недр Земли: в виде фигур разрушения коры накапливаются с начала формирования самой коры, т. е. около 4 млрд. лет. В случае возможности датировок фактур (например, по веществу, которое их выполняет) можно судить об эндогенной активности того или иного отрезка геологической истории изучаемого района.

В связи с длительностью периодов эндогенной активности, а также множественностью разных факторов, вызывающих разрушение коры, количество фактур даже кольцевого типа (срез конуса разрушения) на земной поверхности огромно. Например, в пределах одного изученного рудного узла их количество составило 47 000. Широко известные так называемые «кольцевые структуры», такие, как кольцевые интрузивные комплексы, кальдеры и просто «морфоструктуры», являющиеся лишь частными случаями отображения фигур разрушения определенного размерного класса.

Мы не рассматриваем в настоящей работе взаимоотношений линейных и кольцевых или дуговых фактур. Нередко противопоставление их друг другу условно. Многие линеаменты являются дугами больших радиусов и воспринимаются как линейные фактуры лишь при крупномасштабных исследованиях. С другой стороны, совокупности линейных

структурных элементов, например трещин; часто составляют окружности, как это видно на рис. 1 и 2, что, как правило, упускается исследователями.

Значительная информация об эндогенной активности, приводящей к разрушению земной коры, имеется на фотоизображениях поверхности Земли различных масштабов. Наибольшую информативность при этом имеют кольцевые фактуры, так как их диаметры позволяют судить о

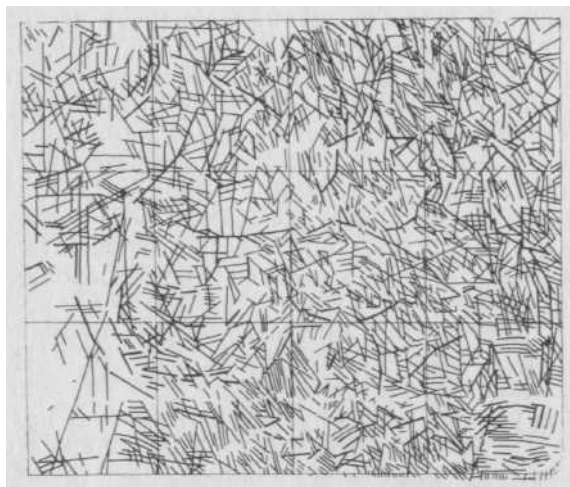


Рис. 1. Карта трещиноватости, полученная при когерентно-оптической обработке снимка земной поверхности (по Д. А. Янутш и др., 1979)

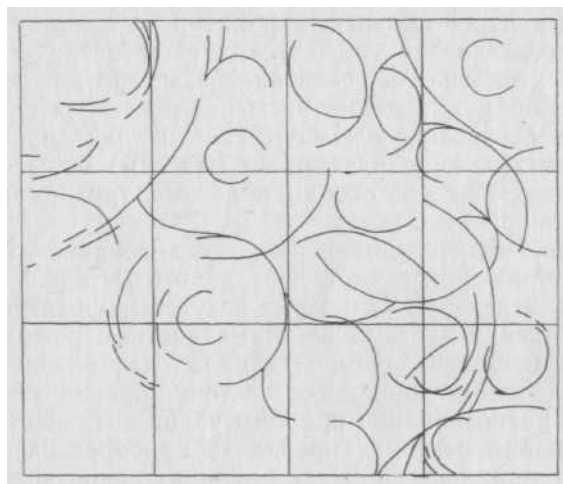


Рис. 2. Схема кольцевых и дуговых фактур, построенная визуальнo на основании карты трещиноватости рис. 1

глубинах генерации напряжений в вершинах конусов разрушения (гипоцентрах) и энергии процесса, а плотность центров фактур — о распределении узлов эндогенной активности. Более того, анализ распределения кольцевых фактур различных размерных и энергетических классов в пределах их совокупности (множества), характеризующей какой-либо узел активности, позволяет проводить не только районирование по активности, но и выявлять динамику структурообразования, а в дальнейшем — даже его природу, т. е. идентифицировать эндогенный процесс.

Снятие и обработка информации об эндогенных процессах, которую несут фотоизображения земной поверхности, проводится обычно «вручную». Это в высшей степени трудоемкая работа, качество которой часто зависит от индивидуальных способностей и навыков исполнителей. Сказывается возникающая при ручной обработке изображений «специализация» исполнителей на выявление разных размерных классов. Одни видят по преимуществу средние по размерам (в масштабе изображения) кольцевые фактуры, другие — крупные и т. д. В связи с этим одно и то же изображение приходится анализировать нескольким исполнителям и осуществлять затем согласование результатов.

Кроме того, приобретаемые навыки настолько индивидуальны, что вспоминаются слова Ф. Уиппла, относящиеся к наблюдателям астрономам: «...при постоянных наблюдениях... глаз наблюдателя приобретает все больший и больший навык, пока он не окажется в состоянии наблюдать такие детали поверхности, которые вначале казались совершенно невидимыми. Это замечательное повышение остроты зрения с опытом иногда недооценивалось даже опытными наблюдателями» (Уиппл, 1967). Таким образом, есть еще один фактор, необходимый для ручной обработки фотоизображений поверхности Земли, — постоянство этих занятий. Человек может и отвыкнуть видеть полную картину фактур, что не позволяет правильно оценить интенсивность и тем более идентифицировать эндогенные процессы.

Коллективные усилия могут привести к снятию полной или почти полной информации, которую несет фотоизображение земной поверхности. Однако в зависимости от задач анализа, масштабов изображений и анализируемой площади количество одних только кольцевых и дуговых элементов может составлять несколько десятков, а то и сотни тысяч. Ручная статистическая обработка таких схем фактур состоит в их сканировании методом «скользящего среднего» и построении цифрограмм плотности центров кольцевых фактур на единицу площади. Затем проводится составление графических схем активности в выбранной градации этих плотностей, составление гистограмм частоты встречаемости диаметров и выделение размерных классов фактур. После этого проводится построение схем активности для процессов разной глубины генерации (т. е. по размерным классам) и выявление любых других параметров. Все эти операции весьма трудоемки и страдают избыточностью измерений.

Первоочередной задачей дальнейших исследований является введение в анализ изображений земной поверхности методов, исключаящих субъективность в выделении кольцевых и дуговых фактур. Кроме того, нужны методы ведения анализа в автоматическом режиме, а в пределе — в реальном масштабе времени. Анализ изображений земной поверхности (телевизионных, например) с точки зрения закономерностей распределения и распознавания природы узлов активности эндогенного структурообразования позволит проводить наиболее оперативное прогнозирование потенциальных рудных районов, узлов, полей и даже отдельных месторождений полезных ископаемых. Народнохозяйственное значение этих методов трудно переоценить.

Такие возможности открывает для решения поставленных задач применение когерентно-оптических методов анализа изображений земной поверхности. Опыт анализа схем так называемых линеаментов, выделенных «вручную», но с применением когерентно-оптической обработки снимков, уже имеется (Ефимова, 1976; Янутш и др., 1979). Линеаменты при этом считаются основными информативными признаками геологического строения.

На рис. 1 (карта трещиноватости) приведен результат такой обработки по Д. А. Янутшу и др. (1979). Предварительная обработка снимков для выделения линеаментов состоит в усилении выразительности

линеаментов, т. е. в повышении их контрастности и частичного или полного подавления полутонного фона изображения и разного рода помех. Для этих целей применялись: частотная фильтрация круговыми масками; угловая фильтрация секторными масками; двойная фильтрация по частоте и направлению, подавление периодических помех. С помощью подобной обработки анализировали структуру изображения, в результате чего были получены пространственные спектры отдельных участков карты трещиноватости (розы-диаграммы).

Естественно, что и такая обработка может быть использована, например, для получения схемы изорек, т. е. районирования исследуемого района по концентрациям разрывов определенных направлений на единицу площади (Василевский, 1977). Однако при этом решается лишь плоская задача для конечной статической ситуации.

Приведенный когерентно-оптический метод обработки изображения может дать представление о наличии в исследуемом районе куда более информативных кольцевых фразтур (см. рис. 2). Они выявляются при «наблюдении» схемы трещиноватости, приведенной на рис. 1, и могут быть проверены накладкой одного рисунка на другой. И хотя в настоящее время прямое распознавание окружностей и дуговых элементов требует дополнительных разработок метода, некоторые возможности автоматической обработки схем кольцевых фразтур методами оптоэлектроники и голографии (оптической пространственной фильтрации) уже определились при совместных работах ИВ ДВНЦ АН СССР и ЛИЯФ им. Б. Н. Константинова АН СССР. Ниже приводятся результаты совместно проведенных экспериментов.

Впервые метод оптической пространственной фильтрации, использующий голографические фильтры, был предложен в 1964 г. А. В. Лугтом (Lugt, 1964). Он являлся удачным объединением методов голографии и оптической фильтрации. Идея синтеза масок в частотной плоскости, которые позволяют регулировать амплитуду и фазу передаточной функции оптической системы, подробно описана Лугтом, а также в монографии Дж. Гудмена (1970). Частотная маска для фильтра А. В. Лугта синтезируется с помощью интерферометрической системы типа показанной на рис. 3 и 4. Плоский когерентный пучок освещает транспарант, функция пропускания которого соответствует требуемому импульсному отклику фильтра $h(r)$, а линза L_1 производит преобразование Фурье. Таким образом, в плоскости (ξ, η) распределение комплексной амплитуды поля описывается функцией $H(\rho)$, связанной с $h(r)$ преобразованием Фурье. Кроме того, на плоскость (ξ, η) падает плоская волна под углом θ . В плоскости (ξ, η) помещается фоточувствительный материал, регистрирующий распределение экспозиций. Если предположить, что величина амплитудного пропускания материала пропорциональна экспозиции, то можно записать, что $t_A(\rho)$ — функция амплитудного пропускания полученного фильтра — определяется выражением

$$t_A(\rho) \propto R_0^2 + |H|^2 + H_0 H e^{-i\alpha\xi} + R_0 H^* e^{i\alpha\xi},$$

R_0 — амплитуда опорной волны.

При такой записи видно, что амплитудная и фазовая составляющие комплексной функции пропускания фильтра записываются на фотоматериале как амплитудная и фазовая модуляции высокочастотной несущей, для создания которой служит опорная волна.

После того как частотная маска синтезирована, ее устанавливают в систему обработки информации, показанную на рис. 4. Если теперь на вход системы поступает предназначенная для фильтрации функция $g(r)$, то в частотной плоскости распределение амплитуды волны пропорционально:

где F - оператор преобразования Фурье.

$$G(\rho) = F[g(r)],$$

Для комплексной амплитуды поля, прошедшего через фильтр, имеем следующее соотношение:

$$H_2 \propto R_0^2 G + |H|^2 G + R_0 H G e^{-i\alpha z} + R_0 H^* G e^{i\alpha z}.$$

Линза L_2 осуществляет обратное преобразование Фурье, и в результате в плоскости x_3, y_3 комплексная амплитуда поля описывается выражением

$$U_3(r_3) \propto R_0^2 g(x_3, y_3) + h(x_3, y_3) * h^*(-x_3, y_3) + R_0 h(x_3, y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 + \alpha) + R_0 h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 - \alpha)$$

(мы воспользовались теоремой свертки). Отметим, что третий член в полученном выражении определяет свертку h и g , смещенную на величину α в плоскости x_3, y_3 , а четвертый член — корреляцию этих двух функций. Многие алгоритмы распознавания сводятся к вычислению этих математических преобразований, поэтому система В. Лугта широко применяется для решения таких задач.

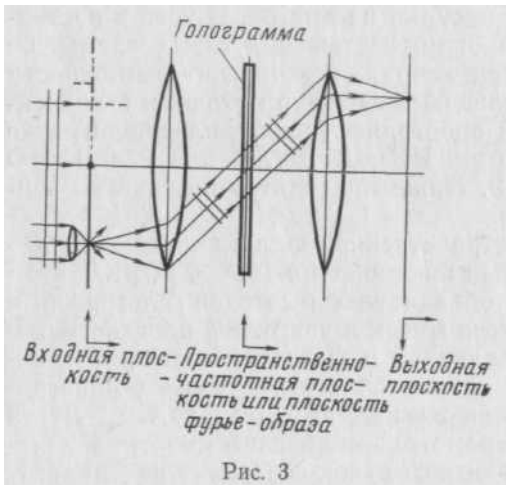


Рис. 3. Схема когерентно-оптической установки для автоматической корреляции кольцевых структур по размерам

Рис. 4. Оптическая схема (коррелятор), использовавшаяся при проведении модельных экспериментов. Пояснение в тексте

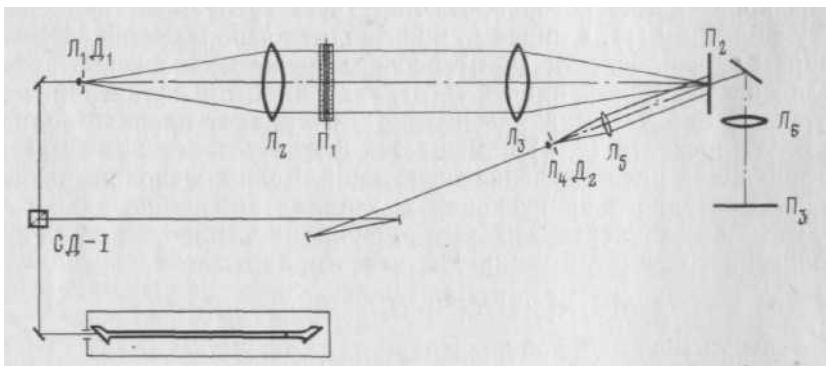


Рис. 4

В рассматриваемой задаче анализа распределения окружностей и дуг по их размерам на вход системы проявляются объекты, представляющие собой прозрачные дуги на непрозрачном фоне. При этом следует считать, что к выделяемому размерному классу Ar, r_2 принадлежат объекты, для которых существует такое положение кольца с внутренним радиусом r_1 и наружным r_2 , при котором длина дуги, содержащейся в этом кольце, превышает величину M . Такое определение класса Ar, r_2 представляется разумным, так как объекты не всегда являются окружностями

ми. Найдем импульсный отклик такого фильтра, при установке которого в систему оптической обработки, на ее выходе, интенсивность сигнала (в точках, соответствующих объектам, принадлежащим классу Ar, r_2) будет превышать интенсивность корреляционного сигнала в других точках выходной плоскости. Таким является фильтр с импульсным откликом $h_0(r)$, определяемым выражением

$$h_0(r) = \begin{cases} 1, & r \in (r_1, r_2) \\ 0, & r \notin (r_1, r_2). \end{cases}$$

$$I(x_3, y_3) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_1 - x_3, y_1 - y_3) h(\sqrt{x_1^2 + y_1^2}) dx_1 dy_1 \right]^2,$$

т. е. величина выходного сигнала пропорциональна квадрату длины дуги, содержащейся внутри кольца. Из определения класса Ar, r_2 следует, что для объектов, принадлежащих Ar, r_2 , эта величина превышает M^2 в некоторой точке x_3, y_3 , а для всех других объектов — меньше M^2 . Если объекты представляют собой окружности, то описанный фильтр является оптимальным, т. е. на объектах, не принадлежащих классу Ar, r_2 , значение выходного сигнала равно нулю. Действительно, функция пропускания окружности может быть записана так:

$$g(x_1, y_1) = \delta(\sqrt{x_1^2 + y_1^2} - R),$$

где R — радиус окружности. Отсюда значение функционала для описанного фильтра в точке, соответствующей центру окружности, легко находится:

$$I(R) = \left[2\pi \int_0^{\infty} \delta(r - R) h(r) r dr \right]^2 = \begin{cases} 4\pi^2 r^2, & r \in (r_1, r_2) \\ 0, & r \notin (r_1, r_2) \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, величина выходного сигнала отлична от нуля только для окружностей, принадлежащих классу Ar, r_2 . Из данных рассуждений следует, что для получения требуемого фильтра следует записать голограмму фурье-объекта, представляющего собой прозрачное кольцо, так, чтобы нелинейность записи не вносила искажений в восстанавливаемый волновой фронт.

Выше предполагалось, что амплитудное пропускание фотоматериала линейно зависит от экспозиции; однако для реальных фотоэмульсий это условие не выполняется. Поэтому следует выбрать режим регистрации, вносящей минимальные искажения в восстанавливаемый волновой фронт. В работе А. М. Беккера (Bekker et al., 1979) показано, что для линейного восстановления необходимо, чтобы весь диапазон экспозиций не выходил за пределы интервала энергий, для которого справедливо равенство

$$T'_A(E) = a \ln E + c, \quad (2)$$

где a и c — постоянные; при этом величина нелинейных искажений N связана с точностью аппроксимации производной функции $T'_A(E)$ соотношением

$$N \leq \left| T'_A(E) - \frac{a}{E} \right|. \quad (3)$$

Для доказательства этого факта используется метод моделирования процесса голографической записи. Если равенство (2) выполнено, то

модуль комплексной функции пропускания фильтра $\Phi(r)$ можно представить в виде

$$\Phi(r) = \frac{a}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln T [(R_0 + H(r) e^{i\alpha x})(R_0 + H^*(r) e^{-i\alpha x})] e^{-i\alpha x} dx.$$

Считая, что $|H(r)| < R_0$, разложим подинтегральную функцию в ряд Тейлора, и учитывая ортогональность системы экспонент, имеем

$$\Phi(r) = \frac{a}{R_0} H(r); \quad (4)$$

это значит, что амплитуда восстановленной волны линейно зависит от амплитуды предметной волны в плоскости записи голографического фильтра. Используя аналогичный прием, можно получить выражение, связывающее точность аппроксимации кривой амплитудного пропускания эмульсии вида (2) и точности моделирования голографического процесса (3).

Отметим, что в соответствии с (4) величина дифракционной эффективности голографического фильтра, являющаяся параметром, определяющим светосилу прибора, определяется величиной $Q_0^2 = 1/r_0^2$ — отношения интенсивностей предметной и опорной волн при записи голограммы. Таким образом, задача выбора оптимальных параметров записи сводится к подбору участка кривой $T_A(E)$, который соответствует равенству (2) с требуемой точностью, и выбору таких параметров записи Q и T (времени экспозиции), чтобы величина Q_0^2 принимала максимальное значение при условии, что максимальное значение экспозиции $E_m = T_0(1 + Q_0)^2$ и минимальное ее значение $E_{\min} = T_0(1 - Q_0)^2$ лежат в интервале $[E_1, E_2]$, где E_1 и E_2 — границы требуемого участка. Таким образом, задача свелась к элементарной задаче нелинейного программирования: найти Q_0 и T_0 такие, чтобы Q_0^2 была максимальной при условиях $T_0(1 + Q_0)^2 E_2, T_0(1 - Q_0)^2 E_1$. Эта задача может быть решена аналитически:

$$Q_{\text{опт}} = \frac{\sqrt{E_2} - \sqrt{E_1}}{\sqrt{E_2} + \sqrt{E_1}},$$

$$T_{\text{опт}} = \frac{E_2}{(1 + Q_{\text{опт}})^2}.$$

Остановимся на выборе подходящего фотоматериала. Из вышеизложенного следует, что кривая $T_A(E)$ должна иметь достаточно большой интервал, на котором выполнено равенство (2). Нами была использована

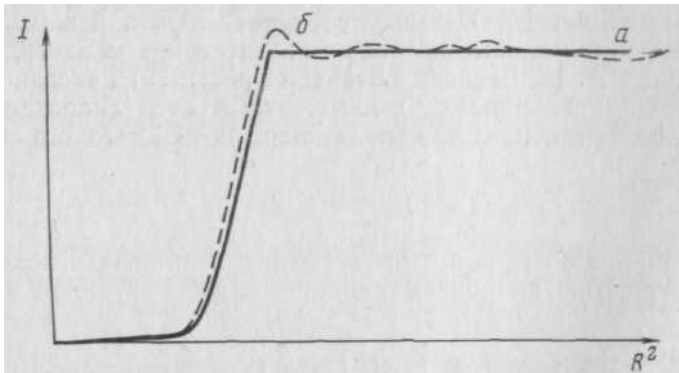


Рис. 5. Расчетная (а) и экспериментальная (б) кривые зависимости световых величин I от радиуса диафрагмы R , установленной на входе коррелятора (см. рис. 4)

фотоэмульсия Agfa-Gevaert 8E75, обработанная в проявителе РОТА; для нее E_2/E_1 100, что позволяет добиться достаточно высокой дифракционной эффективности.

Для реализации пространственной фильтрации собрана оптическая схема, показанная на рис. 4. Линзы L_1D_4 и L_4D_2 — микрообъективы, служат для создания плоских фронтов, а линзы L_2 и L_3 являются фурье-преобразующими. Плечо $P_1L_3P_2L_6P_3$ является коррелятором А. В. Луг-

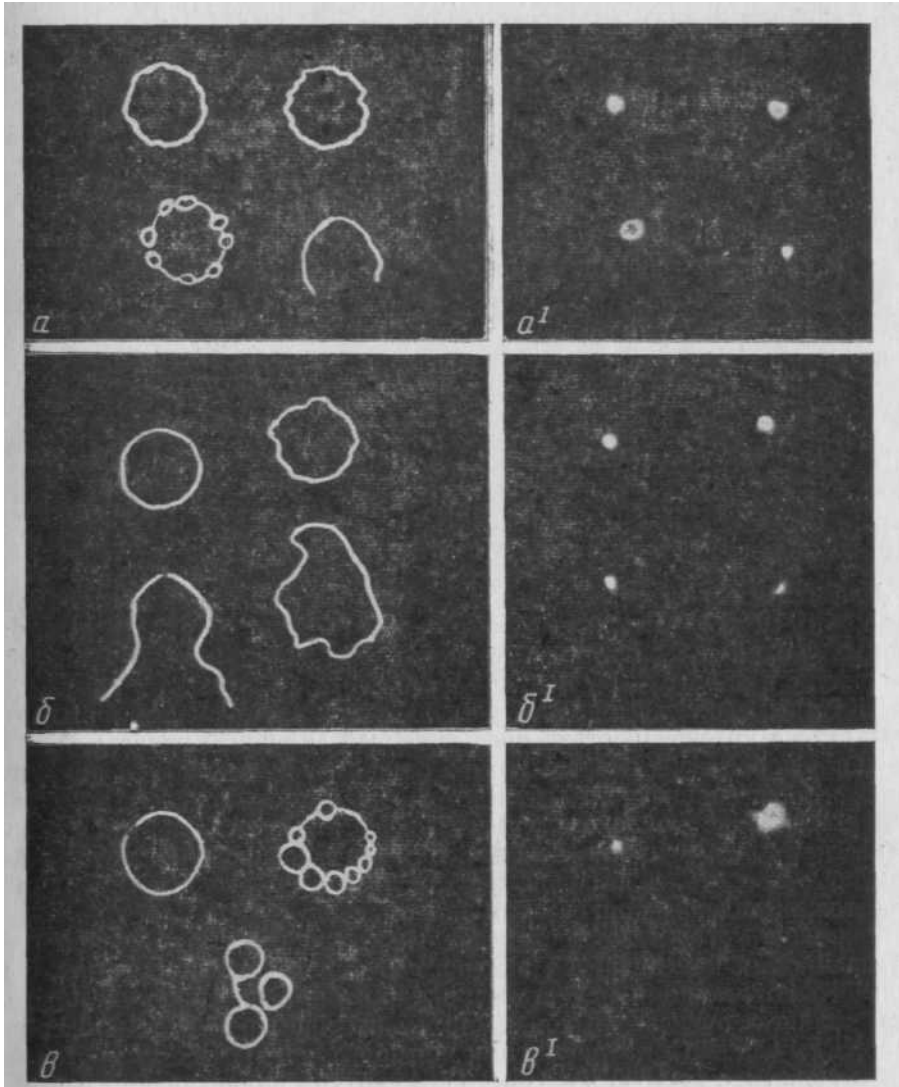


Рис. 6. Результаты анализа модели трещин, более сложных, чем кольцевые.
 $a-v$ — модель; $a'-в'$ — отклики фильтра

та, а L_5P_2 служит для создания опорной волны при записи фильтра. Для всех измерений световых величин используется прибор ФМЭП-1. При этом полезный сигнал модулируется и измерения проводятся селективным вольтметром В6-4 и синхронным детектором СД-1. Результаты регистрируются двухкоординатным самописцем. Для анализа записанного фильтра проводились измерения зависимости I от R -радиуса, уста-

новленной на входе коррелятора. Из (1) видно, что эта зависимость должна иметь следующий вид:

$$I(R) \propto \begin{cases} 0 \\ (r - R_1)^4 \\ (r_2 - r_1)^4 \end{cases}$$

при $R \leq r_1, r_1 \leq R \leq r_2, r \geq r_2$.

На рис. 5 показаны расчетная и экспериментальная кривые и видно их хорошее совпадение. Результаты анализа модели объекта, состоящего из кольцевых структур разных размеров и конфигураций, показаны на рис. 6.

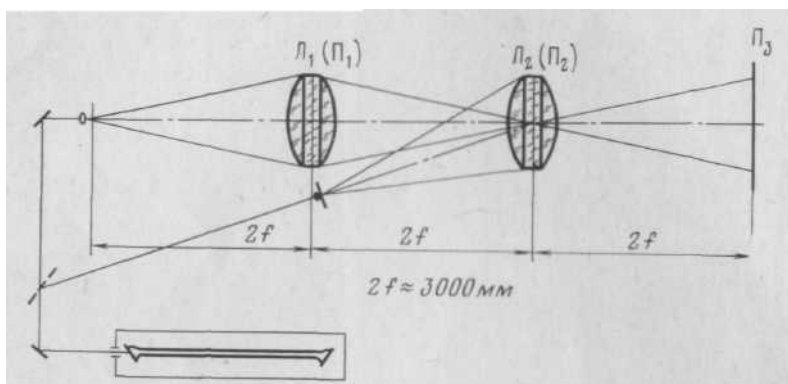


Рис. 7. Схема оптического коррелятора с большой линзой-кюветой для анализа объектов широкого диапазона размеров. Пояснение в тексте

Для автоматизации анализа выходного сигнала в корреляционной плоскости может быть использовано электронное устройство на базе промышленной телевизионной установки. Конструкция такого устройства описана в работе А. М. Беккера и др. (1978). Задачи, решаемые этим устройством, сводятся к подсчету числа световых импульсов в выходной плоскости с интенсивностью, превышающей заданный уровень. Устройство включает в себя дискриминатор с управляемым уровнем дискриминации и блок сравнения, идентифицирующий в видеосигнале импульсы, соответствующие одинаковым объектам. Модернизация электронной схемы позволит осуществлять электронное маскирование части кадра для анализа выделенных участков снимка и определять координаты объектов, выделенных оптическим блоком.

Реальное устройство потребует изменения и в оптической части установки, так как апертура входного изображения (60x60 мм) у модельного коррелятора недостаточна. По-видимому, наиболее приемлемым является оптический коррелятор типа, применяемого в Обсерватории ХГУ, основными элементами которого являются иммерсионные линзы-кюветы с $f=1500$ мм (рис. 7). Апертура анализируемого изображения может быть 120x120 мм. Для улучшения разрешения и увеличения диапазона размеров объектов желательно применение оптического когерентного генератора с длиной волны 440 нм.

ЛИТЕРАТУРА

- Беккер А. М., Бухтоярова Н. И., Вейнер К. А., Горелик В. П., Николаев С. Н., Туруханов Б. Г. Аналитическая установка для анализа бактериальных колоний по размерам.— В сб.: Оптическая обработка информации. Под ред. С. Б. Гуревича. Л., «Наука», 1978, с. 50—58.
- Василевский М. М. Основы прогнозной оценки рудоносности вулканогенных формаций.— В кн.: Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. М., «Недра», 1977, с. 247—284.

- Василевский М. М.* Энергетические классы орбитальных ортотектонических структур Тихоокеанского региона.— Бюл. вулканол. ст., 1978, № 55, с. 30—49.
- Василевский М. М., Исаков А. Б., Тарасов В. И.* Ансамбли структурных неоднородностей Южной Камчатки.— В сб.: Магматогеннорудные системы. Под ред. Г. М. Власова. Владивосток, 1969, с. 12—18.
- Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970, 364 с.
- Ефимова З. Г.* Анализ линеаментов космического фотоснимка Кавказа на когерентной оптической установке.— Экспресс-информация, Сер. «Общая и региональная геология. Геологическое картирование», № 2. М., ВИЭМС, 1976, с. 23—29.
- Оберт Л.* Хрупкое разрушение горных пород.— В кн.: Разрушение, т. 7. М., «Мир», 1976, с. 57—128.
- Си Г., Либовиц Г.* Математическая теория хрупкого разрушения.— В кн.: Разрушение, т. 2. Под ред. Г. Либовица. М., «Мир», 1975, с. 83-203.
- Уитпл Ф.* Земля, Луна и планеты. М., Изд-во физ.-мат. лит., 1967, 247 с.
- Ханукаев А. Н.* Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Госгортехиздат, 1962, 225 с.
- Януги Д. А., Ефимова З. Г., Скублова Н. В.* Использование когерентной оптической обработки при геологическом дешифрировании аэрокосмофотоснимков.— В сб.: Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л., ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, 1979, с. 182—192.
- Bekker A. M., Bukhtoyarova N. J., Turukhano B. G.* An Optimization of Recording of Holograms Formed with Spatially Modulated Reference Waves.— Optics Communications, 1979, v. 31, p. 290—296.
- Lugt A. V.* Signal detection by complex spatial filtering.— IEEE Trans., 1964, v. IT-10, p. 139—145.

Институт вулканологии
ДВНЦ АН СССР

Поступила
20. III. 1980 г.

