

О. П. Якимова¹✉, П. А. Русских¹, А. Д. Волкова¹

Сравнение алгоритмов совместного геометрического упрощения нескольких слоев пространственных данных

¹ Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
г. Ярославль, Российская Федерация
e-mail: olga_pavl02@mail.ru

Аннотация. В процессе картографической генерализации нередко изменяются отношения между объектами, тем более что общепринятой является практика упрощения каждого слоя пространственных данных независимо. В результате возникают топологические конфликты. Многие исследователи обращались к проблеме их автоматического поиска и разрешения. Альтернативным подходом является совместное упрощение различных слоев пространственных данных с сохранением их топологических отношений. В настоящем исследовании проводится сравнение двух таких алгоритмов: на основе стягивания ребер графа и минимизации ошибки и на основе квадродерева. Сравнение производится на основе оценки точности пространственного позиционирования и точности передачи формы. В качестве исходных данных для экспериментов используются фрагменты карт масштаба 1:500 000 и 1:1 000 000. Приводятся результаты сравнения алгоритмов на основе выбранных характеристик. Слои пространственных данных, упрощенные обоими алгоритмами, сохраняют топологические отношения, то есть не содержат разрывов, наложений и т.п. Отмечены недостатки алгоритмов и сделаны выводы о их применимости для среднемасштабного картографирования.

Ключевые слова: алгоритм совместного упрощения, топологические отношения, квадродерево, граф, стягивание ребра

O. P. Yakimova¹✉, P. A. Russkix¹, A. D. Volkova¹

A comparative study of algorithms for the joint simplification of multiple spatial data layers

¹ Yaroslavl Demidov State University, Yaroslavl, Russian Federation
e-mail: olga_pavl02@mail.ru

Abstract. In the process of cartographic generalization, the relationships between objects often change, especially since it is common practice to simplify each layer of spatial data independently. As a result, topological conflicts arise. Many researchers have addressed the issue of their automatic search and resolution. An alternative approach is the joint simplification of various layers of spatial data while preserving their topological relationships. In this study, two such algorithms are compared: on the basis of graph edge contraction and error minimization, and on the basis of a quadtree. The comparison is based on an assessment of the accuracy of spatial positioning and the accuracy of shape transfer. Fragments of 1:500,000 and 1:1,000,000 scale maps are used as initial data for experiments. The results of comparing algorithms based on selected characteristics are presented. The spatial data layers simplified by both algorithms preserve topological relationships, that is, they do not contain breaks, overlaps, etc. The disadvantages of the algorithms are noted and conclusions are drawn about their applicability for medium-scale mapping.

Keywords: joint simplification algorithm, topological spatial relationships, quadtree, graph, edge cotraction

Введение

В условиях стремительного роста объемов геопространственных данных и расширения сфер их применения особую актуальность приобретает задача эффективного представления картографической информации на различных уровнях детализации. Одним из ключевых этапов картографической генерализации является геометрическое упрощение, направленное на снижение сложности пространственных объектов при сохранении их существенных характеристик и топологической корректности [1].

Алгоритмы геометрического упрощения играют важную роль в обработке векторных данных, позволяя адаптировать картографические объекты к требованиям визуализации, анализа и хранения. С одной стороны, необходимо минимизировать избыточность данных и повысить производительность систем, с другой — сохранить информативность и узнаваемость объектов. Достижение баланса между этими требованиями представляет собой сложную научную и практическую задачу.

На сегодняшний день предложено множество методов упрощения, например, хорошо известные универсальные алгоритмы Дугласа-Пейкера [2], Мак-Мастера [3], Висвалингам–Уайатта [4], Свентэка [5] и др. [6]. Кроме того, были разработаны специализированные алгоритмы, которые хорошо подходят для упрощения определенных типов линий, например, береговых [7] или зданий [8]. Несмотря на значительный прогресс, остаются открытыми вопросы оценки качества упрощения и автоматизации выбора параметров алгоритмов.

Процесс автоматической картографической генерализации нередко нарушает изначальные соотношения между объектами, особенно учитывая традиционную практику независимого упрощения отдельных слоев пространственных данных [9]. Задаче поиска топологических конфликтов посвящены работы многих исследователей [10 – 13]. Также были предложены модификации алгоритмов геометрического упрощения, которые не допускают самопересечение упрощаемых линий [14, 15]. Использовались и различные разбиения (покрытия) карты и генерализация линейных объектов на их основе, что позволяет избегать топологических конфликтов [16, 17, 18]. Но все эти методы работают исключительно для одного слоя линейных объектов.

В работах [19 – 21] предлагается иной подход, а именно совместное упрощение нескольких слоев пространственных данных. Целью настоящего исследования является сравнение этих алгоритмов для определения сильных и слабых сторон каждого из них. Сравнение предлагается проводить на основе вычисляемых значений, характеризующих отклонение от исходного положения и точность передачи формы, то есть будет оцениваться географическое правдоподобие полученной линии.

Методы и материалы

Алгоритм, сохраняющий топологию (алгоритм T1). Первый из рассматриваемых алгоритмов позволяет провести геометрическое упрощение множества

линейных объектов, в том числе из разных слоев, с сохранением топологии [19, 20]. Линейные объекты представляются в виде графа, то есть непустого множества вершин и ребер, последние отражают связи между некоторыми парами вершин.

Основная операция алгоритма *T1* – это стягивание ребра AB в вершину C , заменяющую вершины A и B . Стягивание ребра возможно только при сохранении топологии. Так, на рис. 1а приведен пример, когда она остается неизменной, а на рис. 1б – когда при стягивании ребра топология меняется: два цикла в графе, например, представляющих разветвленное русло реки, получили общую точку. В последнем случае стягивание невозможно. Положение вершины C определяется в соответствии с методом минимизации квадратичной формы [22]. Стягивание ребра AB в точку приводит к топологически эквивалентному графу тогда и только тогда когда по меньшей мере одна из вершин A, B принадлежит в точности двум ребрам и вершины A и B не имеют в графе общих соседей.

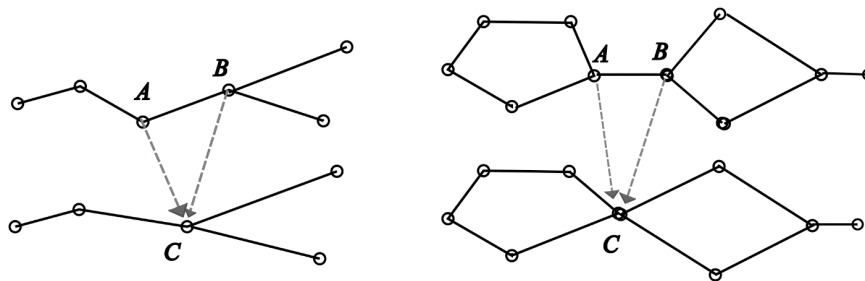


Рис. 1. Стягивание ребра AB в вершину C

Алгоритм геометрического упрощения *T1* состоит из следующих шагов:

1. Объединение слоев и создание графа. Слои объектов проецируются на один слой, при этом добавляются точки пересечения объектов из различных слоев, а затем объединяются в общую структуру данных, представляющую собой граф. При этом для сохранения наиболее важных элементов ломаных производится анализ изгибов. Если точка является вершиной изгиба, то цена стягивания ребер, инцидентных данной вершине, увеличивается.

2. Все ребра графа упорядочиваются по возрастанию цены стягивания. Производится геометрическое упрощение путем последовательного стягивания ребер в порядке возрастания цены при условии сохранения топологической эквивалентности системы. Процесс продолжается, пока количество вершин графа не снизится до заданного числа процентов от исходного количества вершин.

3. Разделение на слои, содержащие генерализованные версии данных исходных слоев объекта.

Алгоритм, сохраняющий топологию на основе квадродерева (алгоритм T2). Предлагаемый алгоритм имеет единственный параметр — минимальный размер отображаемой на карте детали *Minsize* (обычно он равен одному миллиметру в целевом масштабе карты) и позволяет провести топологически корректное совместное геометрическое упрощение линейных, полигональных и точечных слоев [21]. Основными шагами алгоритма являются:

1. Построение сеточной структуры данных на основе квадродерева. Объекты каждого слоя векторной карты заносятся в структуру данных. Корневая ячейка, соответствующая охвату карты, делится на четыре дочерних квадратных ячейки до тех пор, пока либо в ячейке останется единственный объект, либо размер ячейки равен минимальному (рис.2).

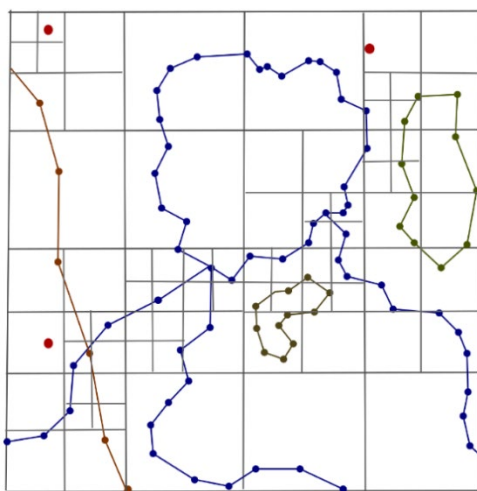


Рис. 2. Пример построения сеточной структуры данных

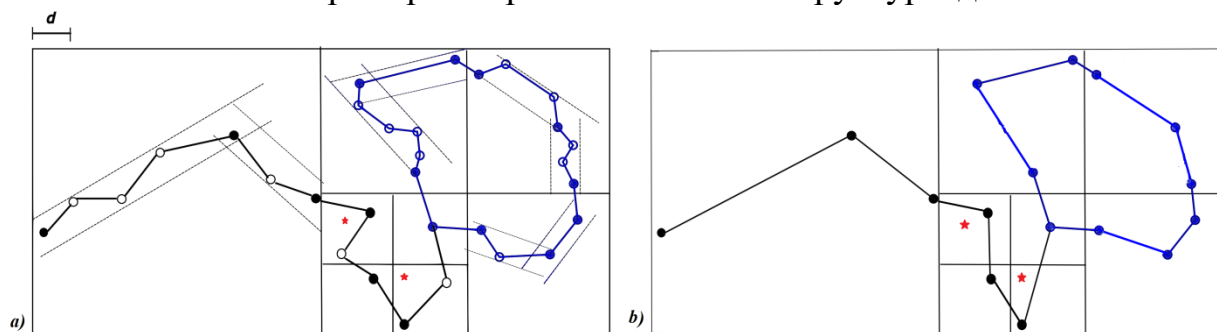


Рис. 3. Процедура упрощения

2. Упрощение. Для каждого пространственного объекта формируется последовательность ячеек сеточной структуры данных, которым принадлежат точки данного объекта. Если в ячейке находится точки только одного объекта, то его геометрическое упрощение происходит в рамках ограничивающей ячейки по алгоритму «облегающего/обтягивающего рукава», предложенному в работе [23]. Параметр алгоритма d задается равным половине минимального размера различимой детали *Minsize*. Если в ячейке содержатся точки нескольких объектов, то

геометрическое упрощение осуществляется с помощью специальной, сохраняющей топологию, процедуры (рис. 3) [21].

Для анализа точности пространственного позиционирования применяется модифицированное расстояние Хаусдорфа (МНД) [24]. Чем меньше значение МНД, тем ближе исходная линия к упрощенной. Усреднение расстояний позволяет уменьшить влияние случайных выбросов — отдельных точек, существенно отстоящих от исходного положения.

Для оценки точности передачи формы линии предлагается использовать коэффициент длины (LR), равный отношению длин упрощенной и исходной линий, описанный в работе [25]. И коэффициент сокращения изгибов (BR), равный отношению количества изгибов упрощенной линии к количеству изгибов исходной.

Результаты

В качестве исходных данных рассматривались фрагменты цифровой карты России масштабов 1:500000 и 1:1000000. Исходные данные и результаты их упрощения обоими алгоритмами представлены на рис. 4 и рис. 5.

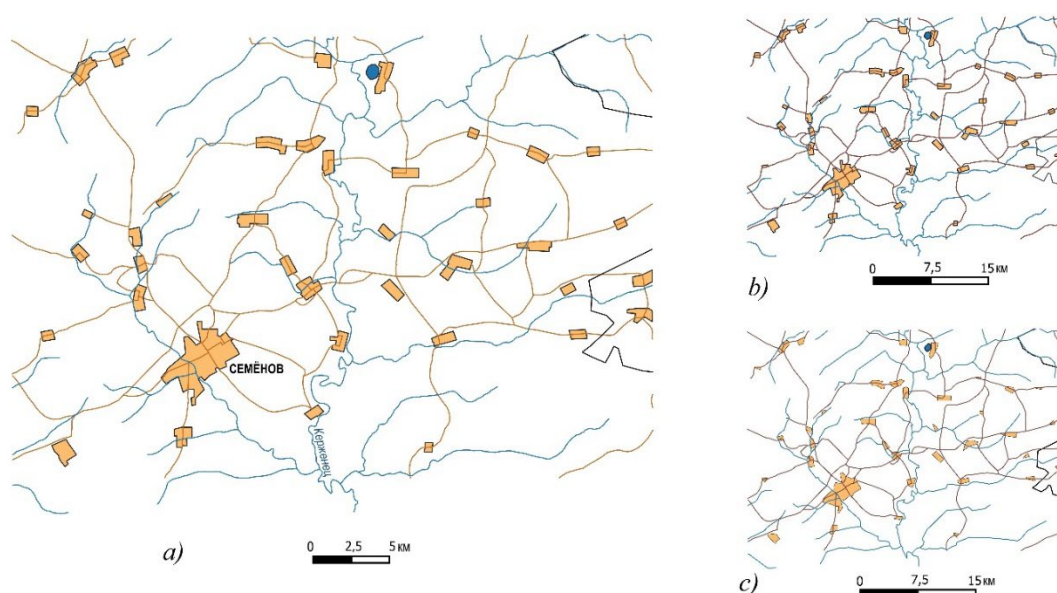


Рис. 4. а) Исходные данные масштаба 1:500000. Результат упрощения:
б) алгоритмом T1; в) алгоритмом T2

Таблица 1 – Изменение коэффициента длины и коэффициента сокращения изгибов

Исходные данные в масштабе	Алгоритм T1		Алгоритм T2	
	LR	BR	LR	BR
1 : 1 000 000	1	0,62	0,97	0,65
1 : 500 000	1	0,51	0,95	0,46

Изменения коэффициента длины и коэффициента сокращения изгибов приведены в табл.1, а значения модифицированного расстояния Хаусдорфа между исходными и упрощенными объектами каждого слоя пространственных данных – в табл. 2.

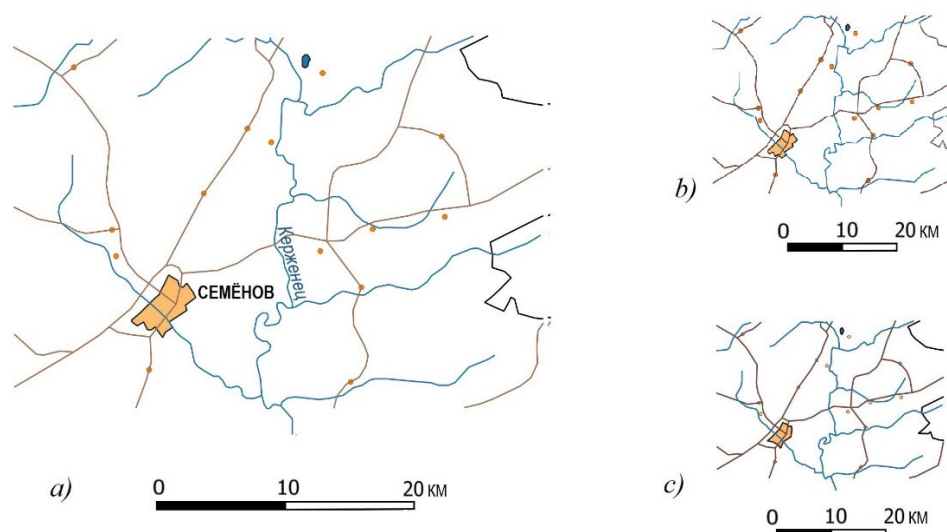


Рис. 5. а) Исходные данные масштаба 1:1000000. Результат упрощения: б) алгоритмом T1; в) алгоритмом T2

Таблица 2 – Модифицированное расстояние Хаусдорфа между исходными и упрощенными объектами

Объекты	Исходное количество точек	Алгоритм T1		Алгоритм T2	
		Количество точек	MHD	Количество точек	MHD
Фрагмент карты масштаба 1:1 000 000					
Реки	283	117	3	145	6
Водоемы	12	6	4	11	10
Границы населенных пунктов	28	17	3	16	14
Дороги	123	101	2	100	27
Границы районов	28	17	6	20	27
Фрагмент карты масштаба 1:500 000					
Реки	1774	687	1	714	1
Водоемы	18	10	1	13	4
Границы населенных пунктов	431	393	74	315	16
Дороги	1093	605	1	644	2
Границы районов	28	25	1	24	8

Обсуждение

Среднее расстояние между исходной и упрощенной линиями меньше у алгоритма T1 (на основе стягивания ребер и минимизации ошибки). Длина при упрощении алгоритмом T1 остается неизменной, сокращение числа изгибов у обоих алгоритмов примерно одинаково. Как показано на рис. 6, при генерализации алгоритмом T1 даже при сокращении числа точек в 4 раза топологические отношения между объектами сохраняются.

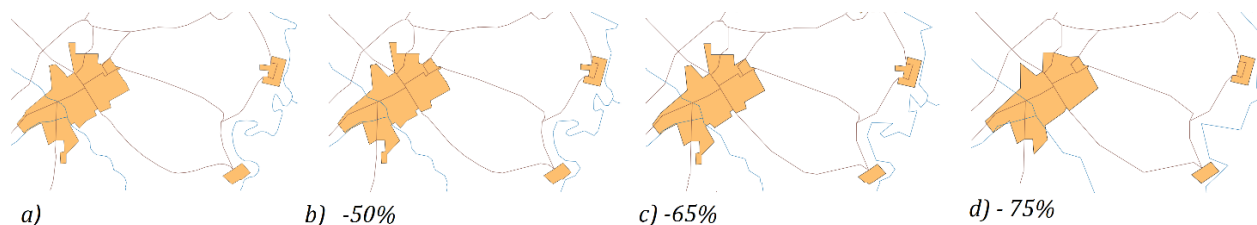


Рис. 6. а) Фрагмент исходных данных масштаба 1:500000 и результаты его упрощения при сокращении б) 50% точек в) 65% точек д) 75% точек

При проведении экспериментов с фрагментами цифровой карты масштаба 1:250000 оказалось, что в некоторых случаях алгоритм T1 удаляет существенные части полигональных объектов (рис. 7а), в то время как алгоритм T2 корректно проводит генерализацию (рис. 7б). Результат упрощения встроенным в геоинформационную систему QGIS алгоритмом Дугласа-Пейкера демонстрирует потерю связности дорог и населенных пунктов (рис. 7с).

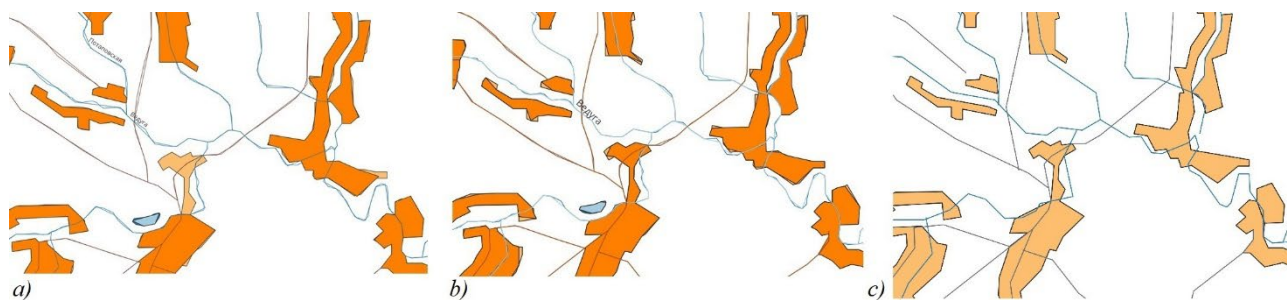


Рис. 7. Результат упрощения фрагмента исходных данных масштаба 1:250000: а) алгоритмом T1, б) алгоритмом T2, в) алгоритмом Дугласа-Пейкера

Заключение

В настоящей работе проводится сравнение двух алгоритмов совместного геометрического упрощения множества слоев пространственных данных, сохраняющих их топологические отношения. Алгоритм T1 на основе минимизации ошибки при стягивании ребер при сокращении точек до 50% на среднемасштабных картах дает лучший результат, чем алгоритм T2 на основе квадродерева. Но

алгоритм Т1 не учитывает точечные объекты при генерализации, и, на картах более крупных масштабов допускает некорректное упрощение некоторых объектов. Алгоритм Т2 на основе квадродерева учитывает точечные слои при упрощении. Более устойчив к топологически корректной генерализации при сокращении большого количества точек.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для среднemasштабного картографирования при небольшой степени генерализации больше подходит алгоритм Т1, для карт более крупных масштабов – алгоритм Т2.

Изначально оба алгоритма реализованы на языке C#, позже созданы плагины для QGIS, доступные для скачивания и экспериментов [26, 27]. Все программные продукты прошли государственную регистрацию.

В качестве перспектив дальнейших исследований предлагается модификация рассматриваемых алгоритмов для упрощения карт крупных масштабов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлянт А. М. Картография. 4-е изд. – М.: КДУ, 2014. – 448 с.
2. Douglas D. H., Peucker T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature// *Canadian Cartographer*. – 1973. – Vol.10, No 2. – P. 112–122.
3. McMaster R. B. Automated line generalization // *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. – 1987. – Vol. 24, No 2. – P. 74–111.
4. Visvalingham M., Whyatt J. Line generalization by repeated elimination of points// *Cartographic Journal*. – 1993. – Vol. 30, No 1. – P. 46–51. DOI: 10.1179/000870493786962263
5. Свентэк Ю. В. Теоретические и прикладные аспекты современной картографии. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 80 с.
6. Li Z. Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation. – CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2007. – 310 p.
7. Wang Z., Muller J.C. *Complex Coastline generalization* // *Cartography and Geographic Information Science*. – 1993. – Vol. 20, No 2. – P. 96–106. DOI: 10.1559/152304093782610333
8. Wei Z., Liu Y., Cheng L., Ding S. A Progressive and Combined Building Simplification Approach with Local Structure Classification and Backtracking Strategy// *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* – 2021. – Vol.10, No 5. – 302. DOI: 10.3390/ijgi10050302
9. Dettori G., Puppo E. How generalization interacts with the topological and metric structure of maps// *Proceedings of SDH'96*, 12-16 August 1996, The Netherlands. 1996. – 9A.27–9A.38.
10. Rhind D. Generalization and realism with automated cartographic system // *Canadian Cartographer*. – 1973. – Vol. 10(1). – P. 51–62.
11. Monmonier M. Displacement in vector-and raster-mode graphics // *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. – 1987. – Vol. 24, No. 4. – P. 25–36.
12. Clementini E., Sharma J., Egenhofer M.J. *Modelling topological spatial relations: Strategies for query processing* // *Computers & Graphics*. – 1994. – V.18 N 6. – P. 815–822.
13. Zhou X., He H., Hou D., Li R., Zheng H. A RefinedLines/Regions and Lines/Lines Topological Relations Model Based on Whole-Whole Objects Intersection Components // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* – 2021. – Vol.10(1), 15. DOI: 10.3390/ijgi10010015

14. de Berg M., van Kreveld M., Schirra S. Topologically correct subdivision simplification using the bandwidth criterion // *Cartography and Geographic Information Science*. – 1998. – No. 25. – P. 243–257.
15. Saalfeld A. Topologically Consistent Line Simplification with the Douglas-Peucker Algorithm// *Cartography and Geographic Information Science*. – 1999. –Vol. 26(1). – P. 7–18. DOI: 10.1559/152304099782424901
16. Van Der Poorten P. M., Jones C. B. Characterisation and generalisation of cartographic lines using delaunay triangulation // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2002. – Vol. 16 (8). – P. 773–794.
17. Li Z., Openshaw S. Algorithms for automated line generalization based on a natural principle of objective generalization // *International Journal of Geographical Information Systems*. – 1992. – Vol.6(5). – P. 373 – 389. DOI:10.1080/02693799208901921
18. Raposo P. Scale-specific automated line simplification by vertex clustering on a hexagonal tessellation // *Cartography and Geographic Information Science*. – 2013.– Vol.40(5).– P. 427–443.
19. Алексеев В.В., Богаевская В.Г., Преображенская М.М., Ухалов А.Ю., Эдельсбруннер Х., Якимова О.П. Алгоритм картографической генерализации, сохраняющий топологию // *Фундаментальная и прикладная математика*. – 2013. – Т. 18, № 2. – с. 5 –12.
20. Самсонов Т. Е, Якимова О. П., Алексеев В. В., Богаевская В. Г., Горохов А. А., Князев В. Н., Преображенская М. М., Ухалов А. Ю., Эдельсбруннер Х. Алгоритм геометрического упрощения множества линий путем стягивания ребер графа с сохранением топологии // *Геодезия и картография*. – 2014.– № 3. – с. 29–36
21. Якимова О.П., Мурин Д.М., Горшков В.Г. Совместное упрощение пространственных объектов различного типа с сохранением топологических отношений // *Моделирование и анализ информационных систем*. – 2023.– Т.30, №4. — с.340–353
22. Garland M., Heckbert P. S. Surface simplification using quadric error metrics // *SIGGRAPH '97, Proc. 24th Ann. Conf. Comput. Graphics*. – 1997. – P. 209–216. DOI: 10.1145/258734.258849
23. Zhao Z., Saalfeld A. Linear-time sleeve-fitting polyline // In *Autocarto 13, ACSM/ASPRS'97 technical papers*, Seattle, Washington.– 1997. – P. 214–223.
24. Dubuisson M. P., Jain A. A modified hausdorff distance for object matching// *Proceedings of 12th international conference on pattern recognition*. IEEE Comput. Soc. Press. –1994. –Vol. 1, pp. 566–568.
25. Liu H., Fan Z., Zhen X., Deng M. An Improved Local Length Ratio Method for Curve Simplification and Its Evaluation // *Geogr. GeoInf. Sci.* –2011. – V. 27.– p. 45–48.
26. Плагин для совместного упрощения на основе стягивания ребер графа и минимизации ошибки // URL: <https://disk.yandex.ru/d/jeP5rZ9WGEwoYA>
27. Плагин для совместного упрощения слоев разной геометрии на основе квадродерева// URL: https://disk.yandex.ru/d/rvf8zu_k_otljA

© О. П. Якимова, П. А. Русских, А. Д. Волкова, 2026