

**ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ 2D ИЗОБРАЖЕНИЙ  
КОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**А.А. Дудкин, В.В. Старовойтов, А.А. Воронов, В.В. Ганченко,  
Е.Е. Марушко, А.В. Инютин, Л.П. Поденок**

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук  
Беларуси, ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Беларусь, [voronov@lsi.bas-net.by](mailto:voronov@lsi.bas-net.by)*

Приведено описание программного обеспечения (ПО) для экспериментального исследования способа анализа разрушенных костных объектов по 2D-данным, описана архитектура ПО, а также результаты анализа разрушений костных объектов. Проведенный анализ на основе оценки информативности позволил выбрать признаки, наиболее подходящие для решения задачи классификации переломов. Результаты будут использованы для судебно-экспертного исследования сложных поверхностей переломов с применением автоматизированной системы анализа цифровых изображений.

**Ключевые слова:** Костные объекты; информативные признаки; текстурные характеристики; локальные бинарные шаблоны.

**SOFTWARE FOR ASSESSING THE INFORMATIVITY  
OF FEATURES IN THE ANALYSIS OF 2D IMAGES OF BONE  
OBJECTS IN FORENSIC EXAMINATION**

**A. Doudkin, V. Starovoitov, A. Voronov, V. Ganchenko,  
E. Marushko, A. Inyutin, L. Podenok**

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences  
of Belarus, 6 Surhanava Street, Minsk 220012, Belarus,  
[voronov@lsi.bas-net.by](mailto:voronov@lsi.bas-net.by)*

This article describes the software implementation of the system for extracting and evaluating information features from 2D images of bone fractures and bone objects for classifying fractures and identifying the alleged instrument that caused the injury. As parameters, the textural characteristics of Haralick, local binary patterns of pixels for 2D images, Gabor filters, Laws energy texture characteristics for 2D images are considered. The analysis carried out on basis of information content estimation to select the features that are most suitable for solving the problem of bone fractures classification. The results will be used for development of methods for complex forensic examination of complex polygonal surfaces of solid objects for automated system for analyzing digital images.

**Keywords:** Bone fracture; bone objects; texture features; local binary patterns.

## Введение

Существуют разные методы исследования костных объектов и переломов [1-2]. Для исследования строения переломов применим оптический метод. Существуют различного рода автоматизированные системы и экспертные системы для классификации переломов по изображениям костных объектов, однако они обладают определенными недостатками и как правило импортные. Предлагается программная система для выделения информативных признаков по фотографиям переломов костных объектов, что полезно для классификации перелома и идентификации предполагаемого орудия, которым нанесена травма. В предлагаемой системе используется один из подходов к оценке поверхности перелома - выделение информативных признаков.

### 1. Структура системы

В общем виде разработанную систему можно описать как совокупность следующих подсистем:

- графического интерфейса пользователя, которая используется для отображения данных и взаимодействия с пользователем (ГИП);
- хранения данных, которая выполняет взаимодействие с базой данных (БД) и файловой системой, обеспечивая чтение и запись данных (ПХД);
- обработки и анализа, которая получает от подсистемы хранения данных указанные пользователем данные, осуществляет их обработку и анализ, после чего сохраняет результат, обращаясь к подсистеме хранения (ПОА).

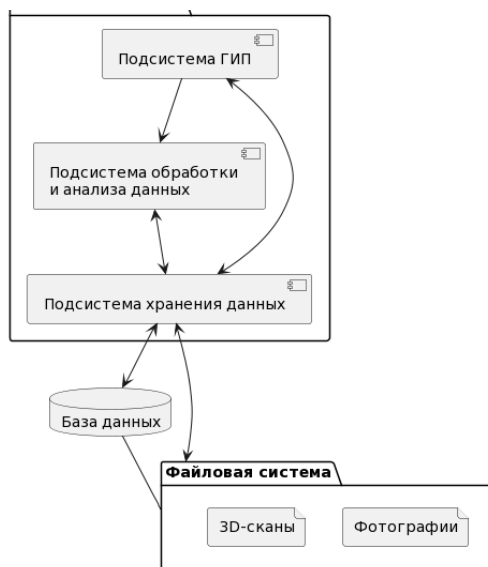


Рисунок 1 – Архитектура системы

Все загруженные в систему файлы (фотографии и 3D-сканы), хранятся в виде файлов на файловой системе. Информация о загруженных в систему данных и их взаимосвязях хранится в виде записей в базе данных (БД).

## 2. Описание работы системы

Обрабатываемые данные связываются в один объект «Набор данных», который содержит описание добавленных данных, несколько изображений и/или 3D-сканов, результатов их обработки. В общем виде работа системы может быть представлена в виде диаграммы последовательности, приведенной на рисунке 2.

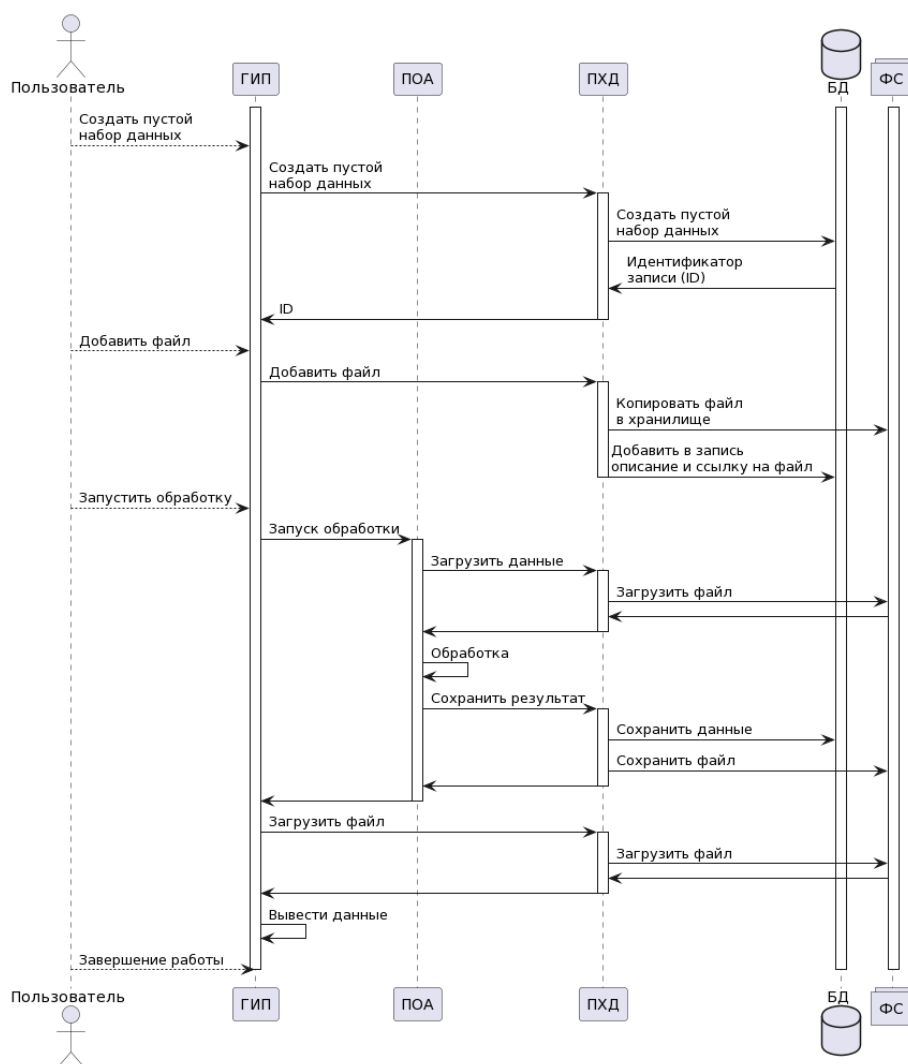


Рисунок 2 – Диаграмма последовательности работы системы

Пользователь, работая с системой, всегда работает с набором данных, каждый из которых имеет свой уникальный идентификатор (ID), описание набора данных (название, время создания, время последнего об-

новления, текстовое описание и т.п.), а также связанные 2D и 3D данные. Модули системы используют этот ID для конкретизации запроса. Пере-сылка больших объемов данных (изображение, 3D-скан) осуществляется только между модулем, требующим этой операции, как правило, модули из подсистемы обработки и анализа данных, и подсистемой хранения данных.

### **3. Анализ 2D изображений костных объектов**

В подсистеме обработки и анализа данных содержится реализация алгоритма анализа 2D изображений костных объектов. Для этого реализованы все необходимые функции.

С исходными фотоизображениями, зарегистрированными фотокамерой с разным разрешением, осуществили предварительную подготовку и вырезали прямоугольные фрагменты, содержащие 100% области интереса без фона.

Все имеющиеся исходные изображения были разделены на две группы. Первая группа для анализа была сформирована таким образом, что включала кроме непосредственно фотографий переломов также неповрежденные фрагменты кости черепа.

Во второй группе с фотографиями повреждений черепа согласно классификации основных следообразующих частей твердых тупых предметов (орудия травмы костей свода черепа) были выделены шесть классов повреждений: плоская ограниченная поверхность (прямоугольной, продолговатой или треугольной формы), плоская ограниченная поверхность круглой формы, плоская преобладающая поверхность, цилиндрическая поверхность, сферическая поверхность, предметы с ребром или двугранным углом.

### **4. Исследование информативности текстурных признаков для первой группы изображений**

Были детально исследованы следующие группы текстурных признаков на предмет различения повреждений костей из первой группы: фильтры Габора [3]; энергетические текстурные характеристики Лавса [4]; 13 признаков Харалика на базе матриц смежности значений яркости [5]; локальные бинарные шаблоны пикселей (LBP) [6].

Использовались следующие варианты признаков LBP: радиус = 3, количество шаблонов = 24; радиус = 5, количество шаблонов = 40; радиус = 7, количество шаблонов = 56.

Имя LBP признака содержит его параметры:  $lbp\_r<радиус>\_h<индекс\_шаблона>$ . После вычисления признаков в каждом пикселе формируется гистограмма их значений. Эта гистограмма и

рассматривается как набор признаков. Всего вычислялось 26 значений гистограммы LBP радиуса 3; 42 значений гистограммы LBP радиуса 5; 58 значений гистограммы LBP радиуса 7. Всего исследовалось 139 признаков. Фильтры Габора применялись со следующими параметрами: размеры ядра фильтров – 15, 21, 31; углы поворота в градусах – 0, 22, 24, 67, 90, 112, 135, 157.

Имя фильтра описывает его параметры:  $ks\_<размер\ ядра>\_th\_<угол\ поворота>$ . В качестве оценки используется среднее значение матрицы, полученной при фильтрации изображения.

Использовались следующие энергетические текстурные характеристики Лавса:  $L_N L_N$ ,  $E_N E_N$ ,  $S_N S_N$ ,  $L_N E_N$ ,  $E_N S_N$ ,  $L_N S_N$ , где  $N$  – размеры базового вектора, которые могут принимать значения из диапазона [3, 5, 7]. В качестве оценки, также, как и для фильтров Габора, используется среднее значение матрицы, полученной при фильтрации изображения.

Всего исследовался 181 текстурный признак. Оценка информативности признаков выполнялась на основе статистических процедур ANOVA (ANalysis Of VAriance), на базе F-статистики [7], рекурсивного исключения признаков (Recursive feature elimination, RFE) [8] на основе L1 нормы (Linear Support Vector Machine, SVM) [9]. Кроме этого использовались классификаторы: ансамбль деревьев, который строит ряд рандомизированных деревьев решений [10], и случайный лес [11]. Выделялись лучшие оценки, найденные каждым методом в отдельности и по сумме нормализованных значений всех признаков (рисунки 3–4, таблицы 1–2).

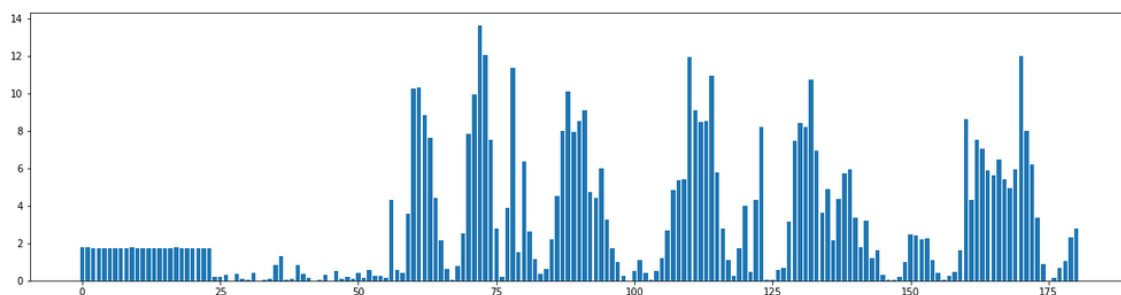


Рисунок 3 – Суммарные нормализованные оценки информативности всех признаков

Модель ExtraTrees (Extremely Randomized Trees) реализует ансамбль деревьев, который соответствует ряд рандомизированных деревьев решений на различных подвыборках набора данных, и использует усреднение для повышения точности прогнозов и контроля переобучения. ExtraTrees на каждом уровне дерева выбирает разделение признаков случайным образом.

Метод построения случайного леса реализует набор случайно построенных деревьев решений. Случайный лес на каждом уровне дерева выбирает разделение признаков на основании критерия Gini.

В двух последних методах строилось по 1000 деревьев. На исследуемых данных оба метода выделили 55 признаков, но их значимость несколько отличалась, что показано в таблице 1.

Таблица 1 – Двадцать наиболее информативных признаков для идентификации повреждений поверхности и переломов костей

| №  | Признак    | Суммарная оценка |
|----|------------|------------------|
| 1  | lbp_r3_h6  | 0.026883         |
| 2  | lbp_r5_h7  | 0.026713         |
| 3  | lbp_r3_h5  | 0.023050         |
| 4  | lbp_r7_h0  | 0.020107         |
| 5  | lbp_r5_h29 | 0.020078         |
| 6  | lbp_r3_h17 | 0.019377         |
| 7  | lbp_r7_h9  | 0.018229         |
| 8  | lbp_r7_h7  | 0.017201         |
| 9  | lbp_r5_h30 | 0.016604         |
| 10 | lbp_r3_h18 | 0.015955         |
| 11 | lbp_r5_h6  | 0.015771         |
| 12 | lbp_r7_h29 | 0.014985         |
| 13 | lbp_r7_h27 | 0.014879         |
| 14 | lbp_r7_h8  | 0.014655         |
| 15 | lbp_r3_h23 | 0.014529         |
| 16 | lbp_r3_h4  | 0.013667         |
| 17 | lbp_r7_h31 | 0.013111         |
| 18 | lbp_r7_h6  | 0.013103         |
| 19 | lbp_r3_h19 | 0.013058         |
| 20 | lbp_r7_h28 | 0.012983         |

В таблице 2 и на рисунке 4 представлены результаты выбора наиболее информативных признаков для повреждений поверхности и переломов костей. На исследованном наборе из 27 изображений 13 костных объектов наиболее информативными оказались признаки типа LBP с разными радиусами.

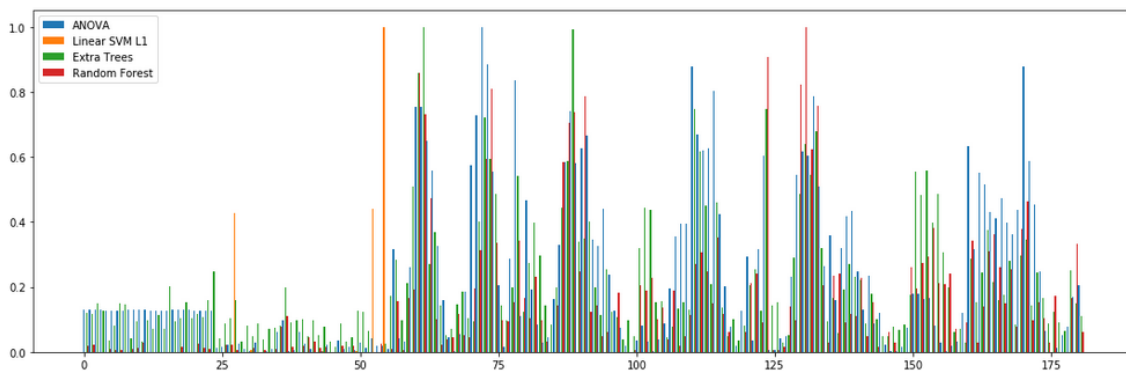


Рисунок 4 – Суммарные нормализованные оценки информативности всех признаков переломов кости

Таблица 2 – Наиболее информативные признаки, выделенные шестью методами

| ANOVA      |        | RFE         |   | LinearSVC L1 |               | ExtraTrees |        | Случайный лес |        | Комбинированная оценка |        |
|------------|--------|-------------|---|--------------|---------------|------------|--------|---------------|--------|------------------------|--------|
| Признак    | Оценка | Признак     |   | Признак      | Коэфф. модели | Признак    | Оценка | Признак       | Оценка | Признак                | Оценка |
| lbp_r3_h17 | 13.64  | ks_21_th_22 | - | L7E7         | 0.0010        | lbp_r3_h5  | 0.028  | lbp_r7_h7     | 0.037  | lbp_r5_h7              | 2.47   |
| lbp_r3_h18 | 12.06  | ks_31_th_22 | - | Variance     | -0.0010       | lbp_r3_h6  | 0.028  | lbp_r7_h0     | 0.034  | lbp_r3_h5              | 2.37   |
| lbp_r7_h47 | 11.98  | Contrast    | - | L7S7         | -0.0023       | lbp_r5_h7  | 0.024  | lbp_r3_h5     | 0.032  | lbp_r3_h18             | 2.33   |
| lbp_r5_h29 | 11.97  | S3S3        | - | -            | -             | lbp_r3_h18 | 0.019  | lbp_r7_h6     | 0.031  | lbp_r7_h9              | 2.26   |
| lbp_r3_h23 | 11.39  | E3S3        | - | -            | -             | lbp_r3_h17 | 0.018  | lbp_r3_h18    | 0.030  | lbp_r3_h6              | 2.23   |
| lbp_r5_h33 | 10.96  | L3S3        | - | -            | -             | lbp_r7_h0  | 0.017  | lbp_r5_h9     | 0.029  | lbp_r7_h7              | 2.22   |
| lbp_r7_h9  | 10.72  | S5S5        | - | -            | -             | lbp_r7_h31 | 0.016  | lbp_r7_h9     | 0.028  | lbp_r3_h17             | 2.20   |
| lbp_r3_h6  | 10.29  | E5S5        | - | -            | -             | lbp_r3_h23 | 0.015  | lbp_r5_h7     | 0.027  | lbp_r7_h0              | 2.10   |
| lbp_r3_h5  | 10.26  | E7E7        | - | -            | -             | lbp_r7_h47 | 0.015  | lbp_r3_h6     | 0.027  | lbp_r5_h9              | 2.04   |
| lbp_r5_h7  | 10.09  | E7S7        | - | -            | -             | lbp_r5_h6  | 0.015  | lbp_r5_h6     | 0.026  | lbp_r7_h6              | 1.85   |

## 5. Исследование информативности текстурных признаков для второй группы изображений

Всего исследовался 181 признак с использованием инструментов, описанных выше, но для второй группы изображений. В таблице 3 и на рисунке 5 представлены результаты выбора наиболее информативных признаков для повреждений этой группы.

На исследованном наборе из 45 изображений 6 костных объектов наиболее информативными оказались признаки типа LBP с разными радиусами и текстурная характеристика Харалика Correlation.

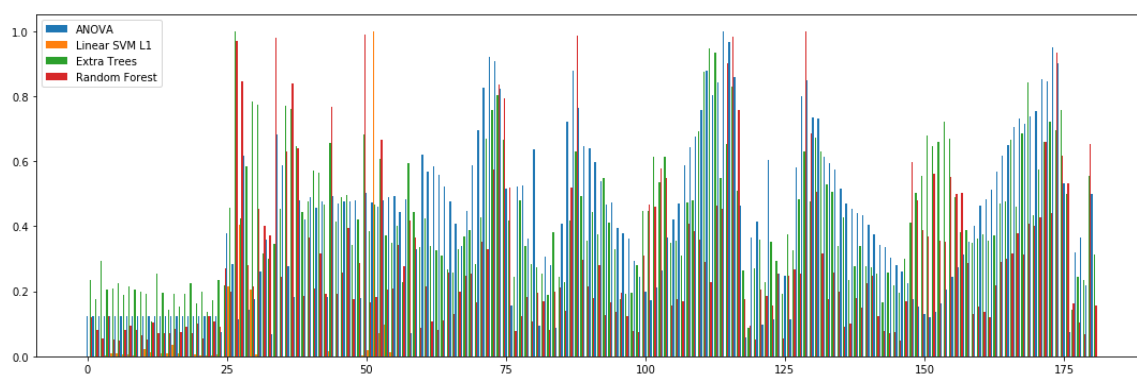


Рисунок 5 – Суммарные нормализованные оценки информативности всех признаков поверхности и переломов кости

Таблица 3 – Наиболее информативные признаки, выделенные шестью методами для второй группы

| ANOVA      |        | RFE          |   | LinearSVC L1 |              | ExtraTrees         |        | Случайный лес      |        | Комбинированная оценка |        |
|------------|--------|--------------|---|--------------|--------------|--------------------|--------|--------------------|--------|------------------------|--------|
| Признак    | Оценка | Признак      |   | Признак      | Коэф. модели | Признак            | Оценка | Признак            | Оценка | Признак                | Оценка |
| lbp_r5_h33 | 24,57  | ks_21_th_157 | - | L7E7         | 0.0040       | Correlation        | 0,013  | lbp_r7_h5          | 0,0185 | lbp_r5_h34             | 2,78   |
| lbp_r5_h34 | 23,73  | ks_31_th_157 | - | L5L5         | 0.0009       | lbp_r5_h30         | 0,013  | L7L7               | 0,0183 | lbp_r7_h50             | 2,58   |
| lbp_r7_h50 | 23,38  | Contrast     | - | L7S7         | 0.0007       | lbp_r5_h31         | 0,012  | lbp_r5_h6          | 0,0182 | lbp_r5_h33             | 2,55   |
| lbp_r3_h17 | 22,63  | SumAverage   | - | L7L7         | 0.0006       | lbp_r5_h29         | 0,012  | lbp_r5_h34         | 0,0181 | lbp_r3_h18             | 2,55   |
| lbp_r3_h18 | 22,33  | S5S5         | - | -            | -            | lbp_r7_h45         | 0,011  | DifferenceVariance | 0,0181 | lbp_r5_h6              | 2,50   |
| lbp_r7_h51 | 22,18  | L5S5         | - | -            | -            | lbp_r5_h34         | 0,011  | Correlation        | 0,0179 | lbp_r7_h5              | 2,43   |
| lbp_r5_h6  | 21,59  | E7E7         | - | -            | -            | lbp_r3_h18         | 0,011  | lbp_r7_h50         | 0,0173 | lbp_r3_h19             | 2,28   |
| lbp_r5_h30 | 21,55  | S7S7         | - | -            | -            | SumAverage         | 0,010  | lbp_r5_h33         | 0,0166 | lbp_r7_h51             | 2,28   |
| lbp_r5_h35 | 21,08  | E7S7         | - | -            | -            | SumVariance        | 0,010  | Variance           | 0,0156 | lbp_r3_h17             | 2,25   |
| lbp_r7_h48 | 20,91  | L7S7         | - | -            | -            | MeasOfCorrelation1 | 0,010  | MeasOfCorrelation2 | 0,0155 | Correlation            | 2,25   |

## Заключение

Разработано программное обеспечение для экспериментального исследования и оценки информативности параметров поверхностей переломов костей по 2D-данным для классификации переломов. В качестве параметров рассмотрены текстурные характеристики Харалика, локальные бинарные образцы. Для анализа повреждений костной ткани по фотографиям реализован выбор наиболее информативных признаков. По результатам экспериментов наиболее информативными оказались признаки типа LBP с разными радиусами и текстурная характеристика Харалика Correlation. Отобранные признаки позволяют выполнять классификацию и количественную оценку повреждений костных объектов по их фотоизображениям.

## Библиографические ссылки

1. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 3. С. 11–24.
2. Разрушение. Т. 1: Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1973. 620 с.

3. Feichtinger, Hans G. Gabor analysis and algorithms : theory and applications./ Feichtinger, Hans G. and Thomas Strohmer. Boston: Birkhäuser, 1998. 496 p.
4. Laws, K. Rapid texture identification / Kenneth I. Laws // Proc. SPIE 0238. Image Processing for Missile Guidance. 1980. San Diego, USA. Vol. 238. P. 376–381.
5. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification // IEEE Trans. on systems, man, and cybernetics, 1973. № 6. P. 610–621.
6. Ojala T., Pietikainen M., Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002. Vol. 24. № 7. P. 971–987.
7. Наследов Д. Математические методы психологического исследования. СПб.: Речь, 2008. 172 с.
8. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / Kuhn Max and Kjell Johnson. New York, NY: Springer. 2018. 600 P.
9. Ben-Hur, Asa; Horn, David; Siegelmann, Hava; Vapnik, Vladimir N. "Support vector clustering" // Journal of Machine Learning Research. 2001. № 2. P. 125–137.
10. Geurts P., Ernst D. and Wehenkel L. Extremely randomized trees // Machine Learning. 2006. Vol.63. P.3–42.
11. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32.