

УДК 004.01:204

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЛУЧАЙНЫХ МАРКОВСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТУР ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

МЕРКУЛОВА Е. В.^{1*}, к. т. н., доц.,

ЗАПОРОЖЕЦ Е. В.^{2*}, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра прикладной математики и информатики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: kate.don11@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6347-5191

^{2*} Кафедра прикладной математики и информатики, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: Lena_ne@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5913-1310

Аннотация. Постановка проблемы. Черные металлы являются основным материалом, который используют в различных отраслях промышленности: в машиностроении, авиастроении и судостроении для изготовления металлоконструкций для промышленного и жилищного строительства, транспортных коммуникаций и техники.

Металлургические заводы Украины предоставляют свою продукцию не только в страны СНГ, но и за рубеж. При этом продукция должна быть качественной, чтобы не потерять клиентов и сохранить свою конкурентоспособность на мировом рынке. Поэтому задача получения комплекса свойств того или иного металла становится еще более актуальной, так как позволяет найти равноценный отечественный заменитель иностранным маркам стали как по составу, так и по свойствам. Одним из самых важных аспектов решения данной задачи является контроль качества выпускаемой продукции. Создание автоматизированной системы металлографического анализа срезов сплавов на основе обработки их изображений является актуальной задачей.

Ключевые слова: марковские поля, текстурные изображения металлов, обработка изображений

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВИПАДКОВИХ МАРКОВСЬКИХ ПОЛІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕКСТУР ЗОБРАЖЕНЬ МЕТАЛОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ

МЕРКУЛОВА К. В.^{1*}, к. т. н., доц.,

ЗАПОРОЖЕЦЬ О. В.^{2*}, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра прикладної математики, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: kate.don11@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6347-5191

^{2*} Кафедра прикладної математики, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: Lena_ne@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5913-1310

Анотація. Постановка проблеми. Чорні метали - основний матеріал, який використовують у різноманітних галузях промисловості, в машино-, авіа- та суднобудуванні, у виготовленні металлоконструкцій для промислового та житлового будівництва, транспортних комунікацій та техніки.

Металургійні заводи України постачають свою продукцію не тільки до країн СНД, а й за кордон. При цьому продукція повинна бути якісною, аби не втратити клієнтів і зберегти свою конкурентоспроможність на світовому ринку. Тому завдання отримання комплексу властивостей металу актуальне і дозволить знайти рівнозначний замітник іноземним маркам сталі як за складом, так і за якість. Одним із найважливіх аспектів виконання такого завдання є контроль якості продукції. Створення автоматизованої системи металлографічного аналізу зрізів сплавів на основі опрацювання їх зображень - актуальне завдання.

Ключові слова: марковські поля, текстурні зображення металів, опрацювання зображень

APPLICATION OF THE CASUAL MARKOV FIELDS METHOD FOR RECOGNITION OF IMAGES TEXTURES IN THE METALGRAPHIC ANALYSIS

MERKULOVA E. V.^{1*}, Ph. D.,

ZAPOROZHETS E. V.^{2*}, Ph. D.

^{1*} Associate Professor of Applied Mathematics Department, State Higher Educational Institution «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: kate.don11@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6347-5191

^{2*} Associate Professor of Applied Mathematics Department, State Higher Educational Institution «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, e-mail: Lena_ne@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5913-1310

Summary. Statement of a problem. Ferrous metals are the main material which use in various industries: in mechanical engineering, aircraft industry and shipbuilding, for production of a metalwork for industrial and housing construction, transport communications and equipment.

Steel works of Ukraine provide the production not only to the countries of the former UIS, but also abroad. Thus production has to be qualitative not to lose clients and to keep the competitiveness in the world market. Therefore the problem of receiving a complex of properties of this or that metal becomes even more actual as allows to find equivalent domestic substitute to foreign brands of steel both on structure, and on properties. One of the most important aspects of the solution of this task is quality control of products. Creation of the automated system of the metalgraphic analysis of cuts of alloys on the basis of processing of their images is an actual task.

Key words: *Markov fields, textural images of metals, processing of images*

Постановка задач исследования. Для построения системы металлографического анализа срезов стали необходимо решить следующие основные задачи:

- выполнить анализ производственного цикла выплавки стали и проанализировать процесс контроля качества выпускаемой металлургической продукции;
- выделить основные этапы металлографического анализа и проанализировать основной из них – этап определения размера зерна стали;
- определить наиболее оптимальные методы распознавания текстуры металлографического изображения среза;
- выбрать наиболее оптимальные методы определения размера зерна стали.

Решение задач и результаты исследования. Процесс выплавки стали начинается с заказа сплава и заканчивается проверкой готовой продукции. Этот процесс включает следующие основные этапы:

1. Оформление предварительного заказа на необходимую марку стали и с соответствующих требований к ней. Передача основных требований к продукции в технический отдел.
2. Отдел договорной документации составляет договор с заказчиком. Параллельно составляется спецификация на выплавку заказа, где указываются все требования к продукции.
3. Далее спецификация передается в цех на выплавку заказа. После выплавки отбираются образцы продукции для контроля на соответствие спецификации, кото-

рые передаются в центральную контрольную лабораторию.

4. Результаты анализа формируются в виде протокола испытаний, который передается в цех производства и отгрузки готовой продукции. Сертификатчики цеха вносят данные из протокола испытаний в сертификат качества.
5. Далее лаборатория вносит данные анализа в статистическую базу.

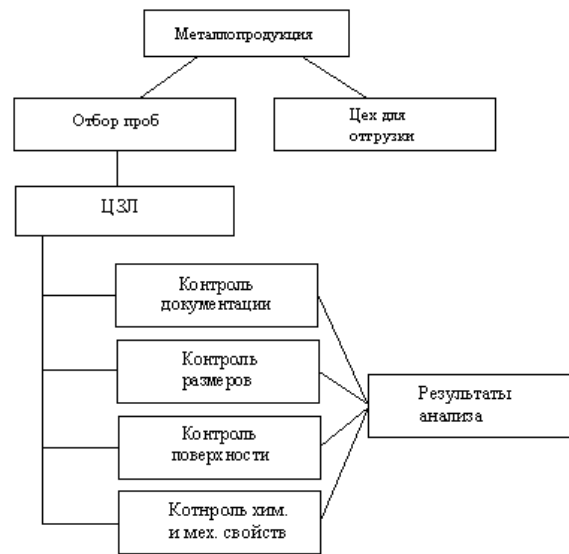


Рис. 1. Типовая схема организации металлографического анализа

Контроль качества выпускаемой продукции еще называется металлографическим анализом, который включает в себя несколько этапов. Среди них можно выделить контроль документации на продукцию (спецификация, сертификат и т. д.), отбор проб для анализа, определение химических, механических, геометрических параметров

пробных срезов. Состав анализа, перечень основных его этапов и их последовательность представлены на рисунке 1.

Рассмотрим более детально последовательность проведения металлографического анализа. Основным этапом такого исследования является металлография – она позволяет получить информацию о морфологии элементов структуры. Этапы металлографии:

1. Электронная микроскопия. Для исследования металлов применяется обычно сканирующий электронный микроскоп, в котором пучок электронов с помощью системы развертки сканирует поверхность образца.

2. Микромеханические испытания. Основной характеристикой металлов и сплавов являются их механические свойства, т. е. способность выдерживать нагрузки и деформироваться. Разработано большое количество стандартных методов механических испытаний.

3. Выявление и определение величины зерна сплава. На этом этапе определяются:

- величина действительного зерна после горячей деформации или любой термической обработки;

- склонность зерна к росту – определение величины зерна после нагрева при температуре и времени выдержки, установленных нормативно-технической документацией на стали и сплавы;

- кинетика роста зерна – определение величины зерна после нагрева в интервале температур и времени выдержки, установленных нормативно-технической документацией на стали и сплавы.

Остановимся на этапе определения роста зерна. Любой метод этого этапа основывается на анализе микрофотографии среза пробы контролируемой продукции. Следовательно, прежде чем выполнять анализ фотографии, необходимо распознать текстуру изображения.

Текстуры являются важной характеристикой изображений естественных объектов и важным элементом зрительного восприятия. Машинному анализу текстурных изображений посвящено значительное количе-

ство исследований, существенную часть которых занимает проблема сегментации изображений по текстурным признакам.

Для распознавания текстур металлографических изображений наиболее предпочтительно применение метода случайных марковских полей.

Марковские модели являются мощным средством моделирования распознавания образов. По своей природе марковские модели позволяют учитывать непосредственно пространственно-временные характеристики сигналов, поэтому они получили широкое применение в распознавании изображений.

Введем основные понятия, необходимые для рассмотрения данного метода:

Поле зрения – это произвольное конечное множество. Обозначается символом T . Наиболее часто встречается поле зрения в виде прямоугольного участка двумерной целочисленной решетки:

$$\{(i, j) \mid 0 \leq i < I, 0 \leq j < J\}$$

Пиксель – элемент поля зрения. Элементами поля зрения являются натуральные числа $T = \{1, 2, \dots, m\}$.

Палитра – произвольное конечное множество, как и поле зрения. Обозначается символом $X = \{1, 2, \dots, n\}$.

Цвет – это элементы палитры.

Изображение на поле зрения T с палитрой X – это функция $x_T: T \rightarrow X$, которая каждому пикселю поля зрения ставит в соответствие какой-то цвет из палитры. Сужение этой функции на подмножество поля зрения $\tau \subset T$ обозначается x_τ , а значение функции x_T в пикселе $t \in T$ обозначим как x_t .

Разметка поля зрения T на l сегментов – это функция $k_T: T = \{1, 2, \dots, l\}$

При этом множество $\{1, 2, \dots, l\}$ называется множеством меток и обозначается символом K .

Если на множестве всех изображений $X^T = \{x_T \mid x_T: T \rightarrow X\}$ задана случайная величина N , то эту случайную величину называют случайным полем.

Марковскими называются все случайные поля, распределение вероятностей которых имеет следующий вид:

$$p(x_T) = z \cdot \exp \sum_{t \in T} \varphi_t(x_t) \quad (1)$$

$$z = \frac{1}{\sum_{x_t \in X^T} \exp \sum_{\tau \in T} \varphi_{\tau}(x_{\tau})} \quad (2)$$

\mathfrak{S} - структура поля зрєня;

φ_{τ} - функції, зависящие от переменных $x_{\tau} = \{x_t | t \in \tau\}$.

В этом методе структурная сегментация изображений рассматривается как частный случай генерирования Марковских случайных полей. При этом цвет каждого пикселя состоит из двух компонент – цвета и метки. При этом неявно предполагается, что структура поля зрєня для различных текстур совпадает.

Преимущество модели состоит в том, что разметка и каждая текстура характеризуются своими марковскими случайными полями, не зависящими друг от друга. Это позволяет легко модифицировать распознающую систему. Введение новой текстуры или удаление существующей происходит в рамках модели очень просто. Кроме того, в данной модели легко учитываются априорные знания о разметке.

Каждая модель $\lambda = (A, B, \pi)$ представляет собой набор N состояний $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, между которыми возможны переходы. В каждый момент времени система находится в строго определенном состоянии. В наиболее распространенных марковских моделях первого порядка полагается, что следующее состояние зависит только от текущего состояния.

При переходе в каждое состояние генерируется наблюдаемый символ, который соответствует физическому сигналу с выхода моделируемой системы. Набор символов для каждого состояния – $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$, количество символов – M . Выход, генерируемый моделью, может быть также непрерывным. Существуют также модели, в которых набор символов для всех состояний одинаков. Символ в состоянии $q_t = S_j$ в момент времени t генерируются с вероятностью

$$b_j(k) = P[v_{k,t} | q_t = S_j] \quad (3)$$

Набор таких вероятностей составляет матрицу $B = \{b_j(k)\}$.

Матрица $A = \{a_{ij}\}$ определяет вероятность перехода из одного состояния в другое состояние:

$$a_{ij} = P[q_{t+1} = S_j | q_t = S_i], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (4)$$

Считается, что A не зависит от времени. Если из каждого состояния можно достичь любого другого за один переход, то все $a_{ij} > 0$, и модель называется эргодической. Модель имеет также вероятность начальных состояний $\pi = \pi_i$, где $\pi_i = P[q_1 = S_i]$.

Обычно в реальных процессах последовательность состояний является скрытой от наблюдений и остается неизвестной, а известен только выход системы, последовательность наблюдаемых символов $O = O_1 O_2 \dots O_T$.

В распознавании образов скрытые марковские модели применяются следующим образом. Каждому классу i соответствует своя модель λ_i . Распознаваемый образ представляется в виде последовательности наблюдений O . Затем для каждой модели вычисляется вероятность того, что эта последовательность могла быть сгенерирована именно этой моделью. Модель λ_i , получившая наибольшую вероятность, считается наиболее подходящей и образ относится к классу j .

Имея последовательность наблюдений $O = O_1 O_2 \dots O_T$ и настроенную модель $\lambda = (A, B, \pi)$, оценка вероятности $P[O | \lambda]$ генерации этой моделью – это и есть задача распознавания.

$$P[O | \lambda] = \prod_{t=1}^T b_{q_t}(O_t). \quad (5)$$

Задача объяснения состоит в подборке последовательности состояний $Q = q_1 q_2 \dots q_T$, чтобы она была оптимальной, имея последовательность наблюдений $O = O_1 O_2 \dots O_T$ и настроенную модель $\lambda = (A, B, \pi)$. Задача обучения заключается в способе корректировки параметров модели λ для того, чтобы максимизировать вероятность $P[O | \lambda]$.

Первая задача имеет точное аналитическое решение, называемое процедурой прямого-обратного прохода. Две остальные задачи не имеют точного аналитического решения. Для решения второй задачи используется алгоритм Витерби, для третьей

задачи – алгоритм Баума-Вельча. Оба эти метода являются разновидностью градиентного спуска и решаются оптимизационными методами.

На обучающем наборе каждая модель реагирует на изображения-примеры с некоторой вероятностью. Отсортированные таким образом модели образуют исходное ранжирование. Для неизвестного изображения модели также ранжируются по вероятностям отклика на неизвестное изображение. Большая величина отклонения полученного ранжирования от исходного сигнализирует о том, что изображение принадлежит к неизвестному классу.

В ходе работы было выяснено, что на металлургических предприятиях Донбасса для определения размера зерна применяется только один метод из четырех основных, описанных в ГОСТе 5639-82. Это метод визуального сравнения с эталонами шкал. Величину зерна определяют визуально при увеличении 100х. После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных мест и сравнивают их с эталонами.

Этот метод не только не обладает достаточной точностью результата, но и значительно усложняет процесс всего металлографического анализа.

Существуют методы, комплексное применение которых позволяет свести погрешности анализа до минимума. Среди них:

1. Метод подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна. Этот метод заключается в определении количества зерен на единице поверхности шлифа (1 мм^2) и расчете средней площади и среднего диаметра зерна. Подсчет зерен проводится на микрофотографии в поле зрения, ограниченном окружностью диаметром 79,8 мм, что соответствует $0,5 \text{ мм}^2$ поверхности шлифа при увеличении 100х.

Зависимость средней площади сечения зерна от номера зерна приведена на рисунке 2. Зависимость числа зерен на площади 1 мм^2 от номера зерна приведена на рисунке 3. Зависимость среднего диаметра зерна от номера зерна приведена на рисунке 4.

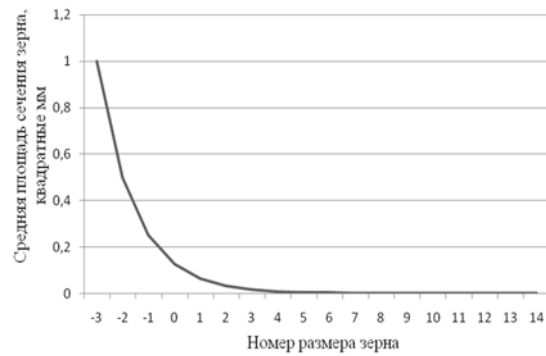


Рис. 2. Зависимость средней площади сечения зерна от его номера

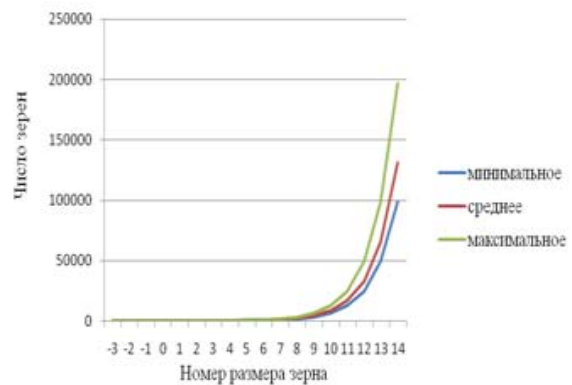


Рис. 3. Зависимость числа зерен на площади 1 мм^2 от номера зерна

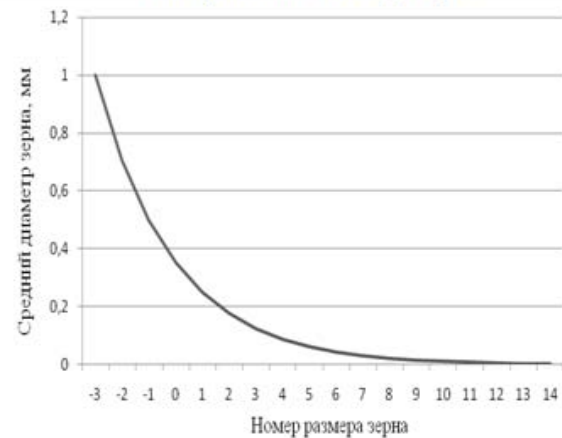


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра зерна от его номера

2. Метод подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра в случае равноосных зерен, количества зерен в 1 мм^2 в случае неравноосных зерен. Метод состоит в подсчете зерен, пересеченных отрезком прямой, и определении среднего условного диаметра (в случае равноосных зерен) или количества зерен в 1 мм^2 (в случае неравноосных зерен). Подсчет пересечений в обоих случаях производится на микрофотографи-

ях, на которых проводят несколько отрезков произвольной длины. Длину отрезков выбирают с таким расчетом, чтобы каждый из них пересекал не менее 10 зерен, при этом увеличение подбирают так, чтобы на исследуемой поверхности было не менее 50 зерен. Подсчитываются точки пересечений отрезков прямых линий с границами зерен. Зерна на концах прямой, не пересеченные ею целиком, принимают за одно зерно.

Зависимость среднего числа пересеченных зерен от номера размера зерна показана на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость среднего числа пересеченных зерен от номера размера зерна

3. Метод измерения длин хорд с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера. Метод основан на замере линейных размеров отрезков – хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разноразмерной структуре. Замер длин хорд проводится на микрофотографии. При этом 100 мм при увеличении $\times 100$ соответствует длине 0,8 мм или 1 мм на шлифе. Замер проводят не менее чем в пяти наиболее типичных полях зрения, при этом в каждом поле зрения про-

водят не менее трех прямых в произвольных направлениях. Значения длин хорд относят к определенной размерной группе.

Выводы. При анализе изображений важной их характеристикой служит текстура, которая присутствует во всех изображениях. Но, несмотря на это, концепция текстуры не очень хорошо определяется и понимается даже сегодня.

Метод распознавания изображений был выбран на основе следующих преимуществ:

- математическая структура скрытых марковских моделей очень богата и позволяет решать математические проблемы различных областей науки;

- грамотно спроектированная марковская модель дает на практике хорошие результаты работы;

- преимущество модели состоит в том, что разметка и каждая текстура характеризуется своими марковскими случайными полями, не зависящими друг от друга. Это позволяет легко модифицировать распознающую систему.

Наиболее важной проблемой в анализе и классификации изображения на сегодняшний день является классификация текстур, которые расположены под различными углами и в разном масштабе. Эту проблему предложено решить с помощью разновидностей марковских моделей.

Также в статье обосновывается необходимость разработки данной автоматизированной системы, несмотря на существование программных пакетов, которые решают проблему распознавания металлографических изображений.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулова Е. В. Методы обработки изображений УЗИ в специализированной компьютерной системе «ЭКО» / Меркулова Е. В., Панкова А. В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Обчислювальна техніка та автоматизація : всеукр. наук. зб. – Донецьк, 2008. – Вип. 14(129). – С. 132-139.
2. Меркулова Е. В. Создание алгоритмов построения трехмерной воксельной модели на основании результатов СКТ / Меркулова Е. В., Адамов В. Г., Кондратов В. И. // Сборник научных трудов Sworld / гл. ред. Куприенко С. В. – Иваново, 2015. – Вып. 1, т. 2. – С. 72-79. – (Международное научное издание).
3. Петюшко А. А. О марковских случайных полях и их связи с цепями Маркова / Петюшко А. А. // Интеллектуальные системы. – 2010. – Том 14, № 1-4. – С. 225-236.
4. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учеб. / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с. – (Учебники НГТУ).
5. Пластинин А. И. Модель марковского случайного поля в задачах синтеза и анализа текстурных изображений /

- Пластинин А. И., Куприянов А. В. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – № 2(15). – С 252-256.
6. Пластинин А. И. Обнаружение текстурных неоднородностей на микромасштабных изображениях материалов / Пластинин А. И., Храмов А. Г., Сойфер В. А. // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 158-165.
 7. Pratt W. K. *Introduction to Digital Image Processing* / W. K. Pratt. – Hoboken : CRC Press, 2013. – 750 p.
 8. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна : ГОСТ 5639–82. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Гос. стандарт СССР, 1982. – 38 с.– Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>.
 9. Сегментация изображения // *Bo_bda*. – 2011. – 24 сентября. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/128768/>.
 10. Оператор Кэнни // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Кэнни.
 11. Kindermann R. *Markov random fields and their applications* / Ross Kindermann, J. Laurie Snell. – United States : American Mathematical Society, 1980. – 142 p. – (Contemporary Mathematics. Vol. 1).
 12. Moussouris J. *Gibbs and markov random systems with constraints* / Moussouris John // *Journal of Statistical Physics*. – 1974. – Vol. 10, № 1. –С. 11-33.
 13. Rue H. *Gaussian markov random fields: theory and applications* / H. Rue, L. Held. – 1st ed. – Boca Raton ; London ; New York ; Singapore : CRC Press, 2005. – 263 p. – (Monographs on Statistics & Applied Probability. 104).

REFERENCES

1. Merkulova E.V. and Pankova A.V. *Metody obrabotki izobrazheniy UZI v spetsializirovannoy komp'yuternoy sisteme «EKO»* [Methods of processing of imaging USE in a specialized computer system "ECO"]. *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Obchislivvalna tekhnika ta avtomatizatsiya* [Proceedings of DNTU. Series: Computing technics and automatization]. Donetsk, 2008, iss. 14(129), pp. 132-139. (in Russia).
2. Merkulova E.V., Adamov V.G. and Kondratov V.I. *Sozdanie algoritmov postroeniya trekhmernoy voksel'noy modeli na osnovanii rezul'tatov SKT* [Creation of algorithms of construction of a three-dimensional voxel model based on the results of SCT]. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld* [Collection of scientific papers Sworld]. Ivanovo, 2015, iss. 1, vol. 2, pp. 72-79. (in Russia).
3. Petyushko A.A. *O markovskikh sluchaynykh polyakh i ikh svyazi s tsepyami Markova* [On Markov random fields and their connection with Markov chains]. *Intellektual'nye sistemy* [Intellectual systems]. 2010, vol. 14, no. 1/4, pp. 225-236. (in Russia).
4. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I. and Spektor A.A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh* [Digital images processing in information systems]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p. (in Russia).
5. Plastinin A.I. and Kupriyanov A.V. *Model' markovskogo sluchaynogo polya v zadachakh sinteza i analiza teksturnykh izobrazheniy* [Model of Markov random fields in problems of the synthesis and analysis of texture images]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of SSAU]. 2008, no. 2(15), pp. 252-256. (in Russia).
6. Plastinin A.I., Khramov A.G. and Soyfer V.A. *Obnaruzhenie teksturnykh neodnorodnostey na mikromashtabnykh izobrazheniyakh materialov* [Detection of texture heterogeneity on the microscale images of materials]. *Komp'yuternaya optika* [Computing optics]. 2011, vol. 35, no. 2, pp. 158-165. (in Russia).
7. Pratt W. K. *Introduction to Digital Image Processing*. Hoboken: CRC Press, 2013, 750 p.
8. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna: GOS 5639–82* [Steel and Alloys. Methods of detection and determination of grain size: State standart 5639-82]. Moscow: Gos. standart SSSR, 1982, 38 p. Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml> (in Russia).
9. *Segmentatsiya izobrazheniya* [Image segmentation]. *Bo_bda*. 2011, 24 September. Available at: <http://habrahabr.ru/post/128768/>.
10. *Operator Kenni. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia. Free Encyclopedia]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Operator_Kenni.
11. Kindermann R. and Snell J. *Laurie Markov random fields and their applications*. United States: American Mathematical Society, 1980, 142 p.
12. Moussouris J. *Gibbs and markov random systems with constraints*. *Journal of Statistical Physics*. 1974, vol. 10, no. 1, pp. 11-33.
13. Rue H. and Held L. *Gaussian markov random fields: theory and applications*. London, New York, Singapore: CRC Press, 2005, 263 p.

Рецензент: д-р т. н., проф. Н. М. Еришова

Надійшла до редколегії: 13.08.2015 р. Прийнята до друку: 26.09.2015 р.