

На правах рукописи



Нгуен Тху Хыонг

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО
ЗРЕНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск — 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО

«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Сидоров Денис Николаевич

Официальные оппоненты: **Воскобойников Юрий Евгеньевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)», заведующий кафедрой прикладной
математики

Лемперт Анна Ананьевна,

кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Институт динамики систем и теории
управления имени В.М. Матросова» СО РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории
логических оптимизационных методов анализа
сложных систем

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики»

Защита состоится 21 мая 2019 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский
государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла
Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ
ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г.
Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101, (<http://www.bgu.ru/>).

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 664003, г. Иркутск, ул.
Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан « » 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Ведерникова Т. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке математических методов расчета моделей технического зрения и машинного обучения для распознавания и классификации дефектов дорожного покрытия и пузырьков для исследования фазовых переходов «жидкость-газ».

Актуальность исследования. Развитие информационных технологий в части сбора и хранения многомерных данных сделало возможным создание информационных систем. Глубокие исследования предметной области приводят к необходимости обобщения хранимой информации при помощи алгоритмов машинного обучения (МО). МО – область искусственного интеллекта, направленная на разработку алгоритмов поиска закономерностей в данных. МО и техническое зрение (ТЗ) применяются в различных областях науки и техники.

Для содержания и планирования ремонтов дорог дорожные и транспортные компании нуждаются в точной и своевременной информации о дефектах дорог. В мире миллионы дорог, которые необходимо проверять каждый год. Состояние автомобильных дорог оказывает прямое воздействие на энергоэффективность автотранспортной отрасли. Ранее периодические проверки проводились вручную инженерами. Этот метод требует много времени и небезопасен для людей. За последние несколько лет проводились исследования в области автоматического обнаружения и классификации дефектов дорожного покрытия методами МО и ТЗ (М. Gavilan, 1999; Н. G. Zhang, 2004; А. Ouyang, 2011). Также решалась задача оптимизации планирования проведения дорожно-ремонтных работ с использованием алгоритмов построения оптимальных покрытий (А. Лемперт, 2014, 2016). Имеются программы, которые автоматически обнаруживают и классифицируют дефекты дорожного покрытия, такие, как RoadCrack vehicle, система ARAN. Но в этих исследованиях внимание уделяется дефектам типа «трещина», не были проведены исследования, в которых обнаруживали и классифицировали различные типы дефект.

Другая важная область применения ТЗ и МО, связанная с обнаружением объектов (в виде пузырьков), возникает в таких прикладных задачах,

как изучение фазовых переходов (А. Levin, 2016), разработка медицинских технологий (К. Randiha, 2010), контроль процессов на фармацевтических производствах (Е. Filho, 2010) и др. Применение методов ТЗ позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы обнаружения пузырьков. При изучении двухфазных сред средствами ТЗ входные изображения весьма разнообразны и имеют сложный фон. Пузырьки на таких изображениях часто касаются, располагаются друг за другом. Поэтому обнаружение и вычисление их характеристик является актуальной задачей.

Таким образом, разработка и применение алгоритмов ТЗ в комбинации с методами МО для моделирования и классификации объектов с приложениями для решения вышеуказанных задач очень важны.

Цель и задачи исследования. Работа посвящена разработке математических методов расчета моделей технического зрения и машинного обучения с приложениями для решения задач распознавания и классификации дефектов дорожного покрытия и пузырьков в исследовании фазовых переходов «жидкость-газ». Решены следующие задачи:

Задача 1. Обнаружение и классификация дефектов дорожного покрытия (ОКДП). На основе изображений дорожного покрытия необходимо распознать и классифицировать различные дефекты. В работе рассмотрены три основных классов дефектов: глубокие трещины, сеть трещин и выбоины.

Задача 2. Обнаружение пузырьков на изображениях (ОП). На изображении требуется определить в заданной области количество пузырьков, их диаметр, а также распределение их размера. Задача относится к автоматизации средств изучения динамики фазовых переходов.

Для каждой задачи необходимо:

- 1) выбрать и усовершенствовать методы обнаружения объектов в соответствии с различными условиями их регистрации;
- 2) разработать методы и алгоритмы МО для классификации изображений;
- 3) разработать алгоритмы обработки изображений для извлечения признаков объектов на изображениях при наличии шума;
- 4) разработать и реализовать программный комплекс на основе методов обработки, анализа изображений, таких, как: предобработка, сегментация,

анализ и извлечение признаков, формирование базы данных изображений и анализ эффективности созданных программных библиотек;

5) оценить качество и эффективность работы программного комплекса на тестовых изображениях. Предложить средства для повышения эффективности работы.

Методы исследования. Методы теоретических исследований: методы распознавания образов и обработки изображений, интегральные преобразования. Методы прикладных исследований: проектирование алгоритмов для решения задачи извлечения и классификации признаков дефектов дорожного покрытия и пузырьков, тестирование программ, оценка эффективности и сравнение результатов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1) разработаны новые математические методы моделирования для решения задач обнаружения, анализа признаков и классификации объектов (дефектов дорожного покрытия и пузырьков) на основе технологий ТЗ и методов МО;

2) разработаны комплексированные алгоритмы извлечения признаков дефектов дорожного покрытия и пузырьков с учетом особенностей регистрации анализируемых изображений;

3) эффективные численные методы и алгоритмы машинного обучения реализованы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ на основе комбинации марковских случайных полей и метода разреза на графах для улучшения качественных характеристик сегментации изображений; алгоритм случайного леса применен для классификации дефектов дорожного покрытия;

4) разработан метод распознавания пузырьков в фазовом переходе «жидкость-газ» с использованием вейвлет-преобразования Хаара.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Математические методы на основе марковских случайных полей и метода разреза на графах, позволяющие эффективно распознавать дефекты дорожного покрытия, а также адаптация метода случайного леса для их классификации.

2) Математические методы расчета моделей пузырьков для изучения фазовых переходов «жидкость-газ».

3) Методы расчета и классификации признаков дефектов дорожного покрытия и пузырьков реализованы в виде двух научно-исследовательских комплексов программ.

Апробация работы. Работа выполнена на кафедре вычислительной техники Института высоких технологий ИРНИТУ. Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на следующих симпозиумах, семинарах и конференциях: Всероссийские молодежные научно-практические конференции «Винеровские чтения» (ИРНИТУ, г. Иркутск, 2014, 2015); XIX Байкальская всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Максимиха, Бурятия, 2014); XVI Байкальская международная школа-семинар «Методы оптимизации и их приложения» (о. Ольхон, г. Иркутск, 2014); The 4th, 5th International Conference on Analysis of Images, Social Networks, and Texts (г. Екатеринбург, 2015, 2016); V Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (г. Тольятти, 2015); XIII Всероссийская конференция молодых ученых «Моделирование, оптимизация и информационные технологии» (г. Иркутск – Старая Ангасолка, 2017); XVII Байкальская международная школа-семинар «Методы Оптимизации и их Приложения» (Максимиха, Бурятия, 2017). Работа выполнена при поддержке Министерства образования и подготовки кадров Социалистической Республики Вьетнам и программы развития ФГБОУ ВО ИРНИТУ.

Личный вклад автора. Основные результаты, выносимые на защиту получены автором лично. Постановки задач и анализ результатов осуществлены совместно с научным руководителем профессором Д. Н. Сидоровым. Автор благодарен А. В. Жукову и к.ф.-м.н. А. И. Дрегля за поддержку и ценные советы. Конфликта интересов с соавторами нет.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18:

– п.1. «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»;

– п.4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

– п.6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, 8 из которых – в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 свидетельства регистрации программы на ЭВМ, 2 статьи опубликованы в журналах, индексируемых Web of Science и 3 статьи опубликованы в журналах, индексируемых Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, три главы, заключение и список использованной литературы, содержащий 189 наименований. Общий объем диссертации составляет 133 страниц машинописного текста, иллюстрированного 57 рисунками и 12 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, определена научная и практическая новизна, представлено краткое содержание диссертационной работы по главам.

В **первой главе** представлен подход к обнаружению и классификации дефектов на изображении с использованием методов и алгоритмов МО и ТЗ. Рассмотрены дефекты дорожного покрытия (Табл.1) согласно стандартам Р 50597, РФ ГОСТ; 13108-46 EN; 1472/QD-BGTVT и свойства пузырьков в жидкости. Дан обзор литературы для решения указанных задач, проведен анализ алгоритмов, методов ТЗ, представлены результаты исследований в этой области. Сформулирована постановка задачи диссертационного исследования. Представлен предлагаемый автором подход для решения задачи автоматического обнаружения и классификации дефектов дорожного покрытия и задачи обнаружения и измерения пузырьков.

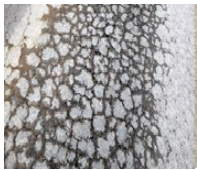
Типов дефекта	Описание	Примеры
Глубокие трещины	– глубокие трещины обычно встречаются в параллельных областях дорожного покрытия. Направление потока автотранспорта оказывает прямое воздействие на поверхность и появление таких дефектов.	
Сеть трещин	– тип дефекта покрытия, который развивается из горизонтальных трещин и вертикальных трещин. Этот дефект обычно появляется на больших участках поверхности.	
Выбоина	– повреждение дорожной поверхности, при котором несколько слоев покрытия разрушаются.	

Таблица 1

Описание основных дефектов дорожного покрытия

Во второй главе, используя методы МО и ТЗ, разработаны математические модели и численные методы решения поставленных задач. Работа сфокусирована на решении следующих задач: улучшения качества входных данных посредством предварительной обработки изображений, сегментация изображений, обнаружение и классификация дефектов. Предложенный подход состоит из четырех основных этапов (рис.1).

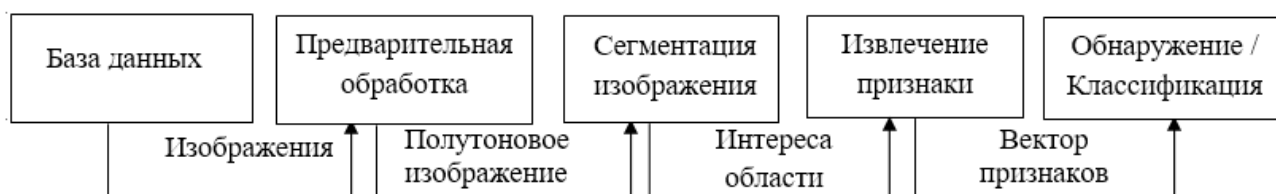


Рис. 1. Основные этапы обнаружения и классификации объектов

В п. 2.1 представлена предварительная обработка изображений и извлечение признаков в системах ОКДПП и ОП.

В п. 2.1.1 представлен процесс предобработки изображений улучшения качества изображений в зависимости от условий освещения. Условия освеще-

ния влияют на значения пикселей различных областей в изображении. Эти задачи решены при помощи адаптивной балансировки гистограмм, а также комбинации методов математической морфологии, изложенных в этом разделе.

В п. 2.1.2 представлены методы извлечения признаков в системах ОКДДП и ОП. До извлечения признаков предлагается предварительная обработка изображений. Сначала применяется фильтрация шума с использованием фильтра Гаусса и конвертирование в полутоновые изображения. На следующем шаге выполняется сегментация изображения. Используется разделение изображения на области. Затем отделяются пиксели дефектов изображения для обнаружения связной области. На основе методов математической морфологии разработан эффективный эвристический метод предобработки для обнаружения пикселей, соответствующих дефектам и для удаления областей, которые определены как шум.

В п. 2.2 рассмотрены математические модели сегментации дефектов дорожного покрытия и пузырьков.

Матрица $A = \{a_{ij}\}$ описывает множество пикселей в позиции $\{i, j\}_{i=\overline{1, N}, j=\overline{1, M}}$. Оператор сегментации (маска) $F : A \rightarrow A^b$, где

$$A^b = \begin{cases} a_{ij}^b = 0, & \text{если без дефекта,} \\ a_{ij}^b = 1, & \text{если дефект.} \end{cases}$$

Назовем подмножество $\hat{A}^b \subset A^b$ областью интереса (ОИ) если элементы $\hat{A}^b : a_{ij}^b = 1$. Так, п. 2.2.1 посвящен численным методам сегментации изображений в системе ОКДДП. Метод разреза на графах применен для решения задач сегментации изображений сложной структуры на основе анализа связности областей. Результат представляет собой карту дефектов дорожного покрытия. Сегментация выполняется в 2 шага (рис. 2):

- 1) сегментация изображения алгоритмом минимального разреза – максимального потока, выделение области интереса;
- 2) построение полной карты дефектов методом сравнения и замены пиксельных меток, которые получены на основе алгоритма α -расширения.

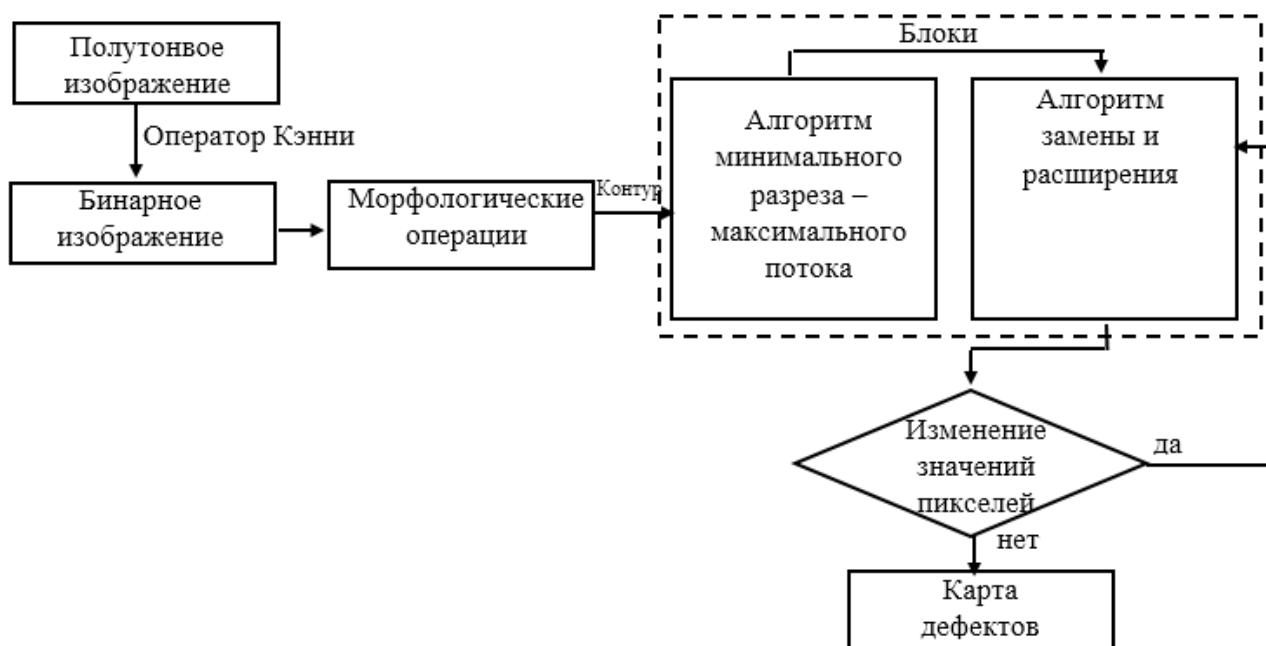


Рис. 2. Блок-схема сегментации изображения на основе метода разреза на графах и Марковских случайных полей

В п. 2.2.2. реализованы численные методы сегментации изображений в системе ОП. Процесс извлечения признаков объектов в изображениях на основе вейвлет-преобразования Хаара (рис. 3) выполняется алгоритмом 1. Полученные с помощью вейвлет-преобразования Хаара признаки сравниваются с порогом $T = \sigma\sqrt{2 \ln n}$, где σ - среднее абсолютное отклонение, а n – количество выборок конкретных коэффициентов вейвлет-преобразования. Частота и масштаб вейвлет-разложения фиксированы, порог $T = k\sigma$, где $k = \sqrt{2 \ln n}$ является настраиваемым параметром.

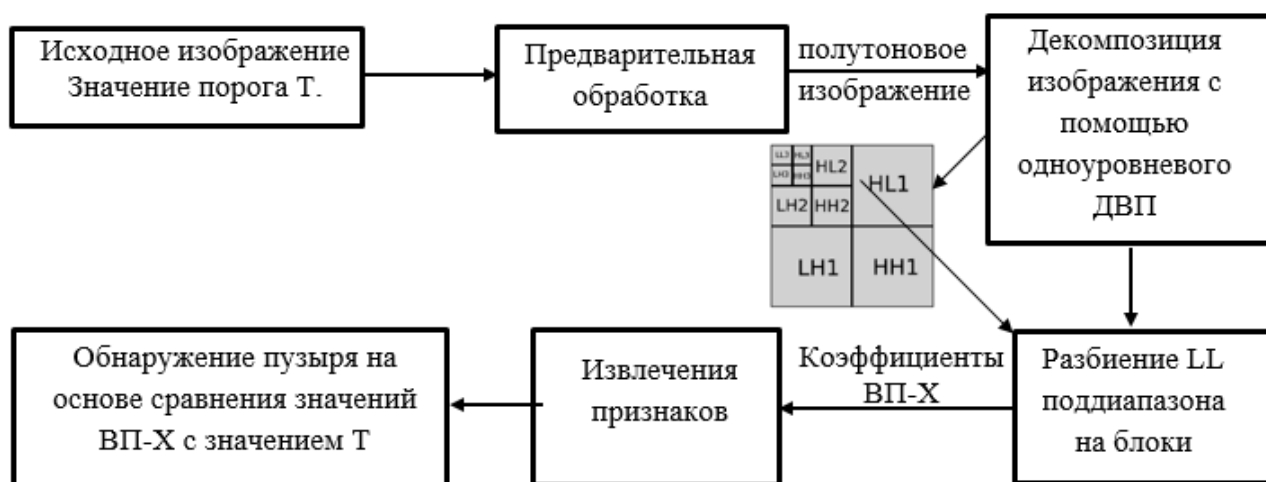


Рис. 3. Блок-схема обнаружения пузырьков на основе вейвлет-преобразований Хаара

Исходные данные: N изображений.

Результат: Значения вейвлет-преобразования Хаара (коэффициенты).

1. Преобразование изображения RGB в полутоновое изображение;
2. Предварительная обработка (фильтрация шума, морфологическая обработка)
3. Декомпозиция исходного изображения с помощью одноуровневого ДВП. Изображение разбивается на квадранты: LL, LH, HL и HH.
4. Разбиение LL на блоки;
5. Применение ДВП к каждому блоку, полученному на шаге 4 для извлечения признаков.

Алгоритм 1: вейвлет-преобразование Хаара для извлечения признаков пузырьков.

В п. 2.3 рассмотрены математические модели классификации объектов в системе ОКДДП. Пусть $S = \{X, Y\}$ – множество N обучающих выборок, $X = \{\bar{x}_i | i = 1, \dots, 3\}$ – набор векторов признаков дефектов дорожного покрытия признаков, $Y = \{y_i | i = 1, \dots, 3\}$ – набор меток классов. Классификатор – это функция $H : X \rightarrow Y$, которая отображает элемент множества X в множество Y . Использовались признаки, показавшие наибольшую информативность: нормализованная гистограмма цепного кода Фримена, моменты и эксцентриситет области интереса, полученной на этапе сегментации.

При помощи алгоритма случайного леса строилась обучающая выборка, удовлетворяющая условию $H : X \rightarrow Y$, где H – классификатор, Y – соответствующие метки. Рассмотрены классы дефектов, задаваемые множеством Y : сеть трещин, глубокие трещины и выбоины. Таким образом, каждое дерево будет подмножеством N_t из множества N . Количество узлов $N_p, p \in N_p$, где p – узел, N_p – количество узлов, используемых при обучении выборки, делим на два класса N_l и N_r с учетом порогового значения c :

$$N_l = \{n \in N_p | f(v_n) > c\}; N_r = N_p / N_l. \quad (1)$$

Далее, используя максимальный индекс Джини, вычисляем разность, которая является критерием информативности построения решающих деревьев:

$$\Delta I_G(N_p) = I_G(N_p) - \frac{|N_l|}{|N_p|} I_G(N_l) - \frac{|N_r|}{|N_p|} I_G(N_r), \quad (2)$$

где $I_G(N)$ – индекс Джини для данных обучающей выборки N .

Численный метод классификации, представленный в п. 2.3.2, основан на алгоритме случайного леса. Метод классифицирует дефекты дорожных покрытий в системе ОКДДП.

Шаг 1. Для $i = 1, 2, \dots, B$ (B - количество деревьев) выполнить:

- сформировать бустстреп выборку S размера l по исходной обучающей выборке $D = \{X_i, y_i\}_{i=1}^l$;
- по выборке S индуцировать неусеченное дерево решений T_i с минимальным количеством наблюдений в терминальных вершинах равным n_{min} , рекурсивно следуя следующему алгоритму:
 - из исходного набора n признаков случайно выбрать p признаков;
 - из p признаков выбрать признак, который обеспечивает наилучшее расщепление;
 - расщепить выборку, соответствующую обрабатываемой вершине на две подвыборки;

Шаг 2. В результате выполнения шага 1 получаем ансамбль деревьев решений $\{T_i\}_{i=1}^B$;

Шаг 3. Предсказание новых наблюдений осуществлять следующим образом: пусть $\hat{\omega}(X) \in \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ - класс, предсказанный деревом решений T_i , т. е. $T_i(X) = \hat{\omega}(X)$; тогда $\hat{\omega}_{rf}^B(X)$ - класс, наиболее часто встречающийся в множестве $\{\hat{\omega}(X)\}_{i=1}^B$.

На рис. 4 представлена блок-схема классификации объектов в системе ОКДДП, основанная на методе обучения с учителем – алгоритме случайного леса.

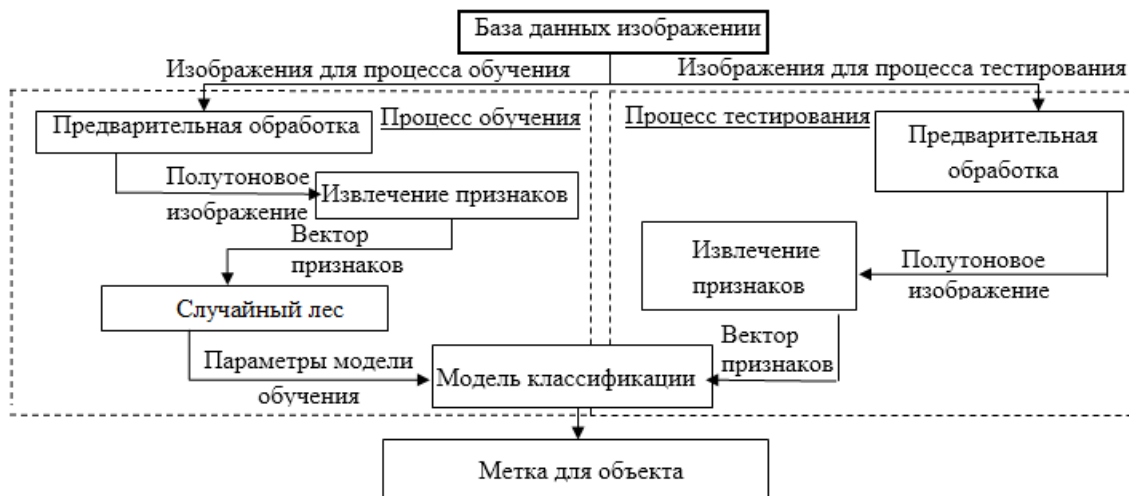


Рис. 4. Блок-схема классификации объектов в системе ОКДДП

В **третьей главе** дается описание реализации алгоритмов и методов МО и ТЗ для построения систем ОКДДП и ОП, для которых в главе 2 были разработаны соответствующие математические модели. Описана структура программ ОКДДП и ОП, приведены результаты экспериментов для оценки разработанного метода обнаружения и классификации данных на изображениях. Проанализирована эффективность предлагаемого метода в сравнении с другими передовыми методами. Описан интерфейс разработанного программного обеспечения.

Проведены эксперименты по классификации дефектов дорожного покрытия. Эксперименты показали (рис. 5), что предлагаемые алгоритмы обладают высокой эффективностью по критериям: время обучения, точность, в том числе на изображениях с шумом и ограниченным освещением, что особенно важно для их практического использования. Сравнение полученных результатов с результатами других алгоритмов МО подтвердило стабильность системы, точность и приемлемое время расчета. В качестве функционала оценки

	ОКДП			
	Случайный лес		Градиентный бустинг над решающими деревьями	
	количество деревьев: 50 глубина: 2	количество деревьев: 100 глубина: 5	количество деревьев: 50 глубина: 2	количество деревьев: 100 глубина: 5
Время работы, (с)	150	257	140	278
точность (%)	91.57	95.29	80.5	85.47

Рис. 5. Сравнительный анализ методов классификации

качества в задачах моделирования и классификации дефектов выбрана ROC-кривая, см. рис. 6. Для ее построения использовалась бинарная классификация последовательно для трех классов: 1 - выбоина, 2 - глубокая трещина, 3 - сеть трещин. Экспериментальные результаты на реальных наборах пузырьков показали высокую эффективность разработанной системы распознавания (таб. 2). Набор 1 содержит 250 изображений предоставленных компанией ВизионЭкстрим (Сингапур), набор 2 содержит 557 изображений фазовых переходов в ВТК ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск).

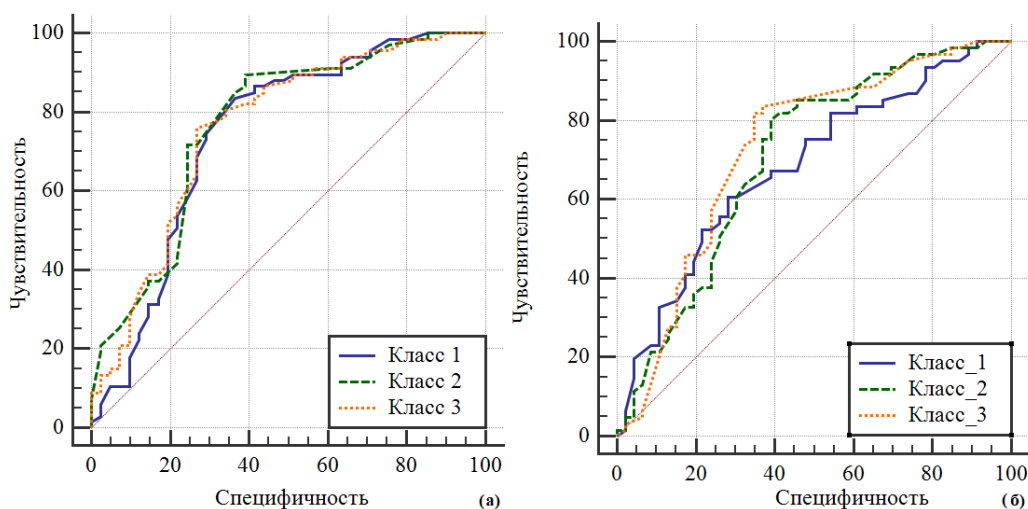


Рис. 6. ROC-анализ классификации дефектов дорожного покрытия (а) - случайный лес, (б) - градиентный бустинг над решающими деревьями

Таблица 2

Экспериментальный результат обнаружения пузырьков

	Набор 1	Набор 2
Общее количество изображений	250	557
Количество пузырьков в изображениях	85	62
Количество пузырьков найдено	85	58

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработаны математические модели и численные методы сегментации изображений, позволяющие обнаруживать дефекты дорожного покрытия, а также пузырьков во время фазового перехода. Модели основываются, соответственно, на комбинации алгоритмов разреза на графах и Марковского случайного поля, и комбинации метода разреза на графах с вейвлет-преобразованием Хаара.

2. Проведен комплексный анализ научно - технической задачи и извлечены соответствующие признаки, применены современные технологии математического моделирования. Особое внимание уделено признакам формы, а также спектральному признаку на основе вейвлет-преобразования.

3. Реализован эффективный метод МО в виде комплекса проблемно-ориентированных программ, основанный на алгоритме случайного леса для решения задачи классификации дефектов дорожного покрытия.

4. Разработаны программные модули ОКДПП и ОП, реализующие обнаружение, классификацию и выявление характеристик объектов на изображениях.

5. Проверка адекватности математических моделей основана на сравнении и анализе производительности и стабильности разработанных модулей на основе реальных данных.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. **Nguyen T. H.** Machine learning algorithms application to road defects classification / T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, D. N. Sidorov, A. I. Dreglea // Intelligent Decision Technologies. – 2018. – V. 12. – No. 1. – P. 59–66. – Индексируется WoS и Scopus.
2. **Nguyen T. H.** Robust approach to detection of bubbles based on images analysis / T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, A. I. Dreglea // International Journal of Artificial Intelligence. – 2018. – V. 16. – No. 1. – P. 167–177. – Индексируется Scopus.
3. **Nguyen T.H.** Automatic anthropometric system development using machine learning / T. L. Nguyen, T. H. Nguyen // BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience. – 2016. – V. 7. – P. 5–15. – Индексируется WoS.
4. **Nguyen T. H.** On road defects detection and classification / T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, A. Zhukov // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – V. 1710, – P. 264–275. – Индексируется Scopus.
5. **Nguyen T.H.** Studies of anthropometrical features using machine learning approach / T. L. Nguyen, T. H. Nguyen, A. Zhukov // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – V. 1452. – P. 96–105. – Индексируется Scopus.
6. **Нгуен Т. Х.** Алгоритмическое и программное обеспечение автоматического обнаружения и классификации дефектов дорожного покрытия с помощью метода разреза графов и алгоритма случайных лесов / Т. Х. Нгуен, Т. Л. Нгуен // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2016. – № 10 (117). – С. 111–118. – Индексируется РИНЦ.
7. **Nguyen T. H.** A robust approach for road pavement defects detection and classification / T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, D. N. Sidorov // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2016. – V. 3. – No. 3. – P. 40–52. – Индексируется РИНЦ.

8. **Нгуен Т. Х.** Об автоматизации извлечения и классификации антропометрических признаков / Т. Л. Нгуен, Т. Х. Нгуен // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2015. – № 4 (99). – С. 17–23. – Индексируется РИНЦ.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. **Нгуен Т. Х.** Обнаружение и классификация пузырьков на цифровых изображениях / Д. Н. Сидоров, Т. Х. Нгуен, Т. Л. Нгуен // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2018612096 от 12 февраля 2018 г. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2018.

10. **Нгуен Т. Х.** Программа автоматического обнаружения и классификации дефектов дорожного покрытия / Д. Н. Сидоров, Т. Х. Нгуен, Т. Л. Нгуен // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2016619386 от 18 августа 2016 г. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2016.

Прочие издания

11. **Нгуен Т. Х.** Автоматическое обнаружение и классификация дефектов дорожного покрытия / Т. Х. Нгуен // Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции «Винеровские чтения 2015». Иркутск: Изд-во Иркутск, 2015. – С. 8.

12. **Нгуен Т. Х.** Методы математической морфологии в цифровой обработке изображений / Т. Л. Нгуен, Т. Х. Нгуен // Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 75–81.

Подписано в печать 19.02.2019. Формат 60 х 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ . Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.