

Геоинформатика. 2023. № 4. С. 74–80.  
*Geoinformatika*. 2023;(4):74–80.

Методико-технологическое обеспечение сбора и обработки данных

Научная статья

УДК 004.9

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-74-80>

## Использование метода декомпозиции изображений по топологическим признакам для обработки спутниковых снимков

© 2023 г. — Сергей Владимирович Еремеев<sup>a)</sup>, Артём Владимирович Абакумов<sup>b)</sup>, Сергей Андреевич Крайнов<sup>c)</sup>, Алексей Сергеевич Козлов<sup>d)</sup>

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»; Россия, г. Муром

<sup>a)</sup>sv-eremeev@yandex.ru, <sup>b)</sup>artem210966@yandex.ru, <sup>c)</sup>an0nim2020@ya.ru, <sup>d)</sup>alexey-kozlov-dev@yandex.ru

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема интерпретации пространственных данных на спутниковых снимках. Предлагается использовать декомпозицию изображений по топологическим признакам для выделения на спутниковых снимках объектов интереса, а также глобальных и детализирующих структур. Приведено описание метода и особенности его реализации для создания программного продукта с эффективными алгоритмами обработки больших данных. Описан функционал разработанного программного обеспечения, который включает классификацию объектов на спутниковых снимках, сегментацию, бинаризацию, удаление шума. Показано, что эти алгоритмы построены на единой теоретической базе в виде топологической декомпозиции. Продемонстрированы примеры использования программы для сегментации и бинаризации спутниковых снимков из городских кварталов.

**Ключевые слова:** *декомпозиция изображений, спутниковые снимки, топологический анализ данных, сегментация, бинаризация*

Для цитирования: Еремеев С.В., Абакумов А.В., Крайнов С.А., Козлов А.С. Использование метода декомпозиции изображений по топологическим признакам для обработки спутниковых снимков // Геоинформатика. — 2023. — № 4. — С. 74–80. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-74-80>.

Methods and technologies of data acquisition and processing

Original article

## Using the method of image decomposition based on topological features for processing satellite images

© 2023 — Sergey V. Ereemeev<sup>a)</sup>, Artyom V. Abakumov<sup>b)</sup>, Sergey A. Krainov<sup>c)</sup>, Alexey S. Kozlov<sup>d)</sup>

Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; Murom, Russia

<sup>a)</sup>sv-eremeev@yandex.ru, <sup>b)</sup>artem210966@yandex.ru, <sup>c)</sup>an0nim2020@ya.ru, <sup>d)</sup>alexey-kozlov-dev@yandex.ru

**Abstract:** The problem of interpretation of spatial data on satellite images is considered in the article. It is proposed to use the decomposition of images by topological features to highlight objects of interest, global and detailed structures on satellite images. The description of the method and the features of its implementation for creating a software product with effective algorithms for processing big data are given. The functionality of the developed software, which includes the classification of objects on satellite images, segmentation, binarization, noise removal is described. It is shown that these algorithms are built on a single theoretical basis in the form of a topological decomposition. Examples of using the program for segmentation and binarization of satellite images from urban neighborhoods are demonstrated.

**Key words:** *image decomposition, satellite imagery, topological data analysis, segmentation, binarization*

For citation: Ereemeev, S.V. Abakumov A.V., Krainov S.A., Kozlov A.S. Using the method of image decomposition based on topological features for processing satellite images. *Geoinformatika*. 2023;(4):74–80. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-74-80>. In Russ.

### Введение

Проблема интерпретации графических данных охватывает очень обширный круг задач [5, 7] и интерес исследователей по всему миру к этой области каждый год возрастает. Это связано с тем, что сфера практического использования научных разработок по компьютерному пониманию цифровых изображений, 3D поверхностей и векторных данных расширяется, и от промышленных компа-

ний поступают новые запросы по созданию более эффективных и продвинутых подходов в этой области [4, 6].

Для различных классов пространственных данных существуют свои особенности их представления в компьютерном виде. Для описания одного и того же географического пространства могут быть использованы принципиально различные подходы представления информации. Полученные

результаты интерпретации данных можно использовать, например, для автоматического разбиения пространственных объектов по некоторым категориям. Так, в сельском хозяйстве — для оценки роста культур, в экологии — для оценки заболоченности местности и вырубки лесов, в сфере строительства — для мониторинга застройки зданий и анализа ветхого жилья и т.д. Этот ряд задач охватывает все больше областей в самых различных сферах деятельности человека. Данные задачи являются актуальными и сложными в силу наличия в них характерных особенностей [1].

Также затрудняет решение этих проблем отсутствие полноты исходных данных, их неоднородность, искаженность. Для снимков с летательных аппаратов это могут быть загрязнение камеры, солнечные блики, затемнение объектов территории, наложение теней от других пространственных объектов, наложение объектов друг на друга и т.д. Далеко не все существующие методы способны показать приемлемый результат при возникновении определенных деформаций исходных данных. В то же время промышленные и научные организации выдвигают все более высокие требования к пониманию пространственной информации за счет создания более устойчивых методов, чтобы корректно обрабатывать данные для решения своих задач.

Таким образом, в настоящее время активно разрабатываются разные подходы для интерпретации пространственных данных со своими достоинствами и недостатками. В связи с актуальностью проблемы и трудностями использования классических методов в данной работе предложен принципиально другой вектор развития для обработки спутниковых снимков, а именно использование декомпозиции изображений по топологическим признакам.

Целью статьи является разработка программного продукта для обработки спутниковых снимков, в основу которого заложен метод топологической декомпозиции изображений.

### **Описание метода декомпозиции изображений по топологическим признакам**

Под декомпозицией изображения по топологическим признакам будем понимать его разбиение на отдельные структуры, которые соответствуют объектам интереса, с возможностью обратного восстановления. Математические основы этого подхода были предложены нами в работах [2, 3]. Кратко опишем в этом пункте идею метода и покажем детали реализации для быстрой обработки высокоточных изображений.

Рассмотрим входное растровое изображение, которое может быть полутоновым, цветным или картой высот. Суть метода заключается в следующем. Необходимо в определенной последовательности обработать каждый пиксель. При обработке на месте пикселя образуется компонента, которая

представляет собой определенную структуру, состоящую из пикселей. К компоненте может присоединиться один или несколько соседних пикселей. При соединении одна компонента поглощает другую. В конце такого процесса образуется древовидная структура.

При реализации на первом этапе необходимо отсортировать пиксели изображения по яркости от максимального значения к минимальному и соединять их в этом отсортированном порядке. То есть, если представить снимок в виде 3D объекта, то метод будет производить срез для пикселей на каждой яркости. На срезах могут появляться новые компоненты, а также происходить их слияние. Приоритет при соединении у той компоненты, которая появилась раньше. Визуально это демонстрируется на рисунке 1.

Для обработки цветных изображений RGB-цвет переводится в полутоновый. В итоге пиксели с яркостью от 0 до 255 выстраиваются в столбец по убыванию.

Стоит учесть, что необходимо хранить не сами отсортированные яркости пикселей, а их индексы, чтобы можно было анализировать зону вокруг.

Использование 256 цветов позволяет реализовать сортировку подсчетом со сложностью  $O(n \times m)$ , где  $n$ ,  $m$  — количество строк и столбцов изображения. Для этого формируется массив  $S[k]$  размером 256, заполненный сначала нулями. Элементы  $S[k]$  ( $k=0,1,2,\dots,255$ ) обновляются при построчном считывании значения каждого пикселя по формуле:  $S[A[i][j]] = S[A[i][j]] + 1$  ( $i = 0,1,\dots,n-1; j = 0,1,\dots,m-1$ ), где  $A[i][j]$  — значение пикселя изображения  $A$  в точке с координатами  $(i, j)$ . В итоге, чтобы получить отсортированный столбец размером  $(n \times m)$  необходимо выписать последовательно из массива  $S$  каждый элемент  $S[k]$  раз.

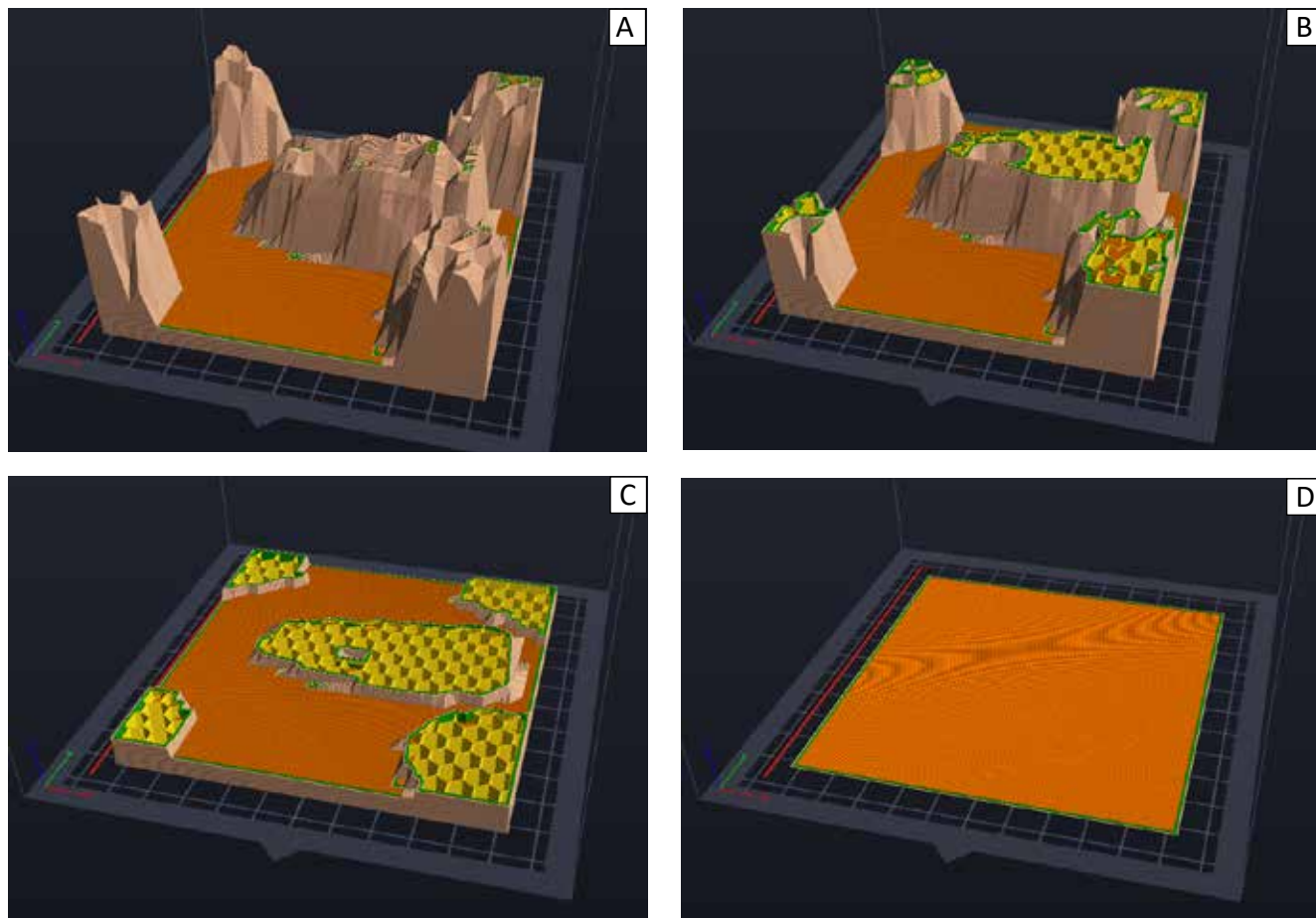
Далее за один цикл обрабатываем отсортированные индексы и для каждого пикселя анализируем его соседей. Для хранения компонент используем массив, размер которого равен количеству всех пикселей в изображении. Проверяется окрестность Мура вокруг пикселя: если среди соседей не найдено компоненты, то она создается на месте текущего пикселя, иначе к ней присоединяется текущий пиксель. Если найдено больше одной компоненты, то они соединятся. Благодаря индексам сложность проверки существования компоненты по соседнему индексу будет  $O(1)$ .

В итоге получится набор компонент, содержащих поглощенные пиксели. Их можно представить в виде матриц. Таким образом, они отражают структуру изображения, т.е. объекты интереса.

Кроме того, при формировании компонент будем рассматривать 5 признаков: глубина объекта в иерархическом древе, показатели начала, длины и

**Рис. 1.** Пример построения и слияния компонент при различных срезах изображения (отмечены желтым): А — начальное формирование компонент; В — образование более крупных структур; С — четко выраженные пять компонент; D — объединение всех компонент в одну

*Fig. 1.* An example of constructing and merging components for different image sections (marked in yellow): A — initial formation of components; B — formation of larger structures; C — clearly defined five components; D — combining all components into one



конца существования компоненты, а также количество пикселей в компоненте.

Длина компоненты представляет собой количество значений яркости от начала ее существования до ее поглощения другой компонентой. В зависимости от длины возможно разделить все компоненты на два вида: глобальные структуры и детали, т.е. получить два изображения в виде двух матриц, алгебраическое сложение которых даст исходное изображение.

Таким образом, в результате рассмотренного процесса формирования компонент мы получаем декомпозицию изображения, которая сводится к разбиению исходного изображения на отдельные изображения, каждое из которых соответствует отдельному объекту интереса. Эти изображения можно сгруппировать путем сложения значений их пикселей, выделив глобальные и детализирующие структуры.

### Функционал программного продукта

Для создания программного продукта использован язык C++, так как он обеспечивает высокую производительность. Для графического интерфейса использовалась библиотека ImGui. По сравнению с аналогами (QT, GTK) ImGui достаточно легковесен, а главное — с ним легко удастся отделить бизнес-логику. Также он позволяет с легкостью менять способ отрисовки, если она не поддерживается в системе.

После выбора изображения программа позволяет указать систему координат и вариант разбиения на тайлы, если снимок слишком большой. Для ускорения обработки доступна многопоточность.

Программный продукт содержит графический интерфейс для загрузки изображения, анализа структур после декомпозиции, загрузки компонент в классификатор, классификации, сегментации, бинаризации, удаления шума.

Рис. 2. Слой с построенными компонентами

Fig. 2. Layer with built components

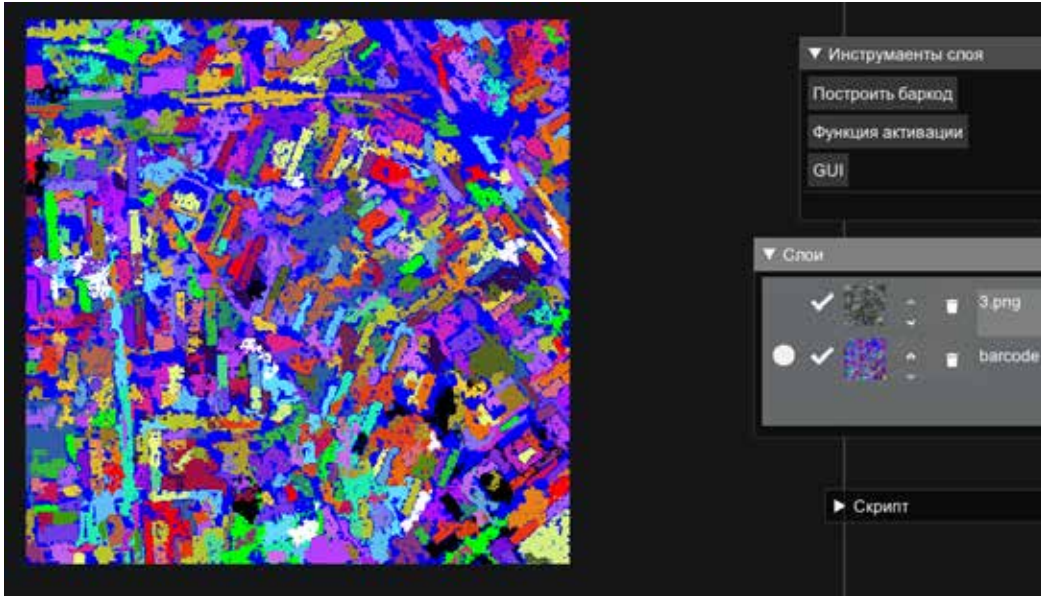
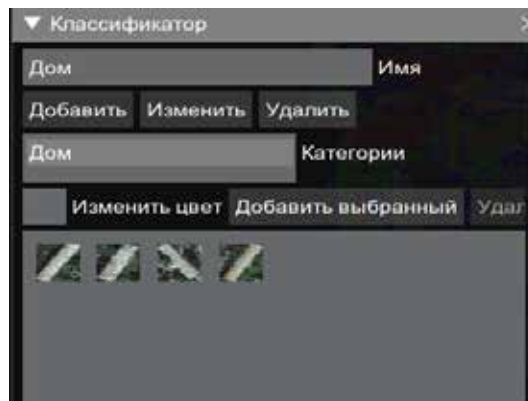


Рис. 3. Создание обучающей выборки

Fig. 3. Creating a training sample



В качестве примера покажем слой со всеми встроенными компонентами (рис. 2).

При необходимости можно использовать классификатор и составить обучающую выборку, как показано на рисунке 3. Дальнейшие шаги зависят от пользователя. При загрузке новых изображений они добавляются в проект, и на них можно использовать уже обученный классификатор. Результат в виде векторных слоев можно выгрузить в геоинформационные системы, например, в QGIS.

Весь функционал построен на топологической декомпозиции. По входным данным строятся компоненты в виде матриц разложения. К каждой компоненте принадлежат определенные пиксели. Эти компоненты и выделяются в отдельные сегменты. При этом происходит отсеивание по заданным при

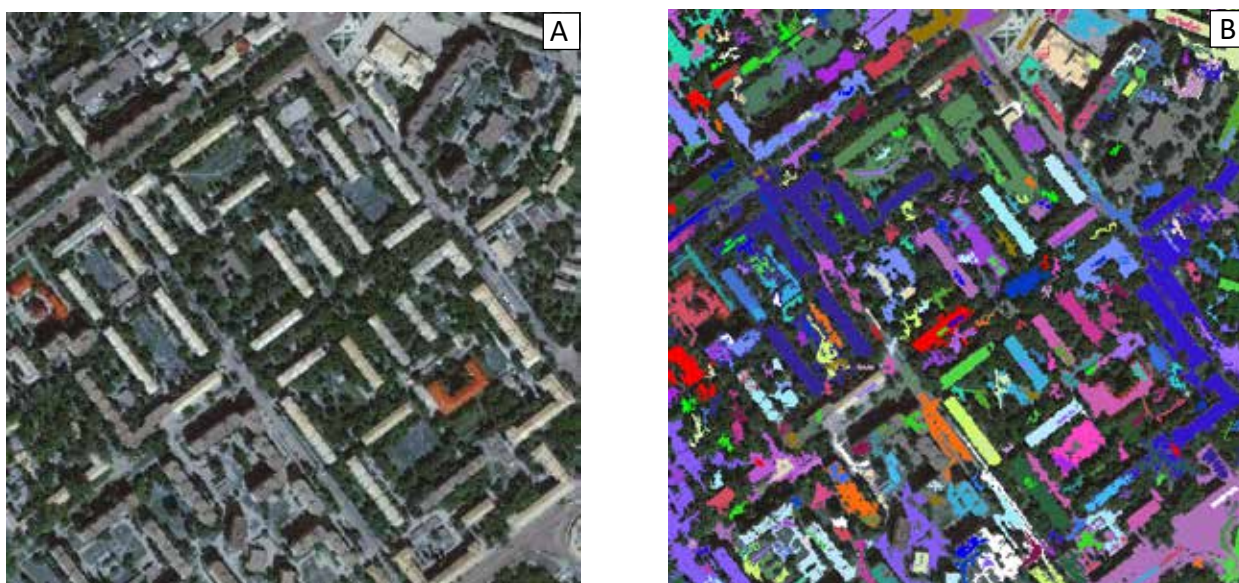
запуске программы параметрам. Настройка включает как топологические признаки, например, длину существования компонент, так и геометрические, к примеру, размер областей.

Покажем несколько примеров сегментации для спутниковых снимков городских кварталов. На рисунке 4 показан пример выделения объектов интереса в виде зданий. Каждое здание соответствует компоненте при декомпозиции изображения. Это позволяет выделить объекты интереса с заданными топологическими и геометрическими свойствами.

Покажем также на рисунке 5 еще один функционал разработанного программного продукта в виде бинарной сегментации в сравнении с аналогами.

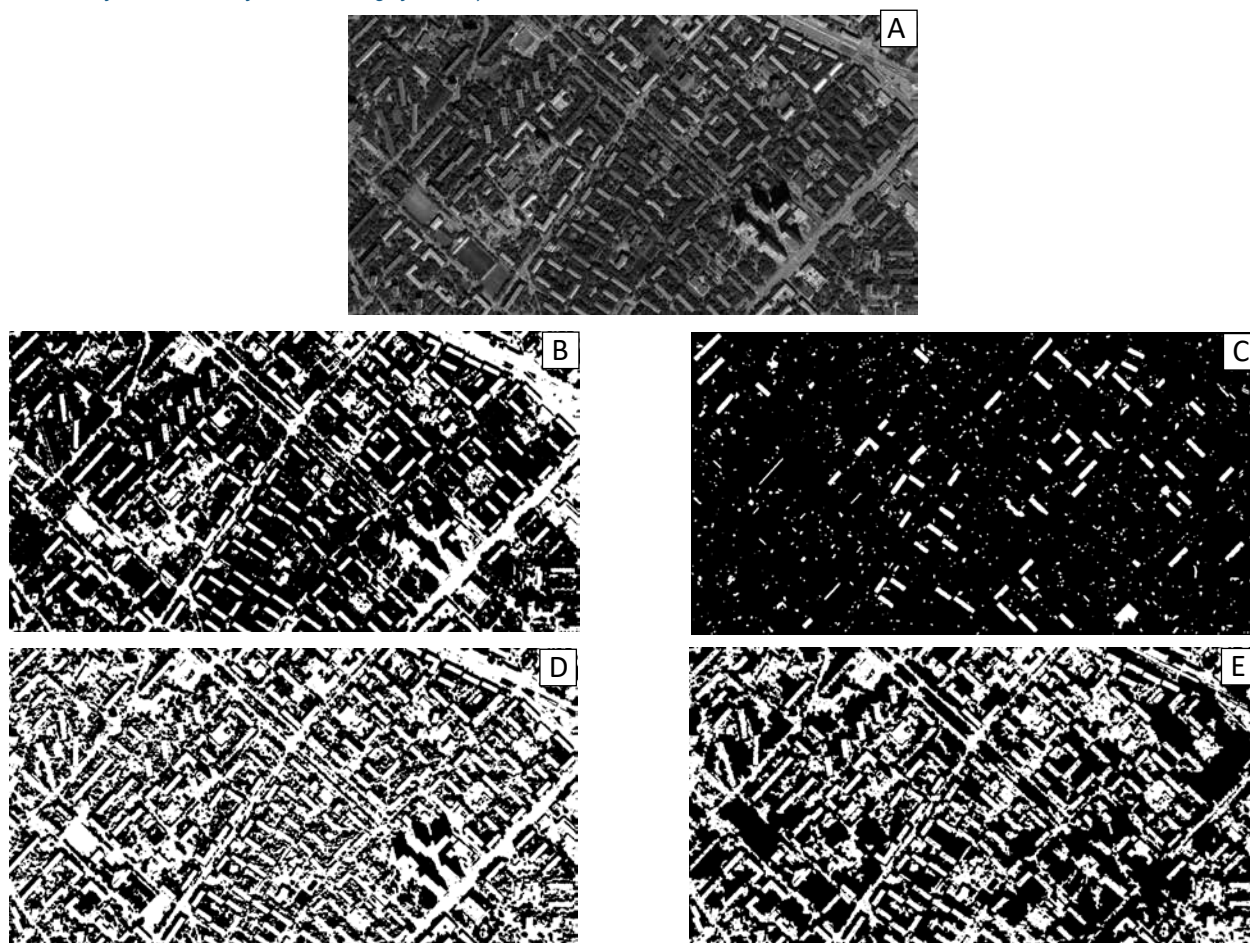
**Рис. 4.** Результат сегментации: А — исходное изображение; В — выделение объектов интереса по топологическим и геометрическим признакам

*Fig. 4. Segmentation result: A — original image; B — identification of objects of interest based on topological and geometric characteristics*



**Рис. 5.** Результат бинаризации спутникового снимка из городских кварталов

*Fig. 5. Result of binarization of satellite image from city blocks*



A — исходное изображение; В — K-средних; С — детектор границ Кэнни; D — адаптивная бинаризация; E — предложенный подход  
A — original image; B — K-means; C — Canny edge detector; D — adaptive binarization; E — proposed approach

Функции программного продукта предоставляют пользователю инструменты для обработки спутниковых снимков, которые вполне способны конкурировать с существующими подходами. Отличительной особенностью функционала является использование единой теоретической базы, а именно декомпозиции изображения по топологическим признакам на отдельные структуры.

### Заключение

В статье показано использование метода декомпозиции по топологическим признакам для

обработки спутниковых снимков. Основными возможностями разработанной программной системы являются: классификация изображений, сегментация, бинаризация, удаление шума. Разложение изображения на отдельные структуры позволяет получить топологические признаки, которые применяются в алгоритмах программного продукта. В дальнейшем состав функциональных возможностей может быть расширен при решении практических задач обработки графических данных. Программный продукт размещен по ссылке: <https://github.com/Noremos/SatHomology>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10064, <https://rscf.ru/project/23-21-10064/>.

### Список источников

1. Вагизов М.Р., Витлев К.А., Соколов А.Г., Попов А.И., Самсонов В.А., Макаров К.А. Методика применения программного продукта Wolfram Mathematica для геоинформационного моделирования лесных экосистем // Геоинформатика. – 2023. – № 2. – С. 49–56. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-2-49-56.
2. Еремеев С.В., Абакумов А.В., Андрианов Д.Е., Ширабакина Т.А. Метод векторизации спутниковых снимков на основе их разложения по топологическим особенностям // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22. – № 1. – С.110–145. DOI: 10.15622/ia.22.1.5.
3. Еремеев С.В., Абакумов А.В., Андрианов Д.Е., Титов Д.В. Метод разложения изображения по топологическим признакам // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46. – № 6. – С. 939–947. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1080.
4. Hu X., Qian Y., Pickett S.T., Zhou W. Urban mapping needs up-to-date approaches to provide diverse perspectives of current urbanization: A novel attempt to map urban areas with nighttime light data // Landscape and Urban Planning. – 2020. – Vol. 195. – 103709. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103709.
5. Kansakar P., Hossain F. A review of applications of satellite Earth observation data for global societal benefit and stewardship of planet Earth // Space Policy. – 2016. – Vol. 36. – P. 46–54. DOI: 10.1016/j.spacepol.2016.05.005.
6. Osco L.P., Junior J.M., Ramos A.P.M., de Castro Jorge L.A., Fatholahi S.N., de Andrade Silva J., Matsubara E.T., Pistori H., Gonçalves W.N., Li J. A review on deep learning in UAV remote sensing // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – Vol. 102. – 102456. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102456.
7. Zhao Q., Yu L., Du Z., Peng D., Hao P., Zhang Y., Gong P. An overview of the applications of Earth observation satellite data: Impacts and future trends // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – Iss. 8. – 1863. DOI: 10.3390/rs14081863.

### References

1. Vagizov M.R., Vitlev K.A., Sokolov A.G., Popov A.I., Samsonov V.A., Makarov K.A. Application of wolfram mathematica for geoinformation modeling of forest ecosystems. *Geoinformatika*. 2023;(2):49–56. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-2-49-56.
2. Eremeev S.V., Abakumov A.V., Andrianov D.E., Shirabakina T.A. Vectorization method of satellite images based on their decomposition by topological features. *Informatics and Automation*. 2023;22(1):110–145. DOI: 10.15622/ia.22.1.5.
3. Eremeev S.V., Abakumov A.V., Andrianov D.E., Titov D.V. Image decomposition method by topological features. *Computer Optics*. 2022;46(6):939–947. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1080.
4. Hu X., Qian Y., Pickett S.T., Zhou W. Urban mapping needs up-to-date approaches to provide diverse perspectives of current urbanization: A novel attempt to map urban areas with nighttime light data. *Landscape and Urban Planning*. 2020;195:103709. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103709.
5. Kansakar P., Hossain F. A review of applications of satellite Earth observation data for global societal benefit and stewardship of planet Earth. *Space Policy*. 2016;36:46–54. DOI: 10.1016/j.spacepol.2016.05.005.
6. Osco L.P., Junior J.M., Ramos A.P.M., de Castro Jorge L.A., Fatholahi S.N., de Andrade Silva J., Matsubara E.T., Pistori H., Gonçalves W.N., Li J. A Review on deep learning in UAV remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021;102:102456. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102456.
7. Zhao Q., Yu L., Du Z., Peng D., Hao P., Zhang Y., Gong P. An overview of the applications of Earth observation satellite data: Impacts and future trends. *Remote Sensing*. 2022;14(8):1863. DOI: 10.3390/rs14081863.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023, одобрена после рецензирования 08.12.2023, принята к публикации 12.12.2023.  
The article was submitted 20.09.2023; approved after reviewing 08.12.2023; accepted for publication 12.12.2023.

## Информация об авторах

### Еремеев Сергей Владимирович

Кандидат технических наук

Доцент кафедры «Информационные системы»

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264 Муром, ул. Орловская, д. 23

e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

AuthorID: 618264

### Абакумов Артём Владимирович

Аспирант кафедры «Информационные системы»

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264 Муром, ул. Орловская, д. 23

e-mail: artem210966@yandex.ru

### Крайнов Сергей Андреевич

Студент кафедры «Информационные системы»

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264 Муром, ул. Орловская, д. 23

e-mail: an0nim2020@ya.ru

### Козлов Алексей Сергеевич

Студент кафедры «Информационные системы»

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264 Муром, ул. Орловская, д. 23

e-mail: alexey-kozlov-dev@yandex.ru

## Information about authors

### Sergey V. Eremeev

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

The senior lecturer of the Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

23, Orlova Str., Murom, 602264, Russia

e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

AuthorID: 618264

### Artyom V. Abakumov

Graduate student of the Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

23, Orlova Str., Murom, 602264, Russia

e-mail: artem210966@yandex.ru

### Sergey A. Krainov

Student of the Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

23, Orlova Str., Murom, 602264, Russia

e-mail: an0nim2020@ya.ru

### Alexey S. Kozlov

Student of the Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

23, Orlova Str., Murom, 602264, Russia

e-mail: alexey-kozlov-dev@yandex.ru