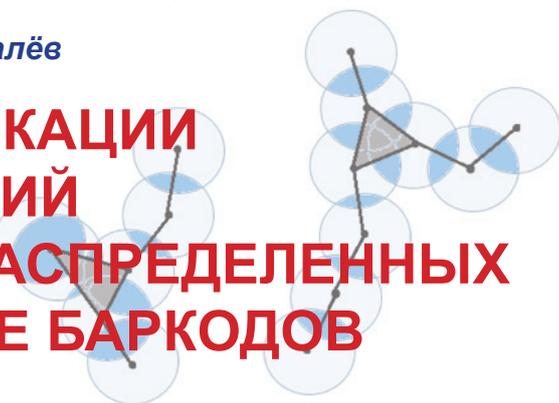


*С.В. Еремеев, Д.Е. Андрианов, Ю.А. Ковалёв*

# АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ЭВОЛЮЦИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ БАРКОДОВ



## Введение

В настоящее время все большую популярность при построении геоинформационных систем (ГИС) принимают векторные модели данных, которым требуется на порядок меньше памяти для хранения и значительно сокращается время обработки. Векторная модель данных ГИС отображает пространственные данные как совокупность следующих основных частей: геометрические (метрические) объекты (точки, линии и полигоны); атрибуты – признаки, связанные с объектами; топологические характеристики структуры объектов и их взаимное положение [1].

Сейчас отслеживание изменений данных объектов и последующее построение измененных объектов происходит на основе их геометрических признаков, которые игнорируют топологию данного объекта, либо отслеживание изменений происходит на основе топологических признаков, которые вычисляются значительно дольше либо с определенными потерями качества объектов.

Для решения задач поиска изменений объектов широкое применение получили следующие алгоритмы [2]:

- 1) *Алгоритм на основе метода главных компонент.* В алгоритме строится маска изменений объектов. Для этого необходимо произвести пороговую обработку отобранного изображения (главной компоненты), соответствующего меньшему собственному значению. Следует отметить, что основная сложность описанного подхода состоит в определении конкретных главных компонент, определяющих изменения, без выполнения визуального анализа.
- 2) *Алгоритм «Wallflower» на основе винеровской фильтрации.* Данный алгоритм предназначен для анализа последовательности изображений и заключается в последовательном применении следующих шагов: пиксельный анализ данных, анализ данных на уровне областей изображений, анализ данных на уровне изображений.

- 3) *Алгоритм Ли на основе выделения прямолинейных сегментов.* Данный алгоритм предназначен для выделения изменений по двум изображениям, являющимся космическими снимками городских сцен. Он основан на выделении прямолинейных сегментов на обоих изображениях и сравнении их друг с другом. Такой подход обуславливает слабую зависимость результатов от общего уровня освещенности, а также от локальной яркости небольших групп объектов. Наиболее качественное выделение осуществляется по снимкам частично застроенных территорий, содержащих как здания и дороги, так и ровные участки местности.

- 4) *Алгоритм CUSUM (кумулятивная сумма)* – это хорошо известный алгоритм обнаружения изменений, который был первоначально разработан в области управления процессами. Метод обнаружения аномалий CUSUM основан на статистическом управлении. Он используется для обнаружения аномальных последовательностей временных рядов, которые показывают тонкие сдвиги в среднем относительно контекста самой последовательности. Классический алгоритм CUSUM оптимален для обнаружения небольших постоянных изменений в сигналах [3].

Среди рассмотренных алгоритмов наиболее качественные результаты показал алгоритм Ли, в котором берутся за основу не яркости пикселей, а границы областей. Однако для широкого применения его для анализа сложных сцен необходимо улучшить процедуру учета изменения ракурса съемки, а также процедуру построения итоговой маски изменения по изменившимся сегментам.

Актуальность работы заключается в том, что, в отличие от существующих алгоритмов обработки геообъектов, будет использоваться персистентная гомология, которая позволяет сформировать числовое описание внутренней и внешней топологии объекта в виде Баркодов [4]. Это позволит анализировать

объекты на разных масштабах с учетом эволюции объекта во времени.

Авторами статьи описывается подход для представления геообъектов на основе Баркодов и анализа их изменений.

### Алгоритм поиска различий у пространственных объектов, изменяемых во времени, на основе Баркода

В работе поиска различий пространственных объектов используется комплекс Чеха. Это теория алгебраической топологии, которая базируется на свойствах топологических пространств. Данный алгоритм удобен в случае обнаружения изменения у пространственных объектов. В алгебраической топологии и анализе топологических данных комплекс Чеха представляет собой абстрактный симплициальный комплекс, построенный из облака точек в любом топологическом пространстве, предназначенном для захвата топологической информации об окружностях вокруг точек или распределении, из которого он сделан [5].

### Построение Баркода для пространственного объекта

Алгоритм поиска различий у пространственных объектов, изменяемых во времени, на основе Баркода позволяет установить топологическую связь между точками, так как она зависит от параметров. В отличие от геометрических, топологические характеристики не зависят от расположения объектов. Основным параметром будет радиус окружности, которая строится вокруг точек объектов. При увеличении радиусов комплексы меняются, но сама топология сохраняется. Это позволит обращаться к одним и тем же объектам при их изменении в разные временные промежутки, а также при обращении к ним на разных масштабах.

Баркод  $B$  для векторных объектов строится следующим образом:

1. На вход подается векторное изображение.
2. Из каждой точки объекта порождается окружность. Их объединение представляет собой множество точек на расстоянии. Радиус окружности  $r$  увеличивается постепенно.
3. Если две точки попадают в соприкосновение их окружностей, то они являются компонентой  $K$  (ребром) [6, 7, 8, 9]. Компоненты связности и их объединения показаны на рис. 1:
4. Производится поиск двух пар точек, отрезки которых образуют в совокупности с построенными триангуляциями фигуру. Они соединяются отрезками, и один из полученных отрезков выбирается как начало для последующего

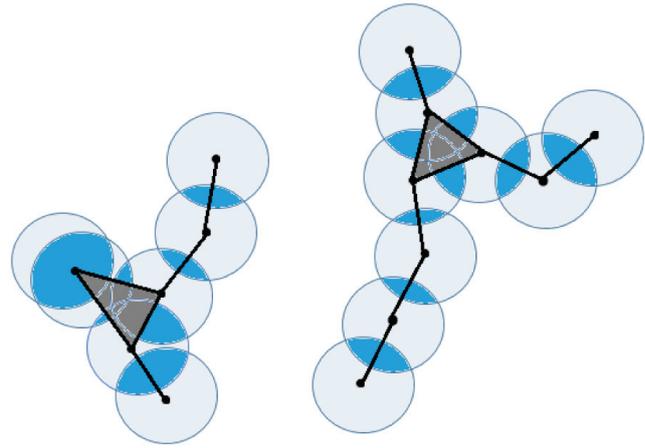


Рис. 1. Компоненты связности  
Fig. 1. Components of connectedness

обхода. Радиус окружности вокруг точки увеличивается до тех пор, пока окружности не пересекутся. С найденной точкой соединяется та точка отрезка, которая не была с ней соединена. Полученный отрезок проверяется на пересечение с уже существующими отрезками триангуляции, и в случае пересечения они удаляются из триангуляции. В результате образуется дыра  $D$ .

5. Далее идет проверка на принадлежность ребра хотя бы одной дыре.
6. Если ребро принадлежит дыре, то происходит еще одна проверка на принадлежность ребра еще одной дыре. Если такая дыра находится, то ребро соединяет две дыры. Пример объединения и построенного Баркода объекта, отображенного на рис. 1, показан на рис. 2.

На рис. 2 отражен Баркод объекта  $B = \{(x_i, l_i)\}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$  – номер дыры;  $n$  – количество дыр;  $x_i$  – это координата начала дыры Баркода объекта, а  $l_i$  – это длина дыры Баркода объекта. На оси  $x$  отражена длина Баркода, а на оси  $y$  указан радиус Баркода [10, 11, 12].

7. При объединении большая дыра поглощает меньшую, большей дыре присваиваем все точки и ребра пропавшей дыры, а из пропавшей дыры удаляются все ребра и точки [13, 14].
8. Пропавшей дыре назначается время ее существования и ее поглощения.
9. В конце цикла должна образоваться одна дыра. На основании полученных выше дыр получается Баркод.

Далее вычисляются Баркоды для всех объектов на векторной карте для всех временных промежутков. Примеры объектов, видоизменяющихся во времени, отображены на рисунке 3а, б.

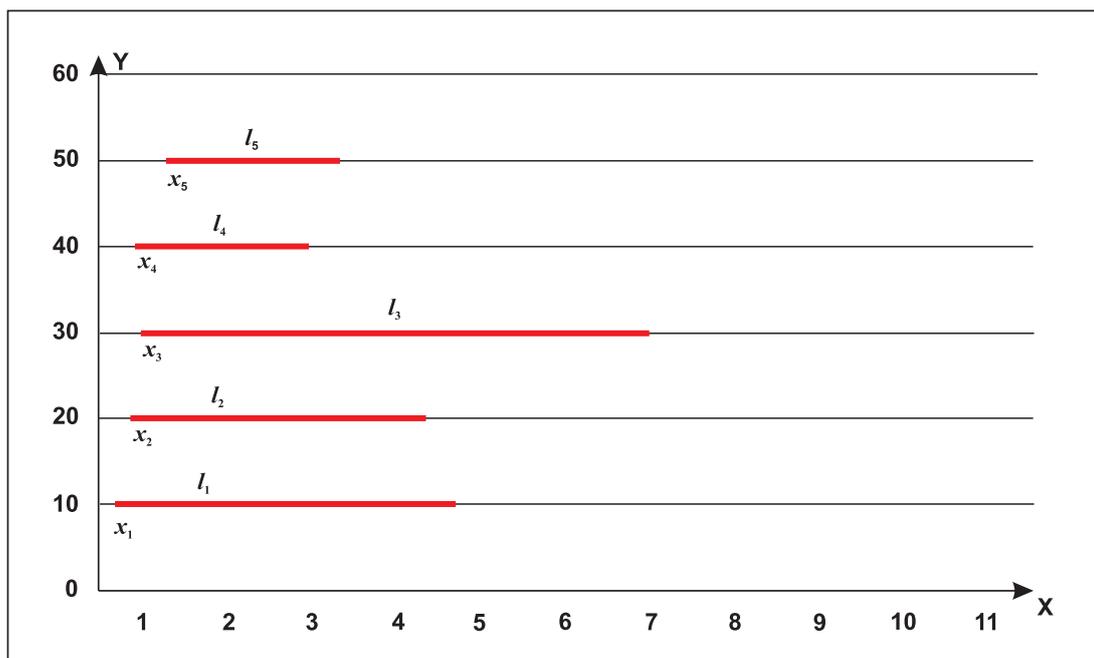


Рис. 2. Схема отображения Баркода объекта

Fig. 2. Object Barode display scheme

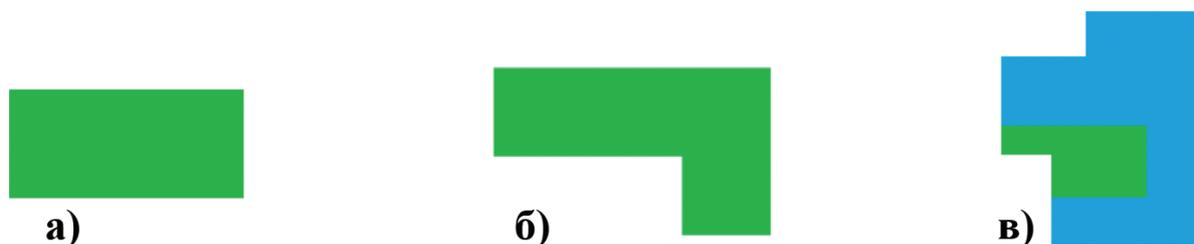


Рис. 3. Тестовые изображения: а) – объект в начальном состоянии, б) – объект в измененном состоянии, в) – объект, в котором был частично удален первоначальный объект

Fig. 3. Test images: а) – an object in the initial state, б) – an object in an altered state, в) – an object in which the original object was partially removed

Также в реализации алгоритма рассматривается вариант, если первоначальный объект был частично удален. Пример такого объекта отображен на рис. 3в. Для этого случая введена дополнительная проверка, в которой происходит поиск значений максимального и минимального  $x$  и сопутствующих им координат  $y$  и максимального и минимального  $y$  и сопутствующих им координат  $x$  ( $y$  измененного объекта).

**Вычисление различий пространственных объектов на основе Баркода**

Пусть  $X, Y$  – это пространственные объекты, состоящие из последовательности точек  $(x, y)$ .

Тогда  $B(X) = \{(x_i^X, l_i^X)\}$  и  $B(Y) = \{(x_j^Y, l_j^Y)\}$ , где  $(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$  являются номерами

дыр, а  $n$  и  $m$  – количество дыр. Это Баркоды первого и второго объектов соответственно.

В результате  $P = X - Y$  является разностью объектов, которые представляют набор координат:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ , где точка  $p_i = (x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ), а  $k$  – это количество точек.

Значит  $X = \{p_1^X, p_2^X, \dots, p_q^X\}$ , и  $Y = \{p_1^Y, p_2^Y, \dots, p_s^Y\}$ , где  $q$  и  $s$  – это количество точек пространственных объектов  $X, Y$ .

Для каждой линии Баркода происходит вычисление координат  $p_{\alpha_1}, p_{\alpha_2}, \dots, p_{\alpha_t}$ , которые образуют дыру  $D = (x, l)$ . Функция  $f$  находит значения координат объектов по их Баркодам:

$$f(x, l) = \{p_{\alpha_1}, p_{\alpha_2}, \dots, p_{\alpha_t}\},$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_t \in N, N$  – это множество натуральных чисел,  $t$  – количество точек.

Отсюда можно вычислить множество точек, равное объединению Баркодов пространственных объектов:

$$X = \bigcup_{i=1}^n f(x_i^X, l_i^X); \quad Y = \bigcup_{j=1}^m f(x_j^Y, l_j^Y).$$

То есть для каждой линии Баркода находится функция  $f$ , которая определяет точки, образующие эту дыру. Затем все эти точки объединяются по всем линиям Баркода, и в результате получается исходный объект, в данном случае  $X, Y$ .

Рассмотрим все варианты формирования точек для результирующего объекта.

Просматриваются все дыры Баркода и находятся отличия через следующие условия:

1. Если линии Баркода 1 и 2 на рис. 4а перекрываются, то набор точек  $P = \{\emptyset\}$ .
2. Если линии Баркода 1 и 2 на рис. 4б находятся рядом и не соприкасаются, тогда набор точек  $P$  будет содержать все координаты этих линий и будет выглядеть следующим образом:

$$P = f(x_1^X, l_1^X) \cup f(x_2^Y, l_2^Y).$$

3. Если линии Баркода 1 и 2 на рис. 4в, г соприкасаются или частично перекрывают друг друга, то набор точек  $P$  будет состоять из симметрической разности координат:

$$P = f(x_1^X, l_1^X) \Delta f(x_2^Y, l_2^Y).$$

4. Если присутствует только одна линия, отображенная на рис. 4д, то координаты данного объекта записываются в набор точек  $P = f(x_1^X, l_1^X)$ .

Затем вычисляется разность данных Баркодов  $\Delta B$  по формуле:

$$\Delta B = \{(x_k^\Delta, l_k^\Delta)\},$$

$x_k^\Delta$  – это множество координат начала измененного Баркода, а  $l_k^\Delta$  – это разница длин дыр у первого и второго Баркодов, где  $k=1, 2, \dots, z$  – номер дыры,  $z$  – это количество дыр, которые имеют различия между первым и вторым Баркодом.

Тогда координаты точек изменений вычисляются по формуле:

$$P = \bigcup_{k=1}^z f(x_k^\Delta, l_k^\Delta).$$

Данный набор координат позволяет отобразить видеоизменение данных объектов во времени. Пример видеоизменения отображен на рис. 5.

На рис. 5 зеленым цветом отображено первоначальное состояние объекта, а синим цветом его изменение через определенный промежуток времени.

Данный алгоритм позволяет отображать изменения на картах в разные временные промежутки. Например, обработка карты за разные годы.

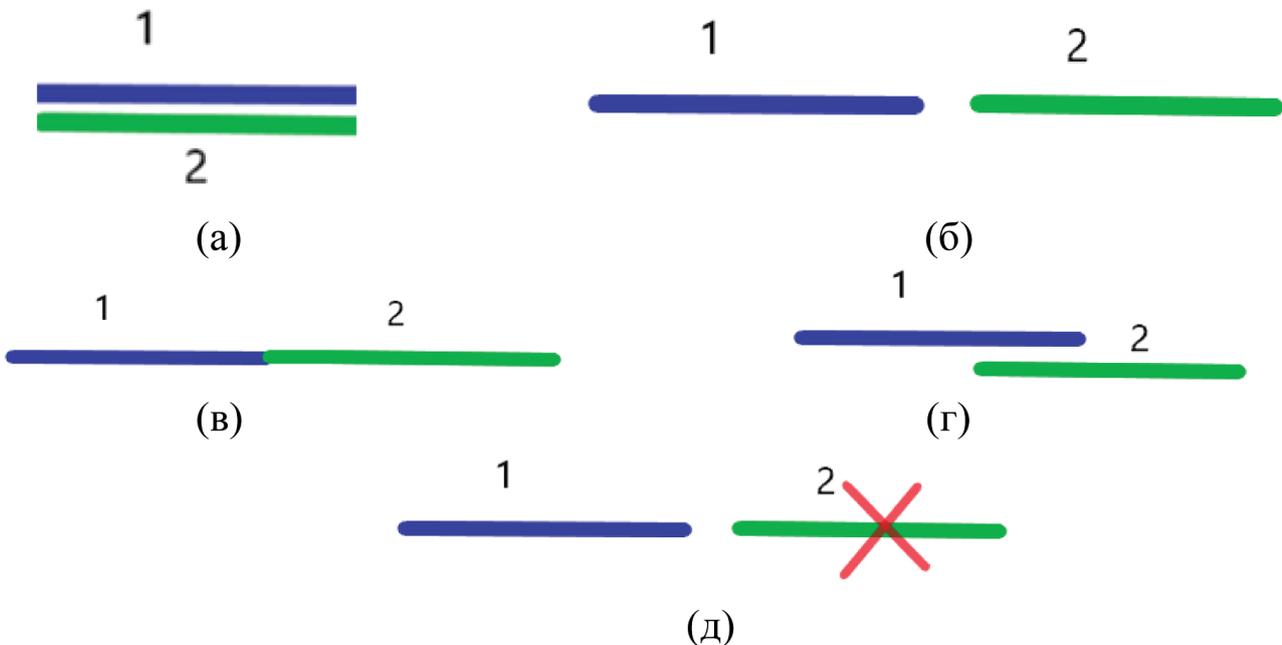


Рис. 4. Расположение линий Баркодов: (а) – линии перекрывают друг друга; (б) – линии находятся рядом; (в) – линии соприкасаются; (г) – линии частично перекрывают друг друга; (д) – существует только одна линия

Fig. 4. The location of the Barcode lines: (a) – lines overlap; (б) – lines are nearby; (в) – lines are touching; (г) – lines partially overlap each other; (д) – there is only one line



Рис. 5. Видоизмененный объект

Fig. 5. Modified object

### Результат работы алгоритма

Результатом работы алгоритма является построение первоначального объекта до его видоизмененного состояния на основе разности их Баркодов. Работа алгоритма тестировалась в среде ГИС ИНГЕО.



Рис. 6. Снимок со спутника

Fig. 6. Image from satellite

На рис. 6 отображено изображение домов со спутника. Проведем исследования изменения объектов с данного снимка на векторной карте.

На рис. 7а, б, в находятся изображения объектов в различные временные промежутки. Под каждым объектом на рисунке 7г, д, е отражены их Баркоды.

На рис. 8 красным цветом выделен первоначальный объект, а желтым изменение между первоначальным и измененным объектом.

На рис. 9 показан Баркод изменения объектов. Белым цветом выделен Баркод первоначального объекта, зеленым – изменения второго объекта, а красным – изменения третьего объекта.

### Заключение

В статье разработан алгоритм поиска различий у пространственных объектов, изменяемых во времени, на основе персистентной гомологии с использованием комплекса Чеха. Подробно описан данный алгоритм, в основе которого лежит поиск Баркода пространственных объектов, приведены результаты его применения к векторным изображениям.

Данный алгоритм полезен в строительстве при проектировании зданий, ЖКХ, сельском хозяйстве. Он позволяет вычислять трудозатраты для построения новых районов, отслеживания видоизменения зданий во времени и планирования их постройки. Также данный алгоритм сужает время поиска пространственных объектов в разные промежутки времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-47-330387).

**Ключевые слова:** классификация пространственных объектов, топология, геоинформатика, Баркод.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Herbei M.V., Herbei R.C., Radulov H.I. Topology of spatial data // SGEM 2015 : 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, June 18-24 : Conference Proceedings. – Book 2, V. 2. – P. 87-94. – ISBN 978-619-7105-35-3. – ISSN 1314-2704.
2. Федосеев В.А., Чупшев Н.В. Исследование методов выявления антропогенных изменений на земной поверхности по последовательности космических снимков высокого разрешения // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 279-288.
3. Zhang Lu. Change Detection in Remotely Sensed Imagery Using Multivariate Statistical Analysis : Ph.D. Diss. – China : Wuhan University, 2004.
4. Shyam Boriah. Time Series Change Detection: Algorithms for Land Cover Change : Ph.D. Diss. : Major: Computer science. – USA : University of Minnesota, 2010. – 146 p.
5. Edelsbrunner H. and Mücke E.P. Three-dimensional alpha shapes // ACM Trans. Comput. Graphics. – 1994. – 13. – P. 43-72.
6. Еремеев С.В., Филимонов М.М. Алгоритм кодирования пространственных идентификаторов в иерархических топологических системах //

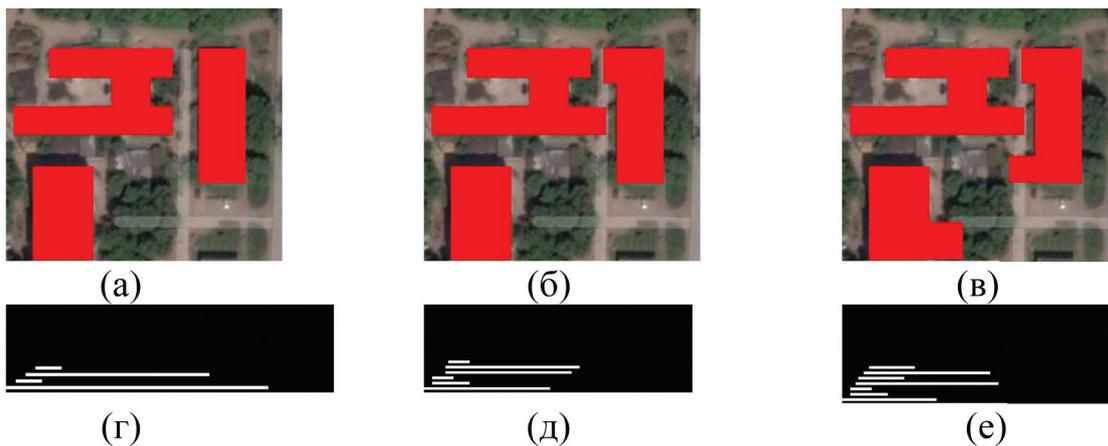


Рис. 7. Объекты и соответствующим им Баркоды: (а)-(в) – объекты в трех временных промежутках; (г)-(е) – Баркоды объектов в трех временных промежутках

*Fig. 7. Objects and their corresponding Barcodes: (a)-(в) – objects in three time intervals; (г)-(е) – Barcodes of objects in three time intervals*

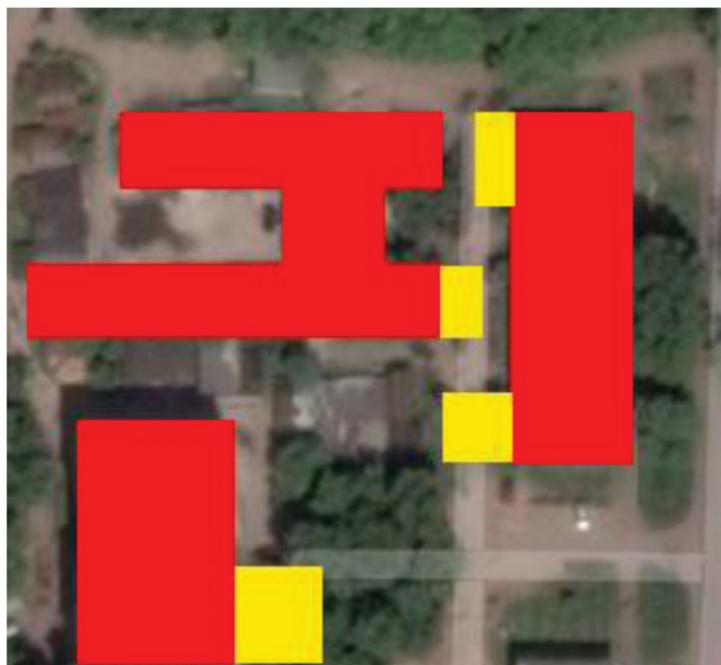


Рис. 8. Дostroенный объект по алгоритму построения пространственных объектов на основе Баркода

*Fig. 8. Finished object according to the algorithm for constructing spatial objects based on Barcode*



Рис. 9. Графики Баркодов

*Fig. 9. Barcode Charts*

Алгоритмы, методы и системы обработки данных : электронный научный журнал. – 2014. – № 4 (29). – С. 50-58.

7. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В. Алгоритм классификации пространственных объектов на основе модели Random forest // Алгоритмы, методы и системы обработки данных : электронный научный журнал. – 2017. – № 2 (35). – С. 15-21.

8. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В. Алгоритм поиска пространственных объектов по заданным критериям на основе буферных зон в многомасштабных ГИС // ГРАФИКОН'2016 : труды 26-й Международной научной конференции, 2016. – С. 414-416.

9. Zhilin Li, Qi Zhou. Integration of linear and areal hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks // Intern. J. of Geographical Information Science. – 2012. – V. 26. – P. 855-880.

10. Boissonnat J-D., Karthik C.S., Sébastien Tavenas. Building Efficient and Compact Data Structures for Simplicial Complexes : an extended abstract // Symposium on Computational Geometry : Proceedings of SoCG, 2015. P. 642-656.

11. Brassel K.E., Weibel R. A review and conceptual framework of automated map generalization // International Journal of Geographical Information System. – 1988. – V. 2, No. 3. – P. 229-244.

12. Barrault M. et al. Integrating multi-agent, object-oriented, and algorithmic techniques for improved automated map generalization // Proceedings 20th International Cartographic Conference, 2001. – P. 2110-2116.

13. Steiniger S., Weibel R. Relations among map objects in cartographic generalization // Cartography and Geographic Information Science. – 2007. – V. 34, No. 3. – P. 175-197.

14. Mackaness W.A. An algorithm for conflict identification and feature displacement in automated map generalization // Cartography and Geographic Information Systems. – 1994. – V. 21, No. 4. – P. 219-232.

**REFERENCES**

1. Herbei M.V., Herbei R.C., Radulov H.I. Topology of spatial data // SGEM 2015 : 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, June 18-24 : Conference Proceedings. Book 2, V. 2. P. 87-94. ISBN 978-619-7105-35-3. ISSN 1314-2704.

2. Fedoseev V.A., Chupshev N.V. Investigation of methods for detecting anthropogenic changes on the earth's surface using a sequence of high-resolution

satellite images // Computer optics. 2012. V. 36 (2). P. 279-288.

3. Zhang Lu. Change Detection in Remotely Sensed Imagery Using Multivariate Statistical Analysis : Ph.D. Diss. China : Wuhan University, 2004.

4. Shyam Boriah. Time Series Change Detection: Algorithms for Land Cover Change : Ph.D. Diss. : Major: Computer science. USA : University of Minnesota, 2010. 146 p.

5. Edelsbrunner H. and Mücke E.P. Three-dimensional alpha shapes // ACM Trans. Comput. Graphics. 1994. 13. P. 43-72.

6. Eremeev S.V., Filimonov M.M. Coding Algorithm of Spatial Identifiers in Hierarchical Topological Systems // Algorithms, Methods and Data Processing Systems : Electronic scientific journal. 2014. V. 4 (29). P. 50-58.

7. Kovalev Y.A., Eremeev S.V. Algorithm for classification of spatial objects based on the Random forest model // Algorithms, Methods and Data Processing Systems : Electronic scientific journal. 2017. V. 2 (35). P. 15-21.

8. Kovalev Y.A., Eremeev S.V. Algorithm of searching for spatial objects by specified criteria based on buffer zones in multiscale GIS // GRAPHICON'2016 : Works of the 26th International Scientific Conference. P. 414-416.

9. Zhilin Li, Qi Zhou. Integration of linear and areal hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks // Intern. J. of Geographical Information Science. 2012. V. 26. P. 855-880.

10. Boissonnat J-D., Karthik C.S., Sébastien Tavenas. Building Efficient and Compact Data Structures for Simplicial Complexes : an extended abstract // Symposium on Computational Geometry : Proceedings of SoCG, 2015. P. 642-656.

11. Brassel K.E., Weibel R. A review and conceptual framework of automated map generalization // International Journal of Geographical Information System. 1988. V. 3. P. 229-244.

12. Barrault M. et al. Integrating multi-agent, object-oriented, and algorithmic techniques for improved automated map generalization // Proceedings 20th International Cartographic Conference. 2001. P. 2110-2116.

13. Steiniger S., Weibel R. Relations among map objects in cartographic generalization // Cartography and Geographic Information Science. 2007. V. 3. P. 175-197.

14. Mackaness W. A. An algorithm for conflict identification and feature displacement in automated map generalization // Cartography and Geographic Information Systems. 1994. V. 4. P. 219-232.