

# Алгоритм классификации пикселей цветной интерферограммы, зарегистрированной в методе фотоупругости

А. В. Лихачев<sup>1,2</sup>, М. В. Табанюхова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН)

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

<sup>3</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Аннотация:** Рассматривается задача исследования плоского напряжённого состояния методом фотоупругости. Методика основывается на решении уравнений равновесия. Граничные условия для них задаются, исходя из зарегистрированной интерференционной картины. На неё накладывается равномерная сетка. Для каждого узла определяется порядок интерференционной полосы, которой он принадлежит. К настоящему времени проблема автоматизации этой процедуры не решена в полном объёме. Для её решения разработан и программно реализован алгоритм, устанавливающий принадлежность узла полосе по расцветке окружающей его области. В основе алгоритма лежит проверка статистической гипотезы о принадлежности выборки заданному распределению по критерию Пирсона. Для этого количественно сравниваются гистограммы яркости во всех трёх цветовых каналах полосы каждого порядка с соответствующими гистограммами, построенными для области в окрестности рассматриваемого узла. Применение метода к данным, снятым на установке ППУ-7, показало его эффективность. В частности, для интерференционных картин от простых объектов (диск, пластиинка) были получены следующие результаты. Из 210-ти точек (узлов прямоугольной сетки), для которых определялась принадлежность интерференционной полосе, было правильно классифицировано примерно 95%. Более того, в некоторых случаях неправильно классифицированных пикселей не было вовсе. Пиксели, не классифицированные по причине того, что были отклонены гипотезы о соответствии цветности их окрестности цветовой гамме какой-либо из полос, составили 5–10%.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121022000116-0).

**Ключевые слова:** автоматизация метода фотоупругости, классификация пикселей по цвету, метод Пирсона.

**Для цитирования:** Лихачев А. В., Табанюхова М. В. Алгоритм классификации пикселей цветной интерферограммы, зарегистрированной в методе фотоупругости // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 4. С. 48–62. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-4-48-62>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Лихачев А. В., Табанюхова М. В., 2025

Статья поступила в редакцию 21.08.2025;  
переработанный вариант – 16.10.2025;  
принята к публикации 17.10.2025.

## 1. Введение

Методы, основанные на явлении интерференции, широко применяются в экспериментальных исследованиях. С их помощью можно получить как качественное представление об изучаемом явлении, так и провести точные количественные измерения. Достаточно полно и последовательно соответствующая теория изложена в монографии [1]. Также там описываются методики, применяемые при изучении как прозрачных сред (жидкости, газы и их потоки), так и непрозрачных объектов. В последнем случае чаще всего определяется форма поверхности твердого образца [2–4]. Это, в том числе, позволяет изучать её напряжённо-деформированное состояние [5–7].

Если известны деформации поверхности тела, находящегося под воздействием внешних сил, распределение напряжений по его объёму может быть получено путём решения системы уравнений теории упругости. Однако её аналитические решения известны лишь для немногих частных случаев, поэтому приходится использовать либо численные методы, либо упрощённые модели. При этом имеется ряд проблем, одной из которых является верификация таких моделей. Для проверки адекватности требуется сравнение полученных в их рамках результатов с независимыми измерениями. Последние могут быть выполнены методом фотоупругости. Он основывается на эффекте двойного лучепреломления, возникающем в некоторых прозрачных материалах под воздействием напряжений [8]. Его теория, адаптация к конкретным задачам, описание используемого оборудования даны в работах [9–12].

Наиболее изученной в методе фотоупругости является плоская задача [13], т. е. случай, когда тензор напряжений имеет только три независимых компоненты (будем считать, что это  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\tau_{xy}$ ). Фоточувствительные материалы характеризуются тем, что под действием нагрузок их диэлектрическая проницаемость становится тензорной величиной, которая определяется тензором напряжений. Поэтому если такой образец просвечивать белым поляризованным светом, то в тех областях, где направление одной из главных осей тензора диэлектрической проницаемости совпадает с направлением плоскости поляризации, на цветной интерференционной картине наблюдаются темные линии – оптические изоклины. При упругом деформировании первоначально изотропного материала оптические изоклины совпадают с механическими, т. е. изоклина является линией, вдоль которой направления главных напряжений постоянны и совпадают с оптическими осями поляризатора и анализатора в скрещенном плоском полярископе. Это обстоятельство позволяет, используя интерференционную картину, проинтегрировать одно из уравнений, описывающих равновесие нагруженного образца:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

После этого можно получить разности нормальных напряжений  $\sigma_{xx}(x, y) - \sigma_{yy}(x, y)$ , а также касательные напряжения  $\tau_{xy}(x, y)$ .

Разработано несколько подходов к решению уравнений (1), [9, 14–16]. При этом в большинстве случаев на интерференционном изображении задаётся регулярная сетка, в узлах которой содержатся данные, требуемые для получения частных решений (1). Для простых, но, тем не менее, эффективных методов, достаточно знать порядок интерференционной полосы, которой принадлежит каждый из узлов. Последний вопрос можно рассматривать в контексте более широких, связанных между собой задач – трассировки интерференционной полосы [17, 18] и определения положения точки относительно её центра [19].

Большинство методов расшифровки цифровых интерферограмм ориентировано на полутоновые изображения. Это обусловлено рядом причин, немаловажной из которых является то, что в общем случае работа с цветными интерферограммами значительно сложнее. Поэтому на первом этапе их обработки проводится преобразование, переводящее всю цветовую гамму в оттенки серого. В настоящее время для кодирования цвета наиболее

часто применяется аддитивная модель RGB (аббревиатура английских слов Red, Green, Blue – красный, зелёный, синий) – описывающая способ цветовоспроизведения с помощью трёх основных цветов. В случае кодировки RGB, при переходе к полутоновому изображению яркость каждого пикселя  $Y$  вычисляется по формуле

$$Y = 0.299 R + 0.57 G + 0.114 B \quad (2)$$

Здесь  $R$ ,  $G$  и  $B$  – интенсивности того же пикселя в красном, зелёном и синем каналах соответственно. В частности, в работе [20], где анонсируется программное обеспечение для полуавтоматизированной обработки цветных интерферограмм, регистрируемых в методе фотоупругости, реализован именно такой подход. Сначала по формуле (2) производится переход к полутоновому изображению, затем по анализу его яркости трассируются и нумеруются интерференционные полосы.

Однако не следует забывать, что цветные изображения, содержат больше информации, чем полутона (им соответствует три распределения яркости, вместо одного). Поэтому есть основания полагать, что полученные по ним результаты будут более точными. Например, если применить методы, программно реализованные в упомянутой работе [20], для классификации узлов сетки по принадлежности определённой интерференционной полосе, то, по мере приближения к границам полос точность классификации будет падать. Это видно, в том числе, из результатов самой работы [20], где при обработке зашумлённых экспериментальных данных наблюдались значительные ошибки при определении границ полос.

В связи со стремлением более полно использовать информацию, заключённую в окраске предметов, имеется тенденция к разработке методов анализа цветных изображений без предварительного преобразования (2). Перспективы использования цветовых признаков для поиска и классификации объектов на изображениях, в том числе, с применением нейронных сетей, отмечались, например, в [21, 22]. В [23] была предложена оригинальная кодировка цветности, более удобная для некоторых математических операций по сравнению со стандартной кодировкой RGB. В [24] рассматривалось преобразование RGB изображения, позволяющее повысить различимость оттенков. Получение информации об объекте или явлении по его цветному изображению (обычно это цифровая фотография) в русскоязычной литературе часто называется колориметрией. Её преимущества и недостатки для различных приложений обсуждаются в [25]. Решения конкретных практических задач посредством анализа цветных изображений даны в [26–28].

Наличие цвета также открывает новые возможности для расшифровки интерференционных картин в методе фотоупругости. В этом случае некоторые задачи можно решить, не прибегая к поиску реперов, который для полутона изображений часто имеет невысокую точность. Учитывая вышеизложенное, сформулируем цель настоящего исследования: разработать алгоритм для автоматической классификации точек интерферограммы по цветовой гамме их окрестностей.

## 2. Предлагаемая методика

### 2.1. Алгоритм

Пусть имеется цветная интерференционная картина, на которой зарегистрированы полосы от 1-го до  $K$ -го порядка, а также присутствует фон. Предположим, что полосы различного порядка отличаются друг от друга по цветовой гамме. Ставится задача определить, полосе какого порядка принадлежит произвольно взятый пиксель  $A$ . Поскольку интерференционная полоса имеет яркую и тёмную части, отличающиеся друг от друга по окраске, целесообразнее определять принадлежность пикселя полуполосе, т. е. провести его классификацию по  $2K + 1$  классам ( $2K$  полуполос и фон).

Пронумеруем полуполосы целыми и полуцелыми числами  $k$  ( $k = \frac{1}{2}, 1, \dots, (2K-1)/2, K$ ). Обозначим через  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$  гистограммы соответственно красной, зелёной и синей

компоненты для области, занимаемой  $k$ -ой полуполосой. Этими функциями определяется её цветовая гамма. Выделим вокруг рассматриваемого пикселя  $A$  окрестность  $\omega_A$  из  $M$  пикселей (сам  $A$  также включается в их число). Область  $\omega_A$  должна быть достаточно большой, чтобы по цвету составляющих её пикселей можно было построить гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$ , аналогичные гистограммам  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$ . Классифицировать пиксель  $A$  будем по степени попарной близости гистограмм  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  и  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$ . Для этого замечаем, что речь идёт не просто о вычислении расстояния между кривыми, а о проверке статистической гипотезы о принадлежности выборки, которую составляют пиксели из  $\omega_A$ , цветовому распределению пикселей в пределах полуполосы, функция плотности вероятности которого оценивается гистограммами  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$ . Для проверки подобных гипотез чаще всего используется метод Пирсона, который даёт ответ на вопрос о том, может ли с вероятностью, не меньшей чем заданная, имеющаяся выборка принадлежать данному распределению [29].

В настоящей работе метод Пирсона был реализован описанным ниже образом. Пусть гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  имеют соответственно  $m_R$ ,  $m_G$ ,  $m_B$  карманов. Вычислим величины

$$\alpha_k = M \sum_{i=1}^{m_R} \frac{(v_{Ri} - \hat{P}_{Rk,i})^2}{\hat{P}_{Rk,i}}; \quad \beta_k = M \sum_{i=1}^{m_G} \frac{(v_{Gi} - \hat{P}_{Gk,i})^2}{\hat{P}_{Gk,i}}; \quad \gamma_k = M \sum_{i=1}^{m_B} \frac{(v_{Bi} - \hat{P}_{Bk,i})^2}{\hat{P}_{Bk,i}}. \quad (3)$$

Здесь  $v_{Ri}$ ,  $v_{Gi}$ ,  $v_{Bi}$  – частоты попадания в  $i$ -ый карман гистограмм  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  соответственно. Через  $\hat{P}_{Rk,i}$  обозначена вероятность попадания в  $i$ -ый карман гистограммы  $R_A$ , вычисленная по гистограмме  $R_{0k}$ . Вероятности  $\hat{P}_{Gk,i}$ ,  $\hat{P}_{Bk,i}$  имеют аналогичный смысл для зелёной и синей компонент. Один из возможных способов расчёта оценок для  $\hat{P}_{Rk,i}$ ,  $\hat{P}_{Gk,i}$ ,  $\hat{P}_{Bk,i}$  приведён в пункте 2.3.

Если в области  $\omega_A$  пикселей намного меньше, чем в области, занимаемой  $k$ -ой полуполосой, то, по лемме Пирсона, случайные величины  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\gamma_k$  имеют распределение  $\chi^2$  соответственно с  $m_R - 1$ ,  $m_G - 1$ ,  $m_B - 1$  степенями свободы. Предположим, что яркости в разных цветовых каналах независимы в совокупности. Тогда сумма  $\delta_k = \alpha_k + \beta_k + \gamma_k$  также распределена по  $\chi^2$  с  $m_R + m_G + m_B - 3$  степенями свободы. Зададим малую вероятность  $p$  (на практике обычно берётся  $0.001 \leq p \leq 0.05$ ). Обозначим через  $x_{1-p}$  квантиль порядка  $1 - p$  распределения  $\chi^2(m_R + m_G + m_B - 3)$ . Тогда вероятность события  $\delta \geq x_{1-p}$  равна  $p$ . Таким образом, если вычисленный для данного пикселя критерий  $\delta_k$  оказался не меньше квантиля  $x_{1-p}$ , то произошло маловероятное событие. Это означает, что предположение о том, что он принадлежит  $k$ -ой полуполосе неверно, и его следует отбросить. Если же оказалось, что  $\delta_k < x_{1-p}$ , то указанное предположение не противоречит имеющимся данным.

При использовании описанного алгоритма на практике возможна такая ситуация, что неравенство  $\delta_k < x_{1-p}$  имеет место для нескольких  $k$ , или же, напротив, не выполняется ни для одной полуполосы. В пункте 2.3, посвящённом программной реализации, описываются действия, предусмотренные в таких случаях.

## 2.2. Оборудование

Экспериментальная часть работы выполнялась на поляризационно-проекционной установке ППУ-7, предназначеннной для исследования напряжённо деформированного состояния конструкций [30]. Её схема представлена на рис. 1. В регистрируемой интерференционной картине цветовая гамма полосы определяется только её порядком, но не зависит от размеров и формы образца, а также от приложенных нагрузок. Это позволяет сначала найти гамму полосы каждого встречающегося порядка, и далее использовать полученные результаты.

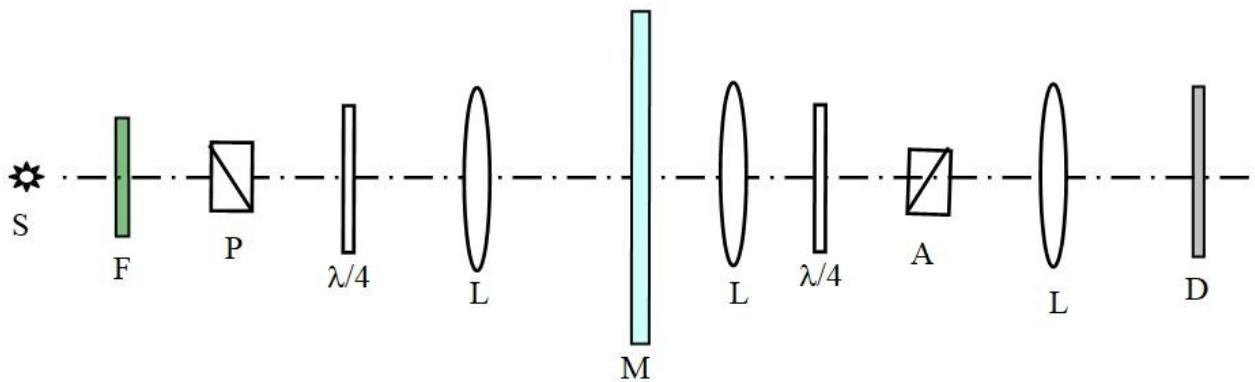


Рис. 1. Схема установки ППУ-7: S – источник света, F – светофильтр, P – поляризатор, A – анализатор, M – исследуемая модель,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластина, L – линзы, D – экран

Для определения всех  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$  было поставлено несколько экспериментов с образцами, дающим простую интерференционную картину, в которой чётко различаются полосы разных порядков. Их границы определялись автоматически программой, реализующей разработанный авторами алгоритм, описанный в работе [18]. Чтобы уменьшить влияние случайных ошибок, гистограммы  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$  строились по областям, которые занимает  $k$ -ая полуполоса на всех интерферограммах, зарегистрированных в этой серии экспериментов. При построении интервал возможных яркостей (от 0 до 255) разбивался на равные промежутки (карманы гистограммы), число которых было одинаковым для всех порядков полос.

### 2.3. Программная реализация

На основе предложенного алгоритма было разработано программное обеспечение для автоматизации обработки экспериментальных данных, зарегистрированных на установке ППУ-7. Чтобы проинтегрировать уравнения (1), на интерферограмме задаётся квадратная сетка. Для классификации пикселя  $A$ , соответствующего узлу сетки, в первую очередь, определяется, не принадлежит ли он фону. Для этого можно воспользоваться алгоритмом, описанным в пункте 2.1. Однако в этом нет необходимости. Фон по цветовой гамме сильно отличается от интерференционной картины и имеет тёмный цвет, близкий к чёрному. Поэтому его яркость во всех каналах близка к нулю. Компьютерная программа относит пиксель  $A$  к фону, если его яркость в каждом из каналов меньше пороговой величины  $I_0 = 25$ . Отметим, что в процессе обработки экспериментальных данных все пиксели, принадлежащие фону, были классифицированы правильно.

Если пиксель  $A$  не принадлежит фону, вокруг него выделяется область  $\omega_A$ , представляющая собой квадрат  $n \times n$  пикселей с центром в  $A$  ( $n$  полагается нечётным числом). По цвету пикселей, составляющих  $\omega_A$ , строятся гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  с теми же параметрами, что и гистограммы  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$ . При этом возможно, что не все карманы гистограмм  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  окажутся заполненными, поскольку окраска интерференционных полос является неоднородной, и их оттенки в разных частях могут заметно отличаться. Вследствие того, что в гистограммах заполняется различное число карманов, их нормировки оказываются рассогласованными. Для того чтобы провести количественное сравнение, гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  нормируются так, чтобы выполнялись равенства

$$\sum_{i=1}^{m_R} v_{R,i} = \sum_{i=1}^{m_R} v_{R,k,i}; \quad \sum_{i=1}^{m_G} v_{G,i} = \sum_{i=1}^{m_G} v_{G,k,i}; \quad \sum_{i=1}^{m_B} v_{B,i} = \sum_{i=1}^{m_B} v_{B,k,i}. \quad (4)$$

В (4) суммирование ведется по тем карманам, которые заполнены в гистограммах  $R_A, G_A, B_A$  соответственно. Через  $v_{Rk,i}, v_{Gk,i}, v_{Bk,i}$  обозначены частоты попадания в  $i$ -ый карман гистограмм  $R_{0k}, G_{0k}, B_{0k}$ . Остальные обозначения те же, что и в формуле (3).

После того, как гистограммы  $R_A, G_A, B_A$  построены и ортонормированы согласно (4), с использованием формул (3), в которых оценочные вероятности заменяются частотами попаданий, т. е. полагается  $\hat{P}_{Rk,i} = v_{Rk,i}$ ,  $\hat{P}_{Gk,i} = v_{Gk,i}$ ,  $\hat{P}_{Bk,i} = v_{Bk,i}$ , для всех  $k$  вычисляется критерий  $\delta_k$ , и проверяется неравенство  $\delta_k < x_{1-p}$ . Пиксель считается принадлежащим той полуполосе, для которой оно выполняется. Если такое имеет место для двух или более полуполос, то выбирается та, для которой  $\delta_k$  имеет наименьшую величину, при этом пиксель указывается в информационном сообщении программы, чтобы оператор в случае необходимости смог проверить правильность его классификации.

Если неравенство  $\delta_k < x_{1-p}$  не выполняется ни для одного  $k$ , это свидетельствует о том, что рассматриваемый пиксель находится близко к границе, и область  $\omega_A$  захватывает более одной полуполосы, или частично попадает на фон. Чтобы избежать этого, она перемещается. Ближайшая к пикселию  $A$  точка границы не определяется, а просто проводится перемещение области  $\omega_A$  в четырёх направлениях (лево, право, низ, верх) по следующему правилу. Сначала центр области перемещается на один пиксель влево (при этом её форма и размер не изменяются). При новом положении центра вычисляются гистограммы  $R_A, G_A, B_A$  рассчитываются критерии  $\delta_k$ , значения которых сравниваются с квантилем  $x_{1-p}$ . Если вновь для всех  $k$  имеет место  $\delta_k \geq x_{1-p}$ , то центр области опять смещается на пиксель влево. Так продолжается до тех пор, пока либо найдутся полуполосы, для которых  $\delta_k < x_{1-p}$  (тогда классификация пикселя  $A$  производится как описано выше), либо  $A$  окажется на границе области. В последнем случае центр возвращается на исходное место (в пиксель  $A$ ), и начинается перемещение области вправо с выполнением тех же операций. Если и по окончании этого пиксель  $A$  остаётся неклассифицированным, то таким же образом проводится перемещение области вниз, а затем, если потребуется, вверх. Если описанные перемещения области  $\omega_A$  не дали возможности классифицировать пиксель  $A$ , то об этом сообщается оператору, который принимает решение о его дальнейшей обработке (например, классифицирует его вручную). После того как установлена принадлежность каждого узла сетки некоторой полуполосе, программа передает управление оператору, который определяет её дальнейшие действия.

### 3. Результаты

#### 3.1. Апробация на экспериментальных данных

Метод был опробован на экспериментальных данных, полученных на установке ППУ-7 при одноосном сжатии диска, изготовленного из оптически чувствительного материала. Типичная для таких измерений интерференционная картина представлена на рис. 2. Для неё были автоматически определены границы полос до шестого порядка включительно. На рис. 2 нанесены границы полос до порядка 7/2. Размер изображения составляет  $680 \times 640$  пикселей. Размер ячеек сетки, которую требуется нанести на интерферограмму для определения напряжений, был принят  $40 \times 40$  пикселей. Границы узлы не рассматриваются, поскольку там нет интерференционной картины. Таким образом, количество классифицируемых внутренних узлов равно 210.

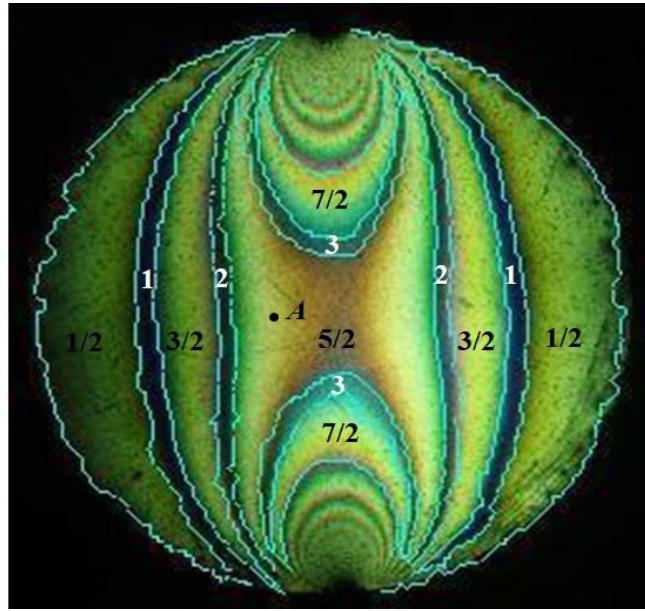


Рис. 2. Размеченная интерференционная картина. Нанесены автоматически найденные границы полос, порядков от  $1/2$  до  $7/2$

На рис. 3 представлены огибающие гистограмм яркости цветовых компонент. Левая часть рисунка (варианты  $a$ - $e$ ) относится к полосам первых четырёх полуцелых порядков:  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ,  $7/2$ . Огибающие изображены соответственно сплошными, штриховыми, пунктирными и штрихпунктирными линиями. Рис. 3,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  относятся к красной, зелёной и синей компонентам. Число карманов гистограмм равно 50, при этом на каждый из них приходится 5.1 единиц яркости. Видно, что цветовые компоненты полос различного порядка существенно отличаются друг от друга, что обеспечивает возможность классификации.

Для данных, приведённых на рис. 3, размер заданной вокруг каждого из узлов области  $\omega_A$ , по которой проводится его классификация, составляет  $25 \times 25$  пикселей. Положение одного из узлов помечено на рис. 2 точкой  $A$ . На рис. 3 справа (варианты  $g$ - $e$ ) сплошными линиями показаны огибающие гистограмм яркости цветовых компонент области  $\omega_A$ , окружающей помеченный пиксель. Кроме них там приведены огибающие гистограмм  $R_{05/2}$ ,  $G_{05/2}$ ,  $B_{05/2}$  (пунктирные линии), полученные для полосы порядка  $5/2$ , которой в данном примере принадлежит  $\omega_A$ . Рис. 3,  $g$ ,  $h$ ,  $i$  соответствуют красной, зелёной и синей компонентам. На рис. 3 справа показаны только те интервалы, где гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  отличны от нуля. При этом размер кармана гистограммы остаётся равным 5.1 единиц яркости, т. е. таким же, как и при построении гистограмм  $R_{0k}$ ,  $G_{0k}$ ,  $B_{0k}$ , приведённых на рис. 3 слева. Таким образом, гистограммы  $R_A$ ,  $G_A$ ,  $B_A$  имеют соответственно  $m_R = 16$ ,  $m_G = 10$ ,  $m_B = 17$  карманов.

Критерии  $\delta_k$ , вычисленные для рассматриваемого узла по формулам (3) для полос порядков  $1/2$ ,  $1$ ,  $3/2$ ,  $2$ ,  $5/2$ ,  $3$ ,  $7/2$ , оказались равными  $62.43$ ;  $108.36$ ;  $50.14$ ;  $127.13$ ;  $41.21$ ;  $116.90$ ;  $78.73$ . Согласно сказанному выше,  $\delta_k$  имеют распределение  $\chi^2$  с  $16 + 10 + 17 - 3 = 40$  степенями свободы. Его квантиль  $x_{1-p}$  при  $p = 0.05$  равен 45.2. Следовательно, при таком уровне значимости ошибка предлагаемый метод однозначно определяет, что рассматриваемый пиксель (узел сетки) принадлежит интерференционной полосе порядка  $5/2$ . Отметим что значения критерия  $\delta_k$  для целых порядков интерференционных полос значительно выше, чем для полос полуцелых порядков. Это объясняется тем, что полосы порядков  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ,  $7/2$  более близки по расцветке между собой, чем с полосами порядков  $1$ ,  $2$ ,  $3$ .

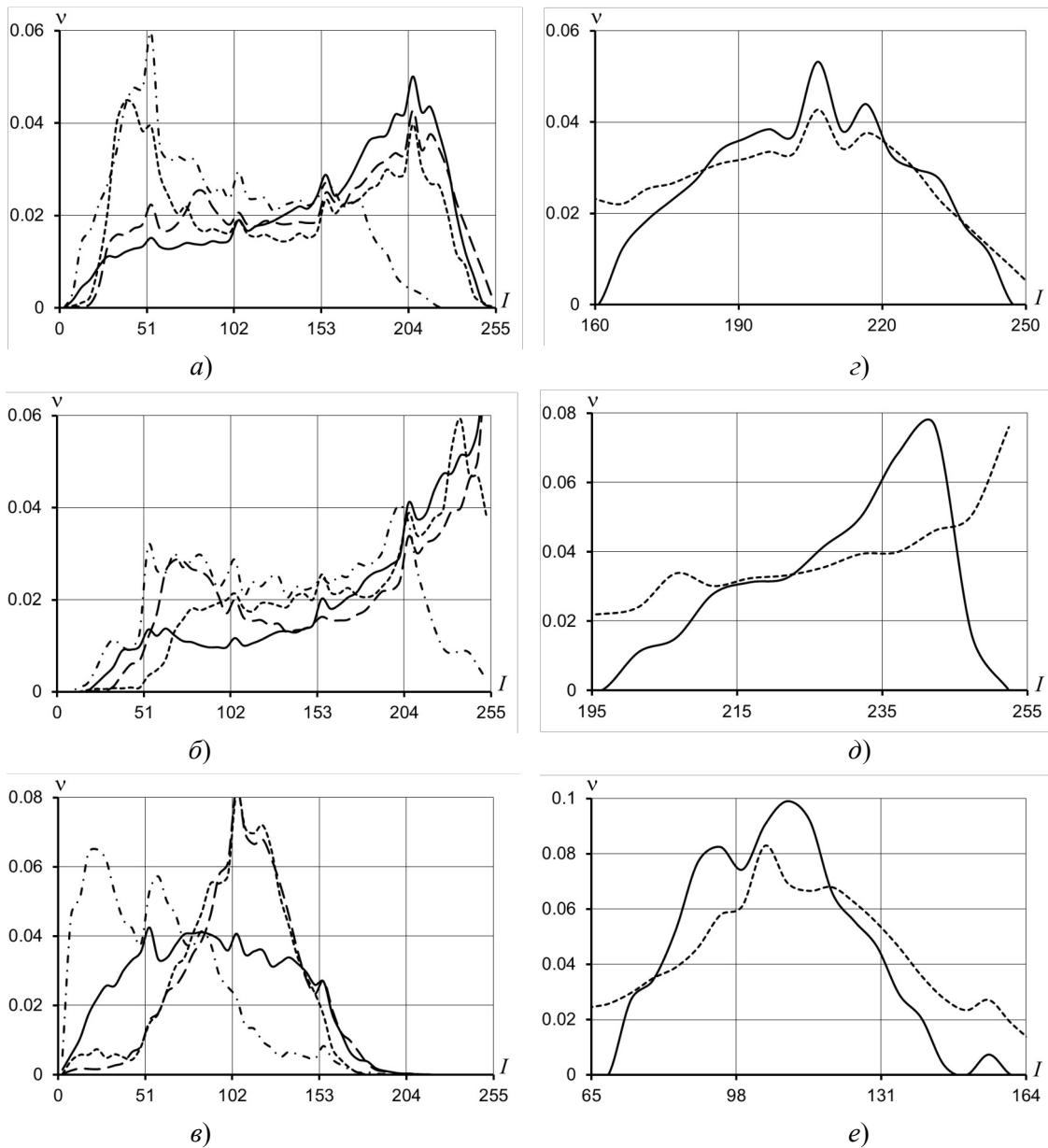


Рис. 3. Огибающие гистограмм яркости цветовых компонент. Слева: интерференционные полосы первых четырёх полуцелых порядков; (а) красный канал, (б) зелёный, (в) синий. Справа: область  $\omega_A$  (сплошные линии) и полоса порядка 5/2 (пунктирные линии); (г) красный канал, (д) зелёный, (е) синий

### 3.2. Зависимость от уровня шума и других факторов

Устойчивость по отношению к случайному шуму является одним из основных требований к современным численным методам. С целью исследования этого вопроса было проведено моделирование. Использовалась следующая модель шума. Цветовая гамма каждого пикселя преобразовывалась согласно выражению  $(r, g, b) \rightarrow (r + \xi_1, g + \xi_2, b + \xi_3)$ . Здесь  $r, g, b$  – яркости пикселя в красном, зелёном и синем каналах;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – единичные реализации случайных величин, имеющих нормальное распределение с равным нулю математическим ожиданием, и дисперсиями  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ . Последние вычисляются по средним яркостям в соответствующих каналах  $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$  таким образом, чтобы отношение сигнал/шум ( $SNR$ ), выраженное в децибелах, было одинаковым во всех каналах:

$$\sigma_1^2 = \bar{R}^2 \exp\left(-\frac{SNR}{10}\right); \quad \sigma_2^2 = \bar{G}^2 \exp\left(-\frac{SNR}{10}\right); \quad \sigma_3^2 = \bar{B}^2 \exp\left(-\frac{SNR}{10}\right). \quad (5)$$

Значения  $SNR$  приведены в первом столбце табл. 1, которая иллюстрирует устойчивость метода. В последующих трёх столбцах даны числа  $N_t$ ,  $N_f$  и  $N_q$  соответственно количества узлов, принадлежность которых полосе была определена правильно, неправильно и тех, которые не были классифицированы. Те же данные, выраженные в процентных отношениях  $t = (N_t/N_0) \times 100\%$ ,  $f = (N_f/N_0) \times 100\%$ ,  $q = (N_q/N_0) \times 100\%$ , приведены в пятом шестом и седьмом столбцах. Здесь  $N_0 = 210$  – число классифицируемых узлов.

Таблица 1. Результаты классификации в зависимости от уровня шума

$SNR$	$N_t$	$N_f$	$N_q$	$t$	$f$	$q$
без шума	196	0	12	94.2%	0%	5.8%
20	196	1	11	94.2%	0.5%	5.3%
19	195	1	12	93.7%	0.5%	5.8%
18	193	3	12	92.8%	1.4%	5.8%
17	192	4	12	92.3%	1.9%	5.8%
16	191	4	13	91.8%	1.9%	6.3%
15	189	4	15	90.9%	1.9%	7.2%
14	186	5	17	89.4%	2.4%	8.2%
13	182	5	21	87.5%	2.4%	10.1%
12	179	5	24	86.1%	2.4%	11.5%
11	172	7	29	82.7%	3.4%	13.9%
10	170	9	29	81.8%	4.3%	13.9%

Табл. 1 составлена для интерферограммы, изображённой на рис. 2. Если шум отсутствует, то узлы классифицируются на ней самой. При его наличии гамма каждого пикселя изменяется случайным образом в соответствии с (5) и классификация производится на интерферограмме с искажённой цветностью. Размер области  $\omega_A$ , как и в случае результатов, приведённых на рис. 3, равен  $25 \times 25$  пикселей. Как и следовало ожидать, показатели алгоритма ухудшаются с ростом уровня шума. В частности, при изменении  $SNR$  от 20 до 10 количество правильно классифицированных пикселей уменьшается с 196 до 170, что составляет приблизительно 13.3%.

Очевидно, что эффективность метода зависит от размера области  $\omega_A$ . В данном случае он играет двоякую роль. С одной стороны, с его ростом увеличивается размер выборки, на которой проверяется статистическая гипотеза, что уменьшает влияние случайных ошибок. С другой, – большая область чаще захватывает более одной полосы, и решение задачи по этим данным может оказаться невозможным. О точности метода в целом, а также о его зависимости от размера квадратной ( $n \times n$  пикселей) области  $\omega_A$ , применительно к рассматриваемым экспериментальным данным можно судить по табл. 2. В первом её столбце указано число  $n$ , в остальных – значения тех же показателей, что и в соответствующих столбцах табл. 1.

Таблица 2. Результаты классификации в зависимости от размера области  $\omega_A$

$n$	$N_t$	$N_f$	$N_q$	$t$	$f$	$q$
11	154	14	40	74%	6,7%	19,3%
15	167	13	28	80,3%	6,3%	13,4%
21	180	9	19	86,5%	4,3%	9,2%
25	196	0	12	94,2%	0	5,8%
29	198	3	7	95,2%	1,4%	3,4%
35	195	1	12	93,8%	0,4%	5,8%
45	189	0	19	90,8%	0	9,2%
51	176	0	32	84,6%	0	15,4%

Ещё одним параметром, влияющим на точность классификации, является вероятность  $p$ . Как указывалось выше, в приложениях она обычно берётся из интервала  $[0.001; 0.05]$ . Однако это не противоречит тому, что для некоторых задач (в том числе и для рассматриваемой здесь) оптимальное значение  $p$  может оказаться вне его. Поэтому вычисления проводились для  $p = 0.075$ ,  $p = 0.05$  и  $p = 0.0025$ . Лучшие результаты были получены для второго значения, они представлены выше. В случае  $p = 0.075$  около 25% узлов оказалось неклассифицировано, а при  $p = 0.0025$  доля неверно классифицированных узлов превысила 10%. И то, и другое объясняется тем, что квантиль  $x_{1-p}$  растет с уменьшением  $p$ . Это приводит к тому, что при возрастании  $p$  оказывается всё больше узлов, для которых неравенство  $\delta_k < x_{1-p}$  не выполняется ни для одного  $k$ , несмотря на то, что соответствующая им область  $\omega_A$  полностью лежит в пределах одной полуполосы. Если же  $p$  мало, то неравенство  $\delta_k < x_{1-p}$  для узлов близких к границам полуполосы выполняется при нескольких  $k$ . В этом случае классификация по наименьшему из значений  $\delta_k$  может привести к неверному результату.

## 4. Заключение

В работе в связи с исследованиями напряжённо-деформированного состояния методом фотоупругости, рассмотрена задача автоматического определения порядка цветной интерференционной полосы, которой принадлежит заданная точка. Для её решения предложен метод, основанный на проверке по критерию Пирсона статистических гипотез о идентичности гистограмм яркости цветовых компонент интерференционных полос с гистограммами компонент области в окрестности точки. Преимущество такого подхода авторы видят в том, что он позволяет, не прибегая к дополнительным предположениям и априорной информации, оценить вероятность того, что классификация проведена правильно.

Применение метода к экспериментальным данным, показало его эффективность. На интерферограмме, зарегистрированной при одноосном сжатии диска, в случае оптимального (для этих данных) выбора параметров работы программной реализации метода было правильно классифицировано примерно 95% узлов заданной сетки. Такой результат позволяет предположить, что разработанный метод может быть использован при сегментации цветных изображений и решении связанных с этим задач. Например, с его помощью можно устанавливать вероятность идентичности расцветки двух различных сегментов, или уточнять положение их границ.

## Литература

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
2. De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography // Advances in Optics and Photonics. 2015. V. 7, № 1. P. 1–65. doi: 10.1364/AOP.7.000001.
3. Денисов Д. Г. Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5, № 4. С. 393–411.
4. Майоров Е. Е., Бородянский Ю. М., Курлов В. В., Таюрская И. С., Пушкина В. П., Гулиев Р. Б. Пространственное микросканирование поверхности плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т 66, № 8. С. 688-695. doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.
5. Dvořáková P., Bajgar V., Trnka J. Dynamic electronic speckle pattern interferometry in application to measure out-of-plane displacement // Engineering Mechanics. 2007. V. 14, № 1-2. P. 37–44.
6. Ефимович И. А., Золотухин И. С. Исследование напряжённо-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной

- интерферометрии // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23, № 4. С. 79–92. doi: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92.
7. Antonov A. A., Bondarenko A. A., Strelnikov I. V., Utkin I. Yu. Increasing sensitivity of laser interferometry method designed to assess residual welding stresses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58, № 7. P. 626–631. doi: 10.1134/S1061830922070038.
  8. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). М.: Мир, 1970. 576 с.
  9. Ramesh K. Digital photoelasticity. Advanced techniques and applications. Berlin: Springer, 2000. 424 р.
  10. Албаут Г. Н., Матус Е. П., Табанюхова М. В. Исследование напряжённого состояния дисперсно-армированных балок с привлечением метода фотоупругости // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 4. С. 46–49.
  11. Mose B. R., Shin D. K., Nam J. H. Experimental stress analysis of spherical roller bearing for high-speed trains using photoelasticity // Experimental Techniques. 2023. V. 47, № 3. P. 669–678. doi: 10.1007/s40799-022-00576-3.
  12. Неверов С. А., Неверов А. А., Конурин А. И., Адылканова М. А., Орлов Д. В. Применение нейронных сетей для определения изменения напряжений в массиве пород методом фотоупругости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 176–189. doi: 10.15372/FTPRPI20230616.
  13. Frishter L. Yu. Geometrically non-linear plane elasticity problem in the area of 2 an cut out // Axioms. 2023. V. 12, № 11. A. 1030. doi: 10.3390/axioms12111030.
  14. Hendry A. W., Neal B. G. Elements of experimental stress analysis: Structures and solid body mechanics division. New York: Elsevier, 2013. 202 р.
  15. Степанова Л. В., Долих Б. С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений. Метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2017. Т. 21, № 4. С. 717–735. doi: 10.14498/vsgtu1544.
  16. Степанова Л. В. Экспериментальное и конечно-элементное определение коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса у вершины трещины в линейно-упругом изотропном материале. Часть II // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 1. С. 72–85. doi: 10.15593/perm.mech/2021.1.08.
  17. Baek T. H., Kim M. S., Hong D. P. Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques. // International Journal of Software Engineering and its Applications. 2014. V. 8, № 4. P. 91–102. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11.
  18. Лихачев А. В., Табанюхова М. В. Новый алгоритм обработки данных метода фотоупругости // Вестник Томского государственного университета. Серия: Математика и механика. 2022. № 79. С. 100–110. doi: 10.17223/19988621/79/9.
  19. Лихачев А. В., Табанюхова М. В. Оценка расстояния от заданной точки до максимума интерференционной полосы // Автометрия. 2021. Т. 57, № 3. С. 30–38. doi: 10.15372/AUT20210304.
  20. Косыгин А. Н., Косыгина Л. Н. Цифровая обработка экспериментальных интерферограмм, полученных методом фотоупругости // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2019. Т. 25, № 2. С. 75–91. doi: 10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91.
  21. Быков Р. Е. Адаптивные алгоритмы обнаружения объектов по цветовым признакам // Радиотехника. 2012. № 7. С. 97–103.
  22. Петрияненко Т. М., Чернышева М. И., Чернышев Д. Н. Комбинированные методы на основе двумерных Фурье- и вейвлет-преобразований при анализе цветных изображений // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: Управление,

- вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. 2016. № 3. С. 13–19.
23. Носовский Г. В. Геометрическое кодирование цветных изображений // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2018. № 1. С. 3–11. doi: 10.3103/S0027132218010011.
24. Раухвагер А. Б., Киселев А. С. О применении локально-фрагментарной схемы к преобразованию цветных цифровых изображений // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 9. С. 102–105. doi: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_9\_102.
25. Жбанова В. Л. Вопросы применения цифровой колориметрии в современных в современных научных исследованиях // Светотехника. 2021. № 2. С. 5–14.
26. Умбетов С. В., Пронин С. П. Алгоритм обработки цветного изображения поверхности металла и расчет глубины проникновения коррозии в металл по RGB-компонентам // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 6. С. 148–153. doi: 10.25699/SSSB.2022.46.6.015.
27. Зайцева Е. В., Кочнева А. А., Катунцов Е. В., Ромакина О. М. Применение методов, основанных на теории Retinex при обработке цветных изображений, полученных в шахтах // XXI век: Итоги настоящего и проблемы прошлого плюс. 2024. Т. 13, № 1. С. 10–17.
28. Токарев К. Е., Лебедь Н. И. Мультиклассовое распознавание посевов сельскохозяйственных культур рекуррентной нейронной сетью глубокого обучения со свёрточными слоями по цветным аэрофотоснимкам высокого разрешения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 2. С. 192–195. doi: 10.55186/25876740\_2024\_67\_2\_192.
29. Лихачев А. В. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику (Учебное пособие). Новосибирск: изд-во НГТУ, 2019. 102 с
30. Табанюхова М. В. Исследование напряжённого состояния балок с усиливающим слоем из углепластика // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 2. С. 248–254.

### Лихачев Алексей Валерьевич

д.т.н., руководитель тематической группы информатики и прикладной математики, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАЭ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1); профессор кафедры прикладной математики и кибернетики, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 330 8243, e-mail: ipm1@iae.nsk.su, ORCID ID: 0000-0002-4200-5518.

### Табанюхова Марина Владимировна

к. т. н., заведующая кафедрой строительной механики, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ, 630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113), тел. +7 383 266 3380, e-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия, как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.*

## Algorithm for classifying pixels of a color interferogram registered in the photoelasticity method.

Alexey V. Likhachev<sup>1,2</sup>, Marina V. Tabanyukhova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS (IA&E SB RAS)

<sup>2</sup> Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

<sup>3</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)

*Abstract:* The problem of studying the plane stress state by the photoelasticity method is considered. The technique is based on solving equilibrium equations. The boundary conditions for them are set based on the recorded interference pattern. A uniform grid is applied to it. For each node, the order of the interference band to which it belongs is determined. To date, the problem of automating this procedure has not been fully solved. To solve this problem, an algorithm has been developed and programmatically implemented that determines whether a node belongs to a stripe based on the color of the surrounding area. The algorithm is based on testing the statistical hypothesis that the sample belongs to a given distribution according to the Pearson criterion. To do this, the brightness histograms in all three color channels of the band of each order are quantitatively compared with the corresponding histograms constructed for the area in the vicinity of the node under consideration. The application of the method to the data taken at the PPU-7 installation has shown its effectiveness. In particular, the following results were obtained for interference patterns from simple objects (disk, plate). Of the 208 points (nodes of the rectangular grid) for which the interference band was determined, approximately 95% were correctly classified. Moreover, in some cases, there were no incorrectly classified pixels at all. Pixels that were not classified due to the fact that hypotheses about the correspondence of the chromaticity of their neighborhood to the color gamut of any of the bands were rejected accounted for 5-10%.

*Keywords:* automation of the photoelasticity method, pixel classification by color, Pearson method.

*For citation:* Likhachev A. V., Tabanyukhova M. V. Algorithm for classifying pixels of a color interferogram registered in the photoelasticity method [Paper Preparation Manual for Vestnik SibGUTI] // Vestnik SibGUTI, 2025, vol. 19, no. 4, pp. 48-62. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-4-48-62>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Likhachev A. V., Tabanyukhova M. V., 2025

The article was submitted: 21.08.2025;  
revised version: 16.10.2025;  
accepted for publication 17.10.2025.

## References

1. Vest C. *Holographic interferometry*. New York, John Wiley & Sons. 1979. 480 p.
2. De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 1-65. doi: 10.1364/AOP.7.000001.
3. Denisov D. G. Izmerenie parametrov sherokhovatostey shlifovannikh i polirovannikh opticheskikh poverkhnostey s pomoshchyu visokotochnykh metodov lazernoy interferometrii [Measurement of roughness parameters of ground and polished optical surfaces using high-precision laser interferometry methods]. *Uspekhi Prikladnoy Fiziki*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 393–411.
4. Maiorov E. E., Borodyansky Yu. M., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Pushkina V. P., Guliev R. B. Spatial micro-scanning of plane-parallel glass plate surface by the interference method. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol 66, no 8, pp. 688-695. doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.

5. Dvořáková P., Bajgar V., Trnka J. Dynamic electronic speckle pattern interferometry in application to measure out-of-plane displacement. *Engineering Mechanics*, 2007, vol. 14, no. 1-2, pp. 37-44.
6. Efimovich I. S., Zolotukhin I. A. Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry. *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 79–92. doi: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92.
7. Antonov A. A., Bondarenko A. A., Strelnikov I. V., Utkin I. Yu. Increasing sensitivity of laser interferometry method designed to assess residual welding stresses. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, vol. 58, no. 7, pp. 626–631. doi: 10.1134/S1061830922070038.
8. Durelli A. J., Riley W. F. *Introduction to photomechanics: Polarization-optical method*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Publ, 1965. 432 p.
9. Ramesh K. *Digital photoelasticity. Advanced techniques and applications*. Berlin, Springer, 2000. 424 p.
10. Albaut G. N., Matus E. P., Tabanukhova M. V. Investigation of the stress state of dispersed-reinforced beams using the photoelasticity method. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2009, no. 4, pp. 46-49.
11. Mose B. R., Shin D. K., Nam J. H. Experimental stress analysis of spherical roller bearing for high-speed trains using photoelasticity. *Experimental Techniques*. 2023, vol. 47, no 3, pp. 669-678. doi: 10.1007/s40799-022-00576-3.
12. Neverov S. A., Neverov A. A., Konurin A. I., Adylkanova M. A., Orlov D. V. Application of neural networks in rock mass stress assessment by photoelasticity. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2023, no. 6, pp. 176-189. doi: 10.15372/FTPRPI20230616.
13. Frishter L. Yu. Geometrically non-linear plane elasticity problem in the area of 2 an cut out. *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 11, art. 1030. doi: 10.3390/axioms12111030.
14. Hendry A. W., Neal B. G. *Elements of experimental stress analysis: Structures and solid body mechanics division*. New York, Elsevier, 2013. 202 p.
15. Stepanova L. V., Dolgich V. S. Digital processing of the results of optoelectronic measurement. The photoelasticity method and its application for determination of coefficients of the multi-parameter asymptotic Williams expansion of the stress field. *Journal of Samara State Technical University. Physical and Mathematical Sciences*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 717-735. doi: 10.14498/vsgtu1544.
16. Stepanova L. V. Experimental determination and finite element analysis of coefficients of the multi-parameter Williams series expansion in the vicinity of the crack tip in linear elastic materials. Part II // *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 1, pp. 72–85. doi: 10.15593/perm.mech/2021.1.08.
17. Baek T. H., Kim M. S., Hong D. P. Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques. *International Journal of Software Engineering and its Applications*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 91-102. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11.
18. Likhachev A. V., Tabanyukhova M. V. A new processing algorithm for the photoelasticity method data. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Matematika i Mekhanika*, 2022, no. 79, pp. 100-110. doi: 10.17223/19988621/79/9.
19. Likhachev A. V., Tabanyukhova M. V. () Assessing the distance from a given point to the maximum of interference band. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 250-256. doi: 10.3103/S8756699021030109.
20. Kosygin A. N., Kosygina L. N. Digital processing of interferograms obtained by the photoelasticity method. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Estestvennaya Seriya*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 75-91. doi: 10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91.
21. Bykov R. E. Adaptive algorithms of objects detection on color attributes. *Radioengineering*, 2012, no 7, pp. 97-103.
22. Petriyanenko T. M., Chernysheva M. I., Chernyshev D. N. Use a combination of methods based on two-dimensional Fourier and wavelet transforms in the analysis of color images. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science, Medical Instruments Engineering*, 2016, no 3, pp. 13-19.
23. Nosovskii G. V. Geometric encoding of color images. *Moscow University Mathematics Bulletin*, 2018, vol. 73, no. 1, pp. 1-8. doi: 10.3103/S0027132218010011.
24. Raukhvarger A. B., Kiselev A. S. On the application of a locally fragmentary scheme to the transformation of color digital images. *Mathematical Methods in Technologies and Technics*, 2022, no. 9, pp. 102-105. doi: 10.52348/2712-8873\_MMFTT\_2022\_9\_102.

25. Znbanova V. L. Voprosy primeneniya tsifrovoj kolorimetrii v sovremennoj nauchnyh issledovaniyah [Issues of application of digital colorimetry in modern scientific research]. *Svetotekhnika*, 2021, no. 2, pp. 5-14.
26. Umbertov S. V., Pronin S. P. Color image processing algorithm metal surface and depth calculation penetration of corrosion into metal by RGB components. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2022, no. 6, pp. 148-153. doi: 10.25699/SSSB.2022.46.6.015.
27. Zaytseva E. V., Kochneva A. A., Katuntsov E. V., Romakina O. M. Applications of methods based on RETINEX theory in processing color images obtained in mines. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*, 2024, vol. 13, no. 1, pp. 10-17.
28. Tokarev K. E., Lebed N. I. Multiclass recognition of crops by a recurrent deep learning neural network with convolution layers based on high-resolution color aerial photographs. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*, 2024, no. 2, pp. 192-195. doi: 10.55186/25876740\_2024\_67\_2\_192.
29. Likhachev A. V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnoctey i matematicheskuyu statistiku* [Introduction to probability theory and Mathematical Statistics]. Novosibirsk, NSTU Publisher, 2019. 102 p.
30. Tabanukhova M. V. () Investigation of the stress-strain state in beams reinforcing carboplastic layer. *Journal on Composite Mechanics and Design*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 248-254.

**Aleksey V. Likhachev**

Dr. of Sci. (Engineering), Head of the Scientific Group of Computer Science and Applied Mathematics, Institute of Automation and Electrometry SB RAS (IA&E SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Koptyug Avenue, 1); professor of the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86). phone: +7 383 330 8243, e-mail: ipm1@iae.nsk.su, ORCID ID: 0000-0002-4200-5518.

**Marina V. Tabanyukhova**

Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Structural Mechanics, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NSUACE, Russia, 630008, Novosibirsk, Leningradskaya St, 113), phone: +7 383 266 3380, e-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru.