

# Архитектура объектно-ориентированной программной реализации алгоритмов полного цикла обработки оптических изображений неизвестного объекта

В. В. Лавров<sup>1</sup>, Р. С. Лучкин<sup>1</sup>, М. Е. Прохоров<sup>1</sup>, Ю. Г. Рындин<sup>1</sup>,  
А. В. Тестов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), Москва, Россия

**Постановка проблемы.** В процессе программной обработки сильно искаженных оптических изображений (ОИ) удаленных объектов, формируемых в телескопах наземного базирования, возникает необходимость решения задач оценки параметров фонового излучения, фильтрации изображений информационных объектов, выделения их на исходных ОИ и классификации. Эта ситуация характерна для обработки изображения как одиночного объекта, так и движущихся космических объектов на снимках звездного неба. В этой связи авторами в рамках объектно-ориентированного подхода разработан универсальный шаблон проектирования, позволяющий реализовать необходимую обработку с единых позиций.

**Цель.** Разработка прототипа программной реализации алгоритмов для решения вышеупомянутых задач в рамках предложенного авторами шаблона проектирования, проверка возможности его использования при разработке архитектуры программного обеспечения, с примерами обработки ОИ, полученными в натуральных условиях.

**Результаты.** В статье изложены результаты разработки архитектуры программной реализации алгоритмов обработки искаженных ОИ удаленных космических объектов, формируемых в телескопах наземного базирования. В рамках объектно-ориентированной парадигмы программирования с использованием универсального языка моделирования (UML) дается описание основных компонент статической и динамической моделей архитектуры. В части статической модели предложено новое представление ОИ с использованием совокупности булевых матриц. В рамках динамической модели разработан универсальный шаблон (интерфейс) для реализации алгоритмов обработки искаженных ОИ с использованием диаграмм деятельности UML. Приводится его детализация при решении задач выделения отдельных конструктивных элементов на изображении одиночного объекта и выделения треков движущихся объектов на изображении звездного неба.

**Практическая значимость.** Разработанные программные реализации алгоритмов обработки оптических изображений невысокого качества могут быть использованы в рамках модернизации программных комплексов наземных телескопов.

**Ключевые слова:** архитектура программного обеспечения, диаграммы деятельности, полный цикл обработки изображения, статическая и динамическая модель, универсальный язык моделирования (UML)

*Для цитирования:*

Архитектура объектно-ориентированной программной реализации алгоритмов полного цикла обработки оптических изображений неизвестного объекта / В. В. Лавров, Р. С. Лучкин, М. Е. Прохоров, Ю. Г. Рындин, А. В. Тестов // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 4. С. 23–34. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-23-34

© Лавров В. В., Лучкин Р. С., Прохоров М. Е., Рындин Ю. Г., Тестов А. В., 2020



# Architecture of an object-oriented software implementation of algorithms for a full cycle of optical images of an unknown object processing

V.V. Lavrov<sup>1</sup>, R.S. Luchkin<sup>1</sup>, M.E. Prokhorov<sup>1</sup>, Yu.G. Ryndin<sup>1</sup>,  
A.V. Testov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vympel PJSC, Moscow, Russia

**Formulation of the problem.** In the process of software processing of highly distorted optical images (OI) of distant objects formed in ground-based telescopes, it becomes necessary to solve the problems of estimating the parameters of background radiation, filtering images of information objects, isolating them on the original OIs, and classifying them. This situation is typical when processing images of both a single object and moving space objects in images of the starry sky. In this regard, the authors, within the framework of the object-oriented approach, have developed a universal design pattern that makes it possible to implement the necessary processing from a single point of view.

**Objective.** Development of a prototype for software implementation of algorithms for solving the aforementioned problems within the framework of the design pattern proposed by the authors. Examining the possibility of its use in the development of software architecture, with examples of OI processing obtained in natural conditions.

**Results.** The article presents the results of the development of the software implementation algorithms architecture for processing distorted OIs of remote space objects formed in ground-based telescopes. Within the framework of the object-oriented programming paradigm using the Universal Modeling Language (UML), a description of the main components of static and dynamic architecture models is provided. For the static model, a new representation of the OI is proposed using a set of Boolean matrices. Within the framework of the dynamic model, a universal template (interface) has been developed for the implementation of algorithms for processing distorted OIs using UML activity diagrams. Its particularization is given when solving the problems of highlighting individual structural elements in the image of a single object and highlighting the tracks of moving objects in the image of the starry sky.

**Practical significance.** The developed software implementations of low-quality optical image processing algorithms can be used in the modernization of software systems for ground-based telescopes.

**Keywords:** software architecture, activity diagrams, full image processing cycle, static and dynamic model, universal modeling language (UML)

*For citation:*

Lavrov V. V., Luchkin R. S., Prokhorov M. E., Ryndin Yu. G., Testov A. V. Architecture of an object-oriented software implementation of algorithms for a full cycle of optical images of an unknown object processing. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 4, pp. 23–34. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-23-34

## Введение

В ранее опубликованной работе авторов [1] рассмотрены алгоритмы выделения типовых элементов конструкции (например солнечных панелей, выносных крупногабаритных антенн, корпуса и т. д.) на сильно искаженных ОИ космических объектов, формируемых в телескопах наземного базирования. Ситуация существенно усложняется фоновой обстановкой, вероятностное описание которой априори неизвестно. Аналогичные задачи возникают и при выделении на снимках с невысоким угловым разрешением траектории движущегося «точечного» объекта в виде отрезка прямой («трека»).

При разработке алгоритмов обнаружения этих информативных объектов и оценки их параметров авторами разработан подход, в основу которого

положены теория множеств и робастные методы математической статистики и оценивания. Программная реализация (программное обеспечение (ПО)) синтезированных алгоритмов, как правило, включается в программное корпоративное приложение, архитектура которого оптимизируется в зависимости от решаемой прикладной задачи [2, 3].

Проектирование корпоративных приложений сопряжено со слишком большим числом проблем архитектурного характера. Под архитектурой программного обеспечения понимают набор внутренних структур ПО, которые рассматриваются с различных точек зрения и состоят из компонентов, их связей и возможных взаимодействий между компонентами, а также доступных извне свойств этих компонентов.

На этапе проектирования приложения корпоративного уровня в качестве типовой архитектуры используют трехслойную архитектуру в составе источника данных, предметной области (бизнес-логики) и представления [2].

Слой представления (слой верхнего уровня) в полном объеме обеспечивает взаимодействие пользователя с системой при использовании графического интерфейса.

Источник данных – это хранилище информации и подмножество функций, которые обеспечивают информационную поддержку приложения и взаимодействие с предметной областью.

Логика предметной области обеспечивает реализацию требуемых основных функциональных преобразований доступной информации.

Существует правило, касающееся взаимоотношения слоев: зависимость источника данных от уровня представления не допускается. При этом стремятся к тому, чтобы зависимость бизнес-логики от уровня представления была минимальна и полностью скрывала источник данных от представления.

Реализация вышесказанного предполагает использование объектно-ориентированного программирования, с помощью которого нами проведена разработка ПО предметной области алгоритмов полного цикла обработки последетекторного мало-контрастного ОИ с использованием языка Java.

В данной работе приводится представление архитектуры основных компонентов проектной модели ПО предметной области с использованием графических артефактов (диаграмм) унифицированного языка моделирования UML [4–6]. UML позволяет проводить описания архитектуры ПО как со статической, так и с динамической точек зрения.

### Статическая модель слоя предметной области

Представление статической модели отражает результаты декомпозиции предметной области на интерфейсы и классы, включающие в себя атрибуты и методы, а также связи между выделенными сущностями (классами), которые в общем случае отображаются на диаграммах классов. Представление такой информации в статье потребует ее большого объема. Поэтому остановимся на кратком описании состава атрибутов основных информационных классов, имея в виду, что помимо инициализации объектов таких классов в их структуру входят в основном методы установки и получения значений атрибутов (методы get/set).

В основу алгоритмов полного цикла оптических изображений положено представление ОИ  $Y$  с использованием аппарата булевых матриц  $U$  в следующем виде:

$$Y = \sum_{i=1}^M IU_i; U_i: U_i(i, j) = \text{true} \text{ при } Y_1(i, j) = l; \quad (1)$$

иначе  $U_i(i, j) = \text{false}$ ,

где  $U_i$  – булева матрица, размерность которой совпадает с размерностью  $Y$ ,  $l$  – конкретный уровень яркости пикселя,  $M=255$ ,  $(i, j)$  – текущие значения индексов матрицы. Программное представление  $Y$  реализовано в виде ассоциативного массива, где в качестве ключей выступают уровни яркостей ОИ  $l$ , а значений – матрицы  $U_i$ . Последние наследуют класс битового вектора BitSet стандартной библиотеки Java и дополнительно включают в себя количество строк и столбцов матрицы  $Y$ . При обработке ОИ в рамках синтезированных алгоритмов широко используются режекторные фильтры, формирующие битовые изображения в диапазоне яркостей  $l \in [l_0, l_1)$ , булевы матрицы для которых вычисляются по формуле

$$U(l_0, l_1) = \bigcup_{i=l_0}^{l_1} U_i. \quad (2)$$

Для описания сегментированного ОИ на каждом уровне яркости используется представление матрицы в виде совокупности линейно-связанных областей  $U_1 = \bigcup_{i=1}^{n(l)} U_{ii}(s)$ . Атрибутами объектов класса  $U(s)$  являются массив линейно-связных векторов класса BitSet и обрамляющий его прямоугольник.

Для характеристик качества и структуры выделенных сегментов ОИ, а также матриц  $U_i$  разработан класс  $T$ , атрибуты которого содержат заданные в виде примитивов оценки нормированной гистограммы интенсивностей, количества линейно-связных областей (сегментов), их суммарного периметра и нормированного коэффициента компактности [1]. Структура введенного класса универсальна в том смысле, что объекты данного класса удастся использовать для характеристики состояния объектов классов  $U_i$ ,  $U(s)$ ,  $U(l_0, l_1)$  и ОИ в целом.

Для описания структуры найденных элементов фактор-множества используются объекты класса  $U(g)$ . Его атрибуты представляют собой описание дерева графа, в вершинах которого используются упорядоченные по уровням яркости объекты двунаправленного списка. При этом «родители» могут содержать несколько «детей». Вершинами графа являются объекты класса, в состав атрибутов которого входят представители классов  $U(s)$ .

Для описания структуры возможных типовых конструктивных элементов в атрибуты класса  $U(g)$  дополнительно включен список информативных параметров (примитивов).

При оценке параметров треков используется четырехмерный вектор вещественных чисел и связанная с ним корреляционная матрица.

### **Динамическая модель слоя предметной области**

Динамическую модель полного цикла алгоритмов обработки однобайтовых сильно искаженных ОИ на этапах объектно-ориентированного анализа и проектирования с достаточной полнотой удается представить с использованием диаграмм деятельности UML, которые описывают процессы взаимодействия между объектами и изменения их внутреннего состояния, а также варианты синхронизации процесса обработки. Такой подход позволяет дать описание реализации вычислительного процесса как совокупности обобщенных действий, изображенных на диаграмме в виде овалов. Дополнительными артефактами диаграммы являются информационные объекты, изображаемые в виде прямоугольников, направленных линий, указывающих последовательность действий [6]. Синхронизации двух видов – развилки и слияния – показываются жирными линиями, к которым сходятся или от которых расходятся потоки объектов. Кроме синхронизаций на диаграммах деятельности могут быть показаны в виде небольших ромбов разветвления потоков объектов, связанных с выбором того или иного направления обработки в зависимости от определенных условий. Выбор такой диаграммы, по существу, является обобщением структурной схемы алгоритма и диаграммы потока данных, традиционно используемых в процедурном программировании, и позволяет описать сущность процесса обработки, не вникая в особенности его программной реализации.

Ограничимся описанием процессов, протекающих при обработке ОИ в предметной области. В основе обработки лежит подход, базирующийся на представлении ОИ с использованием множества булевых матриц и процедуры их факторизации при выбранном бинарном отношении связности, а также робастных методов математической статистики и оценивания.

### **Диаграмма деятельности универсальной программной реализации полного цикла обработки оптических изображений**

В рамках объектно-ориентированной парадигмы предлагается реализовать процесс обработки ОИ, в основу которой положен универсальный шаблон (паттерн), диаграмма деятельности которого представлена на рис. 1. Остановимся на кратком описании основных процессов обработки и формируемых при этом информационных объектах в условиях, когда исходная информация включает в себя поступившее ОИ, а также данные о том, как эта информация была получена.

На этапе инициализации реализуется предварительная фильтрация оптического изображения,

решающая задачи как оценки параметров фонового излучения, так и исключения из дальнейшей обработки сегментов ОИ, с высокой долей вероятности не содержащих ОИ информационных объектов (например, по количеству значимых пикселей в бинарном ОИ, сформированном с использованием порогового значения интенсивности при выбранном значении вероятности появления фоновой отметки).

Выделенная информация (ОИ в целом или его сегменты с возможными оценками параметров фонового излучения) в объектном представлении на диаграмме обозначена как «Начальные элементы». Отметим, что их представление с использованием булевых матриц позволяет реализовать последующую обработку с использованием архитектуры параллельных вычислений. Этот вопрос актуален на этапе программной реализации алгоритмов и в статье не рассматривается.

На этапе фильтрации решается задача максимально возможного подавления в ОИ вклада «паразитных» источников излучения с использованием методов робастной ранговой (порядковой) фильтрации. В результате формируется отфильтрованное ОИ.

Этап факторизации (сегментации) занимает центральное место на предварительных этапах обработки. Состав фактор-множества определяющим образом зависит от выбора вида бинарного отношения эквивалентности. Отношение эквивалентности представляет собой определенное логическое выражение, структура которого формируется с учетом всей доступной априорной информации о качественных и количественных свойствах информационных объектов. Процедура построения фактор-множества может быть реализована одним из следующих алгоритмов: «лесного пожара», пересечения булевых интервалов, на основе матрицы смежности графа линейно-связных интервалов, найденных на отдельных строках матрицы  $U$ . Фактор-множество – это совокупность объектов класса  $U(g)$ .

На этапе классификации и оценки информационных параметров решается задача отнесения найденных элементов фактор-множества к истинным или ложным с возможной оценкой их информативных параметров, поскольку структура ОИ имеет вероятностный характер. Унифицировать этот процесс обработки, а также использовать робастные методы обработки на данном этапе в общем случае не удастся. Тем не менее, для конкретной функциональной задачи большинство характеристик информационных объектов нам известно, по крайней мере в рамках параметрической неопределенности их представления, преодолеть которую удастся при использовании адаптивного байесова подхода. Он

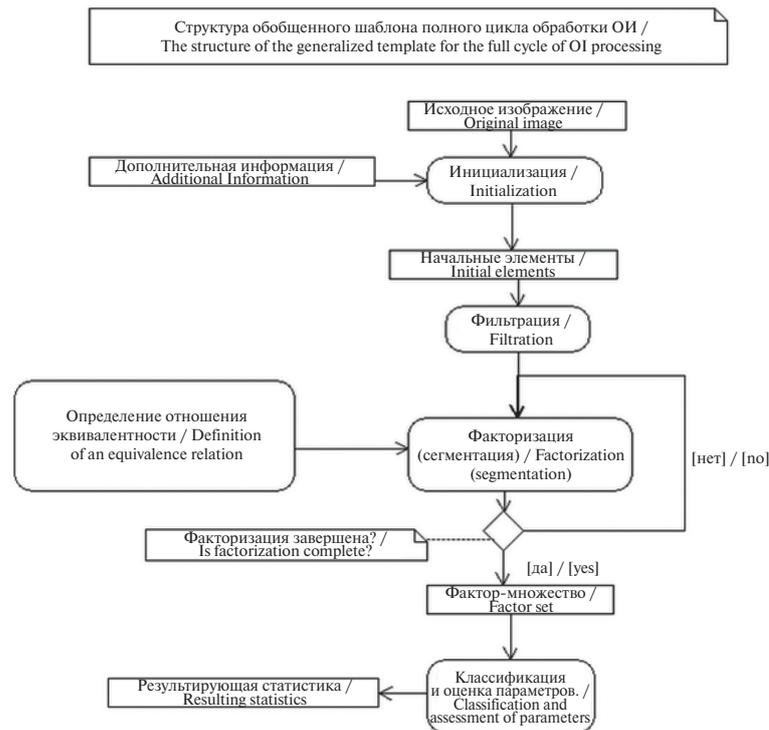


Рисунок 1. Диаграмма деятельности процесса полного цикла обработки однобайтового оптического изображения невысокого качества

Figure 1. Activity diagram of the full processing cycle of a single-byte optical image of low quality

занимает центральное место в процессе полного цикла обработки ОИ и включен в разработанный шаблон.

Для программной реализации предложенного шаблона обработки с использованием языка программирования Java введен соответствующий интерфейс. Рассмотрим его детализацию при решении следующих задач обработки ОИ.

#### Детализация процесса обработки изображения неизвестного одиночного объекта

Соответствующая диаграмма деятельности приведена на рис. 2, ее краткая характеристика – ниже.

В рамках первых трех этапов обработки оптического изображения одиночного объекта основная сложность связана с сегментацией ОИ, достаточно полно рассмотренной в [7, 8]. В [1] приведено описание всей совокупности алгоритмов полного цикла ОИ при использовании частных критериев качества.

В качестве дополнительной информации используется совокупность значений порядков медианных фильтров, используемых при фильтрации фоновой компоненты и излучения ярких звезд.

Реализация деятельности «Инициализация» осуществляется при многоканальной обработке, количество каналов которой совпадает с априори выбранным числом порядков медианных фильтров,

проводится одношаговая фильтрация исходного ОИ  $Y$ . В предположении о наличии в ОИ одного информационного объекта в каждом канале восстанавливается характеристика поведения показателя компактности как функция нижнего значения интенсивности матриц  $U(l_p, M)$  и в точке второго локального максимума характеристики находится пороговое значение интенсивности [1]. Максимальный порядок фильтра и их количество выбираются из ожидаемого пространственного радиуса корреляции фонового излучения.

Минимальное пороговое значение интенсивности ОИ  $l^*$  определяется по максимальному значению интенсивности среди найденных их значений в отдельных каналах. Формирование ОИ  $Y^*$  для дальнейшей обработки осуществляется при найденном пороге интенсивности в прямоугольном сегменте, обрамляющим ОИ  $U(l^*, M)$ .

Найденное представление выбирается в качестве «начальных элементов», которые используются в дальнейшей параллельной обработке.

Реализация деятельности «Фильтрация» основана на сходящейся рекуррентной ранговой фильтрации отдельных пороговых булевых матриц  $Y^*$  при выбранном критерии остановки, который допускает заданное количество несовпадающих элементов двух матриц, полученных на двух последних циклах обработки.

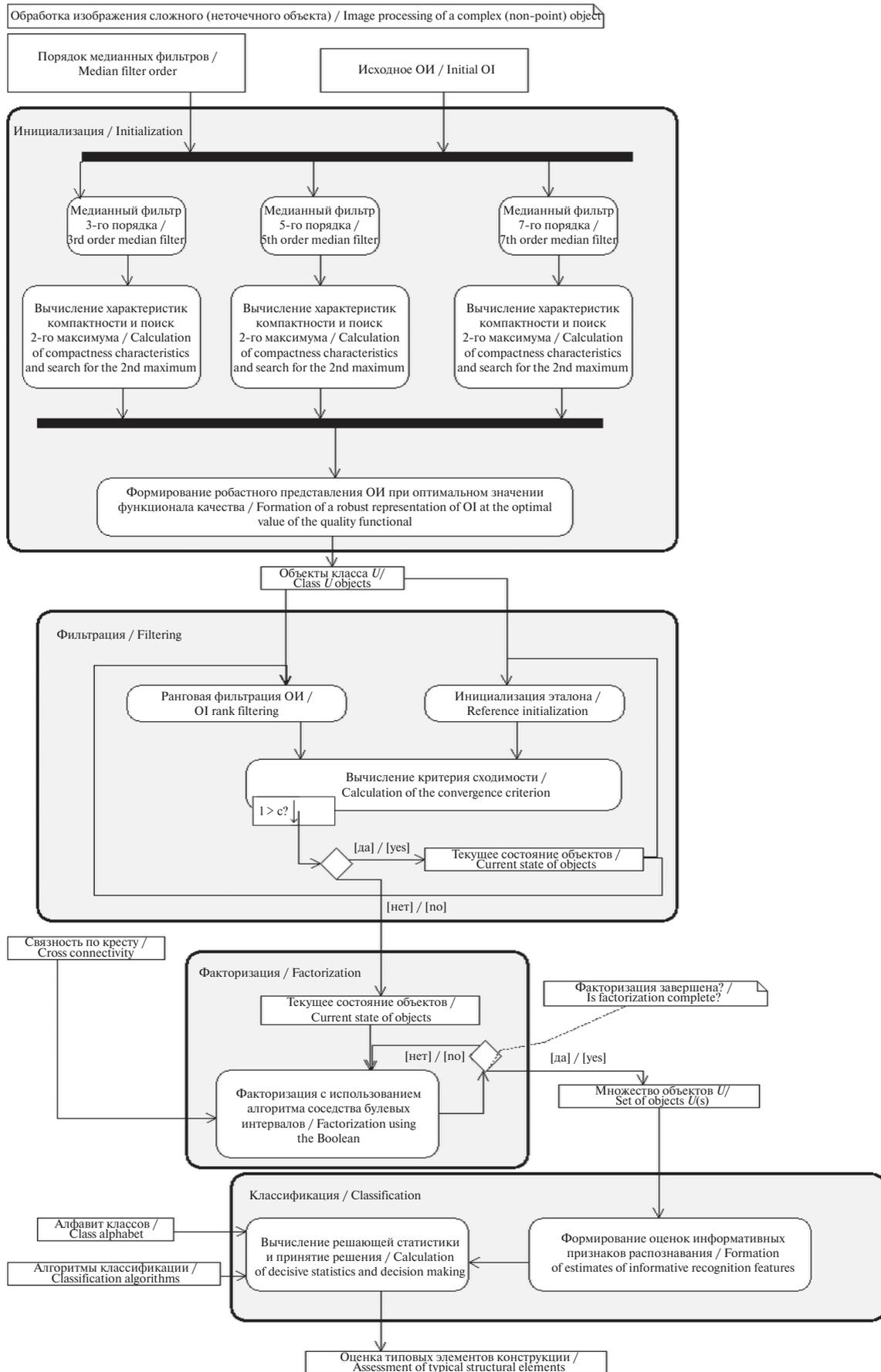


Рисунок 2. Диаграмма деятельности процесса обработки оптического изображения одиночного объекта

Figure 2. Activity diagram of the single object optical image processing

Этап факторизации отфильтрованного ОИ реализуется с использованием бинарного отношения соседства элементов бинарной матрицы «по кресту». Сформированное фактор-множество представляет собой совокупность объектов класса  $U(g)$ .

Реализация деятельности «Классификация» основана на адаптивном байесовом алгоритме независимой проверки дуальтернативных гипотез с возможным отказом от принятия положительного решения и заключается в идентификации выделенных сегментов с использованием совокупности эталонов типовых конструктивных элементов. Выходом являются идентифицированные с эталонами обнаруженные сегменты ОИ.

На рис. 3 приведен пример обработки полученного в натуральных условиях ОИ космического аппарата с международным номером 2008037001 («Персона» – спутник дистанционного зондирования Земли). К числу основных типовых элементов конструкции аппарата следует отнести корпус и четыре солнечных батареи.

Отметим, что изображение аппарата занимает относительно небольшую область исходного снимка, размер которого равен  $512 \times 512$  пикселей. Поэтому на рисунке приведен небольшой сегмент исходного снимка, содержащий изображение аппарата и фона, интенсивность которого сравнима с яркостью элементов конструкции. После инициализации область локализации изображения аппарата выделяется достаточно хорошо, а в процессе фильтрации в данном случае четкость изображения при зрительном восприятии улучшается незначительно. Сегментация в данном случае позволяет выделить четыре элемента конструкции, которые изображены на снимке с использованием различных уровней яркости. Их интерпретация с использованием найденного изображения позволила сделать вывод о наличии на снимке изображений корпуса и трех солнечных панелей.

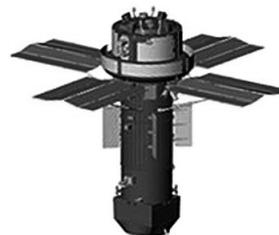
В качестве подтверждения выводов, полученных при зрительном восприятии снимков, в табл. 1 приведены значения вычисленных на разных этапах обработки оценок интегральных показателей изображений в составе информации по Шеннону ( $I$ ) и усредненных по уровням интенсивности числа

линейно связанных областей ( $n$ ), их суммарного периметра ( $p$ ) и коэффициента компактности ( $\mu$ ) [9].

Анализ приведенных в таблице данных позволяет сделать вывод о сглаживании ОИ в процессе фильтрации и упрощении его структуры в результате сегментации.

### Детализация процесса обработки сформированного в барьерном режиме изображения звездного неба

Разработке алгоритмов выделения на ОИ звездного неба изображения трека точечного движущегося объекта и оценки его параметров в настоящее время уделяется большое внимание. В качестве примера приведем работы [10, 11]. Особенность реализации обработки информации в рамках



[https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/persona.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/persona.htm)



Рисунок 3. Результаты обработки изображения космического объекта № 2005024001. Изображение спутника «Персона» доступно по ссылке: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/persona.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/persona.htm). Последовательность изображений в нижнем ряду слева направо получена на следующих этапах обработки: сегмент исходного изображения, инициализация, фильтрация, сегментация

Figure 3. Results of image processing of space object No. 2005024001. The image of the Persona satellite is available at: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/persona.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/persona.htm). The sequence of images in the bottom row from left to right was obtained at the following processing stages: segment of the original image, initialization, filtering, segmentation

Таблица 1. Интегральные показатели структуры оптического изображения  
Table 1. Integral indicators of the optical image structure

№ п/п	Оптическое изображение / Optical image	$I$	$n$	$p$	$\mu$
1	Исходное / The original	6,49	64	265	0,33
2	После инициализации / After initialization	6,45	50	207	0,39
3	После фильтрации / After filtration	5,54	40	185	0,42
4	После сегментации / After segmentation	4,55	3	120	0,56

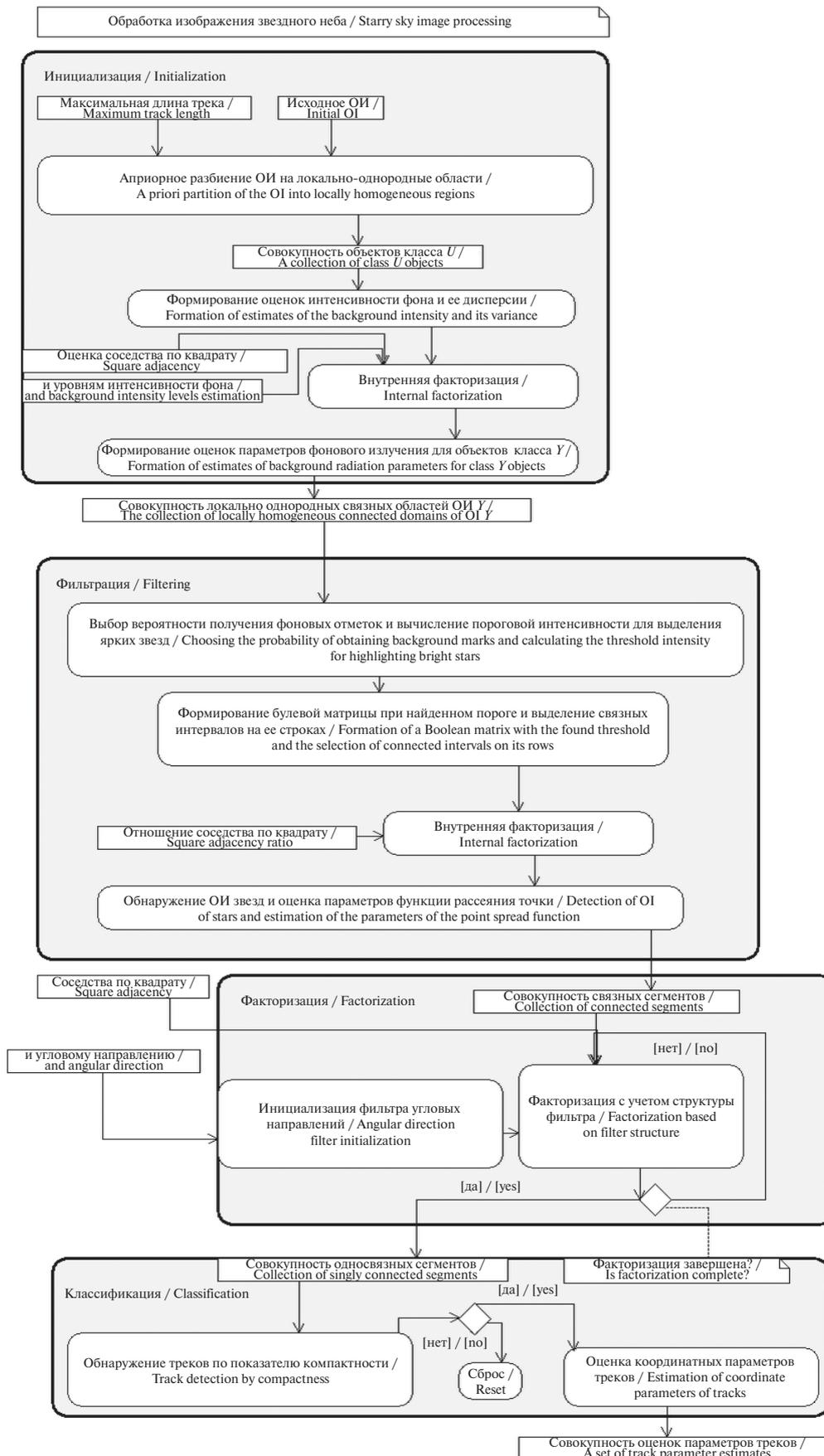


Рисунок 4. Диаграмма деятельности процесса обработки оптического изображения звездного неба, сформированного в барьерном режиме наблюдения  
 Figure 4. Activity diagram of the optical image of the starry sky formed in the barrier observation mode processing

предлагаемого интерфейса заключается в том, что каждый этап деятельности реализуется в рамках предложенного шаблона. Соответствующая диаграмма деятельности приведена на рис. 4, краткая характеристика – ниже. Варианты деятельности предлагаемого интерфейса на каждом этапе обработки условимся называть «внутренними».

На этапе инициализации в предположении справедливости гипотезы о локальной однородности и изотропности фонового излучения решается задача разбиения (факторизации) исходного ОИ  $Y$  на совокупность областей, удовлетворяющих этому условию.

При этом на этапе внутренней инициализации при априори заданном значении максимальной длины трека  $l_m$  формируется априорное разбиение исходного ОИ на совокупность непересекающихся квадратов, размеры которых равны удвоенному значению  $l_m$ .

На этапе внутренней фильтрации в каждой области по гистограмме интенсивности строятся медианные оценки параметров нормального распределения яркости фонового излучения (уровень интенсивности и его дисперсия) в предположении, что основная структура ОИ обусловлена фоном.

Внутреннюю факторизацию исходного разбиения оптического изображения проводим с использованием бинарного отношения соседства выделенных соседних сегментов ОИ и близости их нормальных распределений интенсивностей фонового излучения при найденных оценках параметров.

На этапе внутренней классификации для найденных элементов фактор-множества построим окончательные оценки параметров фонового излучения.

На этапе фильтрации в каждой области оптического изображения решается задача выделения ОИ звезд с оценкой параметров функции рассеяния точки (ФРТ). Начальные элементы – совокупность найденных локально однородных сегментов исходного ОИ с оценкой параметров их фонового излучения.

На этапе внутренней инициализации задается значение вероятности получения ложных фоновых отметок  $p_{лт}$  для формирования пороговой булевой матрицы  $B$  из исходного ОИ. На этапе предварительной фильтрации в  $B$  находим односвязные интервалы значимых пикселей на ее отдельных строках. При внутренней факторизации ОИ  $B$  за отношение соседства принимаем отношение соседства по квадрату. На этапе внутренней классификации решается задача обнаружения на оптическом изображении излучения звезд по критерию попадания значения показателя компактности их ОИ в заданный диапазон, определения параметров

круговой ФРТ  $h(*)$  с последующим исключением их ОИ в анализируемом оптическом изображении.

На этапе факторизации решаем задачу выделения треков в отдельных однородных и изотропных областях. Дополнительная информация – яркость фона и его дисперсия, оценка размеров ФРТ, пороговый уровень интенсивности ожидаемого диапазона длин треков, допустимый минимальный пороговый уровень отношения сигнал/фон  $q_n$ , при котором достигается требуемая вероятность правильного обнаружения трека определенной длины, пороговый уровень яркости трека для выбранного углового направления.

На этапе внутренней инициализации определяем допустимый нижний пороговый уровень интенсивности, при котором формируется представление ОИ с использованием режекторной фильтрации  $Y$  в диапазоне значимых интенсивностей. Формируем фильтр угловых направлений, который представляет собой отрезки прямых в заданных угловых направлениях на ОИ.

Для каждого значимого пикселя  $p$  проводим предварительную фильтрацию, восстанавливая «векторную» угловую диаграмму с использованием алгоритма фильтрации угловых направлений, центр которой располагаем в пикселе  $p$ .

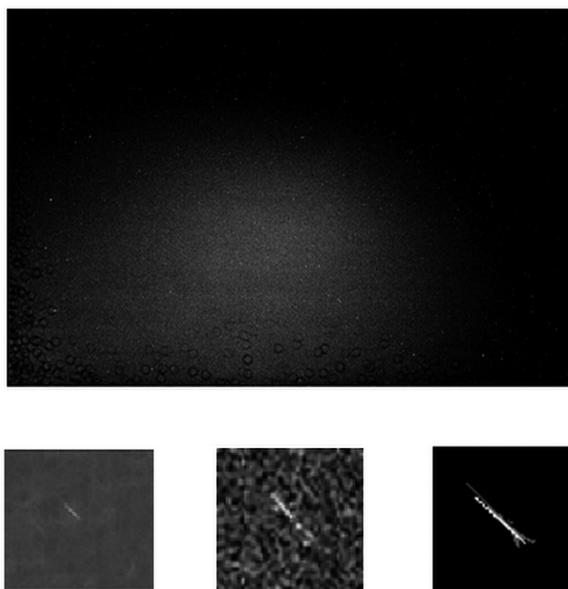


Рисунок 5. Фрагменты изображений: в верхней части рисунка – исходного изображения звездного неба, в нижней части рисунка слева направо: формирования относительного уровня «яркости»; предварительного выделения трека; формирования окончательной оценки  
Figure 5. Fragments of images: in the upper part of the figure – the original image of the starry sky, in the lower part of the figure from left to right: formation of the relative level of «brightness»; preliminary selection of a track; final assessment



Рисунок 6. Диаграмма угловых направлений выделенного трека. Его основные параметры:  $N = 96$ ;  $\hat{\varphi} = 135,56^\circ$ ;  $l = 43,116$ ; ширина трека  $\approx 7,82$  пикселя

Figure 6. Diagram of the angular directions of the selected track. Its main parameters:  $N = 96$ ;  $\hat{\varphi} = 135.56^\circ$ ;  $l = 43.116$ ; track width  $\approx 7.82$  pixels

В результате предварительной фильтрации с каждым пикселем ассоциированы параметры вектора наиболее яркого направления в составе индекса углового направления и яркости выделенного отрезка.

Отношение соседства при внутренней факторизации определяется отношением соседств по квадрату и угловому направлению относительно выделенного «яркого» направления (логическое «И»). В результате факторизации получим фактор множество сегментов, содержащих потенциально возможные треки движущихся объектов.

На этапе «Классификации» решение об обнаружении в элементах фактор множества треков движущихся объектов принимается с использованием соотношения по попаданию оценки показателя компактности выделенного сегмента в априори заданный интервал его возможного изменения. В случае принятия положительного решения методом наименьших квадратов находим оценки наилучших параметров прямых и/или их отрезков, а также корреляционных матриц параметров.

Приведем конкретный вариант выделения трека изображении звездного неба, полученного в натуральных условиях. В верхней части рис. 5 приведен в уменьшенном масштабе фрагмент исходного изображения (его полный размер  $\sim 4000 \times 2500$  пикселей), на котором наблюдается как неоднородность фонового излучения, так наличие изображения ярких звезд.

Более подробно остановимся на приведенных в нижней части рис. 5. изображениях. Слева направо фрагмент ОИ в исходном масштабе, содержащий выделенный в результате обработки трек, после формирования оценок параметров фона в локальной однородной области, фильтрации звезд и предварительного преобразования исходных

значений яркости к относительному максимальному уровню. Следующим приведено увеличенное оптическое изображение предварительно выделенного трека с максимальным числом значимых пикселей на угловом направлении на ОИ, равном  $135,0^\circ$  (подробная гистограмма количества значимых пикселей на угловых направлениях с шагом  $5,6^\circ$  приведена на рис. 6.). Последним приведено увеличенное исходное ОИ с нанесенной окончательной оценкой координат пикселей концевых точек трека.

Приведенный пример, а также другие полученные результаты показали относительно хорошее качество обнаружения и оценки параметров тусклых треков даже в ситуации, когда отношение «сигнал/фон» в единичном пикселе  $q \approx 1$ .

## Выводы

Авторами предложено использовать представление сильно искаженного однобайтового изображения, формируемого в наземных телескопах, в виде совокупности булевых матриц с весами, равными соответствующим уровням интенсивности. Разработан шаблон (интерфейс) обработки ОИ при использовании такого представления, включающий этапы инициализации, фильтрации, факторизации и классификации.

Разработана диаграмма деятельности введенного шаблона, а также его программная реализация на языке Java для решения задач выделения на ОИ типовых элементов конструкции одиночного объекта и обнаружения на изображении звездного неба движущихся точечных объектов с оценкой их координатных параметров.

Приведенные примеры обработки полученных в натуральных условиях сильно искаженных исходных изображений подтверждают возможность решения таких задач с помощью предлагаемых методов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Основные результаты данной работы были обсуждены на научно-технической конференции «VII Репинские чтения» в ПАО «Мак «Вымпел».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проекты № 19-07-00225 А, 19-07-00197 А).

## ACKNOWLEDGMENT

The main results of this work were discussed at the scientific and technical conference «VII Repin Readings» at Vypmel PJSC. This work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (projects No. 19-07-00225 A, 19-07-00197 A).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Методы и алгоритмы полного цикла обработки последетекторного малококонтрастного оптического изображения* / В. В. Лавров, Р. С. Лучкин, О. И. Немыкин, М. Е. Прохоров, Ю. Г. Рындин, В. С. Тюрин // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 3. С. 99–107. DOI 10.21778/2218-5453-2018-3-99-107
2. *Фаулер М.* Архитектура корпоративных программных приложений. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 544 с.
3. *Bass L., Clements P., Kazman R.* Software Architecture in Practice (SEI Series in Software Engineering). Addison-Wesley Professional, 2012, 624 p.
4. *Dennis A., Wixom B. H., Tegarden D.* Systems Analysis and Design: An Object-Oriented Approach with UML. New York, John Wiley & Sons Inc, 2015, 544 p.
5. *Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А.* Язык UML. Руководство пользователя. М.: ДМК, 2000. 496 с.
6. *Фаулер М., Скотт К.* UML в кратком изложении. Применение стандартного языка объектного моделирования. М.: Мир, 1999. 192 с.
7. *Чочиа П. А.* Пирамидальный алгоритм сегментации изображений [Электронный ресурс] // Информационные процессы. 2010. Т. 10, № 1. С. 23–35. URL: <http://www.jip.ru/2010/23-35-2010.pdf> (дата обращения 06.10.2020).
8. *Харинов М. В.* Обобщение трех подходов к оптимальной сегментации цифрового изображения // Труды СПИИРАН. 2013. № 2. С. 294–316.
9. *Milyukova O. P.* On Justification of Image Model // Optical Information Science and Technology (OIST97), Proc. SPIE, 1997, vol. 3348, pp. 283–289.
10. *Колесса А. Е., Репин В. Г.* Робастный адаптивный алгоритм выделения отметок от целей в цифровом изображении. Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/51026878-Robastnyu-adaptivnyy-algoritm-vydeleniya-otmetok-ot-celey-v-cifrovom-izobrazhenii.html> (дата обращения: 06.10.2020).
11. *Chittapur M.* Track-Before-Detect Technique for Mitigating Sea Clutter Based on Hough Transform. *IJCSN International Journal of Computer Science and Network*, 2014, vol. 3, iss. 3, pp. 66–70.

## REFERENCES

1. Lavrov V. V., Luchkin R. S., Nemykin O., Prokhorov M. E., Ryndin Yu. G., Tyurin V. S. Methods and algorithms for the full processing cycle of a post-detector low-contrast optical image. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 3, pp. 99–107. DOI 10.21778 / 2218-5453-2018-3-99-107. (In Russian).
2. Fowler M. *Arkhitektura korporativnykh programmnykh prilozhenii* [Architecture of corporate software applications]. Moscow, Izdatelskii dom «Vilyams» Publ., 2006, 544 p. (In Russian).
3. Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice* (SEI Series in Software Engineering). Addison-Wesley Professional, 2012, 624 p.
4. Dennis A., Wixom B. H., Tegarden D. *Systems Analysis and Design: An Object-Oriented Approach with UML*. New York, John Wiley & Sons Inc, 2015, 544 p.
5. Buch G., Rambo D., Jacobson A. *Yazyk UML. Rukovodstvo polzovatelya* [UML Language. User's manual]. Moscow, DMC publ., 2000, 496 p. (In Russian).
6. Fowler M., Scott C. *UML v kratkom izlozhenii. Primenenie standartnogo yazyka obektnogo modelirovaniya* [UML in summary. Application of the standard language of object modeling]. Moscow, Mir Publ., 1999, 192 p. (In Russian).
7. Chochia P. A. [Pyramidal algorithm for image segmentation]. *Informatsionnye protsessy*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 23–35. (In Russian) Available at: <http://www.jip.ru/2010/23-35-2010.pdf> (accessed 06.10.2020).
8. Kharinov M. V. A generalization of three approaches to an optimal segmentation of the digital image. *Trudy SPIIRAN*, 2013, no. 2, pp. 294–316. (In Russian).
9. Milyukova O. P. On Justification of Image Model. In: *Optical Information Science and Technology (OIST97)*, Proc. SPIE, 1997, vol. 3348, pp. 283–289.
10. Kolesa A. E., Repin V. G. *Robastnyi adaptivnyi algoritm vydeleniya otmetok ot tselei v tsifrovom izobrazhenii. Mezghosudarstvennaya aktsionernaya korporatsiya «Vypmel»* [Robust adaptive algorithm for extracting marks from targets in a digital image Interstate Joint Stock Corporation Vypmel]. (In Russian) Available at: <https://docplayer.ru/51026878-Robastnyu-adaptivnyy-algoritm-vydeleniya-otmetok-ot-celey-v-cifrovom-izobrazhenii.html> (accessed 06.10.2020).
11. Chittapur M. Track-Before-Detect Technique for Mitigating Sea Clutter Based on Hough Transform. *IJCSN International Journal of Computer Science and Network*, 2014, vol. 3, iss. 3, pp. 66–70.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лавров Василий Васильевич**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (916) 904-67-89, e-mail: lavelen@list.ru.

**Лучкин Роман Сергеевич**, к.т.н., начальник сектора, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (916) 303-15-21, e-mail: romluchik@mail.ru.

**Прохоров Максим Евгеньевич**, к.т.н., старший научный сотрудник, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (916) 933-57-81, e-mail: mmaakksss@rambler.ru.

**Рындин Юрий Георгиевич**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (916) 927-06-29, e-mail: yurij.ryndin@yandex.ru.

**Тестов Андрей Всеволодович**, нач. сектора 22/2, ПАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» (ПАО «МАК «Вымпел»), 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: +7 (916) 060-37-91, e-mail: taimen1956@mail.ru.

## AUTHORS

**Vasiliy V. Lavrov**, Ph.D. (Engineering), leading researcher, Vympel PJSC, 1, korp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (916) 904-67-89, e-mail: lavelen@list.ru.

**Roman S. Luchkin**, Ph.D. (Engineering), head of sector, Vympel PJSC, 1, korp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (916) 303-15-21, e-mail: romluchik@mail.ru.

**Maksim E. Prokhorov**, Ph.D. (Engineering), senior researcher, Vympel PJSC, 1, korp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (916) 933-57-81, e-mail: mmaakksss@rambler.ru.

**Yuriy G. Ryndin**, Ph.D. (Engineering), senior researcher, Vympel PJSC, 1, korp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (916) 927-06-29, e-mail: yurij.ryndin@yandex.ru.

**Andrey V. Testov**, head of sector, Vympel PJSC, 1, korp. 10, ulitsa Geroev Panfilovtsev, Moscow, 125480, Russia, tel.: +7 (916) 060-37-91, e-mail: taimen1956@mail.ru.

Поступила 22.04.2020; принята к публикации 06.10.2020; опубликована онлайн 04.12.2020  
Submitted 22.04.2020; revised 06.10.2020; published online 04.12.2020