

**ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ ДОРОЖНОЙ СЕТИ  
В МЕЛКИХ МАСШТАБАХ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ  
С СОХРАНЕНИЕМ СВЯЗНОСТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ**

Кандидат геогр. наук **Т.Е. Самсонов**, студент **А.М. Кривошеина**  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*  
*tsamsonov@geogr.msu.ru*

**Аннотация.** Представлен оригинальный алгоритм, разработанный для мелкомасштабной генерализации сети дорог в соответствии с заданным множеством населенных пунктов. Отбор сегментов дорожной сети осуществляется путем построения кратчайших маршрутов между населенными пунктами. Оптимизация числа маршрутов производится на основе эмпирических кривых. Алгоритм реализует подход сопряженной генерализации элементов дорожной сети и населенных пунктов, позволяя сохранить транспортную связность между ними и избежать топологических ошибок. Апробация алгоритма произведена на примере генерализации обзорной карты масштаба 1:1 000 000 до масштаба 1:8 000 000.

**Ключевые слова:** мелкомасштабные общегеографические карты, генерализация, дорожная сеть, сетевой анализ, автоматизация в картографии

**Abstract.** An original algorithm developed for small-scale generalization of road network according to a given set of settlement points is presented. Selection of road segments is implemented via calculation of the shortest routes between settlements. The number of routes is optimized using empirical curves. An approach of joint generalization of road network and settlements is applied in the algorithm, which allows to keep road connectivity and avoid topological mistakes. Algorithm is tested on the example of generalization of 1:1 mln topographic map to 1:8 mln.

**Keywords:** small-scale general maps, generalization, automation in cartography

**Введение.** В предыдущей статье авторов [1] рассмотрена проблема автоматизации отбора населенных пунктов в мелких масштабах картографирования. Была обозначена необходимость учета пространственного фактора при

отборе объектов и простота подхода, используемого при формировании обзорных уровней детализации мультимасштабных картографических сервисов, таких как OpenStreetMap, Google Maps и Яндекс.Карты, основанного на

применении атрибутивных запросов.

Одной из существенных проблем автоматизации, не решенных при формировании мелкомасштабных карт, является независимость процессов отбора населенных пунктов и транспортных сетей, что приводит к их значительному рассогласованию и потере географического рисунка. В то же время, детальность изображения дорожной сети дает представление о степени освоенности территории, наличии основных связей. Главные задачи отбора дорог — отражение степени развитости дорожной сети в разных районах картографируемой территории, подчеркивание магистральных направлений дорог и связей между населенными пунктами, показ местных особенностей дорог, особенно в слабообжитых районах [2].

Дорожная сеть, в отличие от гидрографии, не имеет однонаправленного характера и содержит множество кольцевых, звездчатых, сетчатых структур [3], что не позволяет выделить ранги, эквивалентные порядкам притоков. Помимо этого, элементы дорожной сети несут семантические и геометрические данные, которые также необходимо учитывать при генерализации. Для обработки такого рода данных применяется теория графов [4]. С использованием различных метрик может быть определена важность отдельных узлов и ребер графа, что служит основанием при отборе сегментов дорожной сети [5]. Основные топологические свойства конфигурации транспортных сетей — пространственная связность и изолированность; взаимное расположение элементов; отношения соседства; цикличность и разветвленность линейных элементов сети [3]. В работе [6] предложен алгоритм, основанный на объединении ребер графа, стыкующихся под малым углом и, таким образом, наиболее вероятных для прокладки маршрута. Однако описанный подход применим главным образом для крупномасштабного и среднемасштабного картографирования, где картографическое полотно способно вместить многовариантность транспортного сообщения между населенными пунктами.

Ряд исследований был посвящен изучению процентного изменения количества картографических символов при уменьшении масштаба карты. В [5] для масштабов от 1:1 000 до

1:200 000 анализируется связь этих изменений с тематическими атрибутами, в качестве которых взяты следующие: класс; длина; ширина; количество проезжих частей; количество полос движения и связность. Аналогичное исследование касательно изменения графической нагрузки в мелких масштабах картографирования представлено в [7].

Вопрос автоматической генерализации дорожной сети с учетом населенных пунктов в мелких масштабах картографирования в литературе не представлен. Однако населенные пункты и транспортная сеть — тесно связанные элементы содержания карт, и некорректно производить их генерализацию без взаимного учета и согласования. Традиционно для каждого пункта выбирается наиболее удобная дорога (высшего класса), связывающая его со своим административным центром. Кроме того, можно показать и наиболее короткую дорогу более низкого класса [2]. Помимо этого, требуется региональная адаптация параметров отбора элементов дорожной сети с учетом ее густоты.

Особенностью транспортных сетей в мелком масштабе, когда показываются только основные шоссе и магистрали, является то, что их рисунок во многом определяется размещением населенных пунктов, которые они соединяют. При их сопряженной генерализации логично предъявить требование, чтобы все населенные пункты, которые изначально были связаны дорогами, не теряли эту связь. Этот подход позволяет автоматически сохранять правильный рисунок сети при разработке алгоритма, учитывающего распределение населенных пунктов, что и использовано нами при разработке методики.

Предлагаемая методика является развитием подхода, заложенного авторами в [8]. Аналогично отбору населенных пунктов в методику была включена возможность использования районирования территории по густоте дорожной сети, а также оптимизация числа отбираемых дорог. Произведена численная, графическая и визуальная оценка качества результатов генерализации.

Предметом интереса настоящей статьи является конкретно сеть автомобильных дорог, которая отличается существенно более высокой сложностью, чем железнодорожная сеть.

Здесь и далее, употребляя термин «дорожная сеть», мы будем подразумевать сеть автомобильных дорог.

**Районирование по густоте дорожной сети.** В отличие от процесса отбора населенных пунктов, который в авторской методике связан с построением диаграммы Вороного [1], в случае анализа дорожной сети оптимальным методом оценки густоты линий является растровый анализ на основе плавающего окна. На исходное множество линий накладывается регулярная растровая сетка с разрешением  $R$ , которое зависит от среднего расстояния до ближайшей линии в исходном наборе данных. Далее в плавающем окне (круглом или квадратном) относительно каждого пиксела подсчитывается суммарная длина линий, которая делится на площадь плавающего окна  $S$ . Результирующее значение характеризует локальную густоту дорожной сети в данной точке, а поверхность дает представление об изменении густоты по территории. Поверхность, построенная таким образом по данным карты масштаба 1:1 000 000, представлена на рис. 1. В целом можно отметить, что распределение густоты дорожной сети имеет высокую степень корреляции с плотностью размещения населенных пунктов [1].

Затем на основе классификации полученной поверхности распределения густоты транспортной сети следует выделить  $N$  основных классов густоты дорог. Экспериментальным путем было установлено, что оптимальное количество классов равняется трем, а их выделение произведено визуально по карте густоты в изолиниях. Отличие от числа классов густоты размещения населенных пунктов, предложенного в статье [1] и равного четырем, обусловлено визуальным отличием распределения густоты дорожной сети. Дальнейшие исследования должны позволить определить оптимальное число и границы классов на основе численного анализа данных. Выделенные классы густоты дорожной сети приведены на рис. 2. По результатам классификации каждому населенному пункту присваивается номер класса густоты дорожной сети, которому он принадлежит.

**Построение иерархического графа дорожной сети.** Отбор дорог производится в зависимости от их значимости и густоты раз-

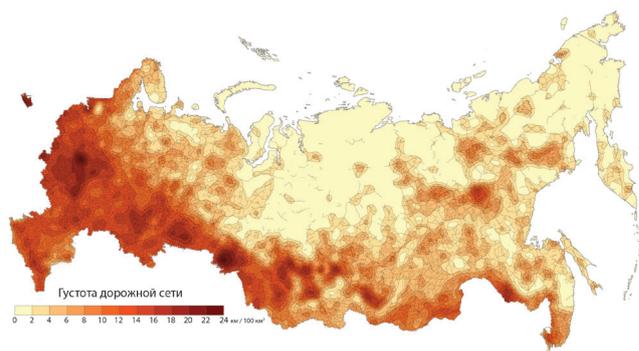


Рис. 1. Поверхность густоты дорожной сети на карте масштаба 1:1 000 000

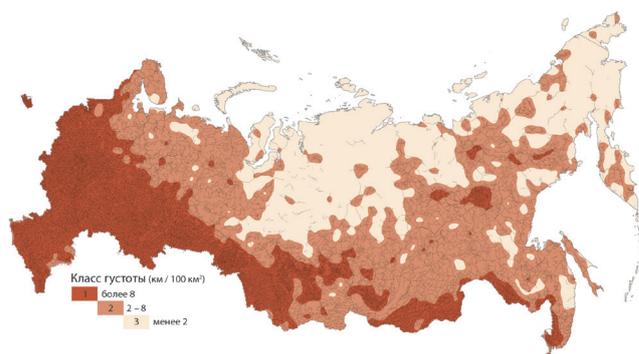


Рис. 2. Районирование территории России по классам густоты дорожной сети

мещения по территории. Так, например, сегменты длинных маршрутов являются более значимыми нежели те, которые используются только для местного передвижения.

В целях расстановки приоритетов движения по магистралям различного уровня следует установить их иерархию. Для генерализации в масштабном диапазоне 1:1 000 000–1:8 000 000 нами была использована следующая иерархия:

- 1 — автомагистрали (автострады), автодороги с усовершенствованным покрытием, автодороги с покрытием;
- 2 — улучшенные грунтовые дороги, зимние дороги;
- 3 — проселочные грунтовые дороги и др.

На основе исходных линий строится граф дорожной сети, который затем обогащается информацией об иерархическом классе его звеньев.

**Отбор сегментов дорожной сети.** В основе предлагаемого принципа отбора сегментов сети лежит естественное предположение о том, что следует сохранить только те дороги, которые необходимы для передвижения между

населенными пунктами по кратчайшему пути (с учетом установленной иерархии дорог). При этом множество населенных пунктов должно быть уже генерализовано для результирующего масштаба.

От каждого населенного пункта строятся маршруты до ближайших  $N$  населенных пунктов. Данная задача относится к типу *Closest Facility* (ближайший пункт обслуживания). При этом число  $N$  зависит от класса густоты дорожной сети, которому принадлежит анализируемый населенный пункт. Сами линии не сегментируются на классы и участвуют в анализе в полном наборе (то есть допускает-

ся, что маршрут может быть построен из одного класса плотности в другой). Этот подход обеспечивает стыковку на границе классов. Основным вопросом заключается в выборе числа  $N$ . Для его разрешения необходимо проанализировать, как меняется количество отобранных при генерализации дорог при модификации этого числа.

На рис. 3 показана динамика отбора дорог в регионе 1 класса густоты при изменении количества населенных пунктов, к которым строятся кратчайшие маршруты. При анализе данных иллюстраций видно, что сеть приобретает более-менее связный вид при  $N=3$ , а далее начинается ее сгущение сегментами, позволяющими сократить путь до дальних населенных пунктов. Однако анализ двумерного распределения достаточно сложен и неоднозначен. Для принятия решения об оптимальном числе требуется снизить размерность. Для этого можно исследовать функцию зависимости процента количества сегментов дорожной сети от заданного числа  $N$ . Примеры графиков для трех выделенных классов представлены на рис. 4.

В данном случае для районов с одинаковой плотностью графики имеют схожую точку перегиба, которая по нашему мнению является оптимальным параметром для генерализации. Эта точка характеризуется спадом роста процента сохраняемых дорог и максимальной выпуклостью графика, что соответствует минимальному значению второй производной (для рис. 4 она равна четырем), которая легко вычисляется через значения на графике. Таким образом, число  $N$  может быть найдено полностью автоматически.

Следует обратить внимание на то, что вместо процентной доли от числа дорог можно использовать также процентную долю от суммарной длины дорог. Если в первом случае график характеризует многовариантность передвижений по территории, то в случае кумулятивной длины маршрутов график будет давать уже оценку географического охвата самих маршрутов.

**Численная и графическая оценка результатов генерализации.** Реализация предложенной методики была выполнена средствами модуля сетевого анализа Network Analyst для ГИС-пакета ArcGIS for Desktop 10.1. После

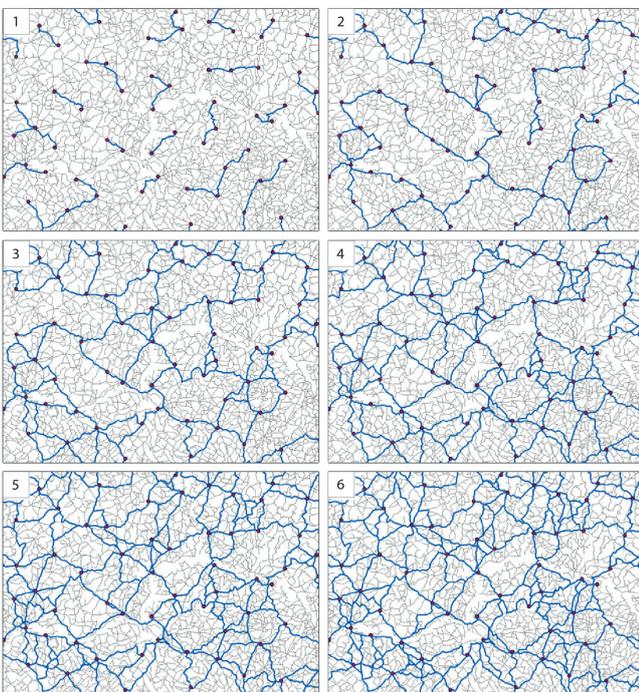


Рис. 3. Итеративный отбор дорог путем построения маршрутов до ближайших населенных пунктов (число в углу — количество маршрутов)



Рис. 4. Зависимость доли отобранных дорог  $k$  от количества маршрутов  $n$

выполнения отбора было произведено геометрическое упрощение линий с помощью алгоритма Bend Simplify [9] с установленным минимальным размером изгиба 10 км.

Для проведения анализа была рассчитана таблица для суммарной протяженности дорог по классам плотности (см. таблицу).

**Протяженность сохраненных дорог по классам плотности**

Класс плотности	Исходная суммарная длина дорожной сети, км	Суммарная длина дорожной сети после генерализации, км	Процент сохраненных в ходе генерализации дорог
1	500895	101062	20,2
2	389999	85219	21,9
3	23708	5858	24,7
Всего	914601	192140	21,0

Далее, для оценки связи между количеством объектов до и после генерализации был применен обобщенный закон Топфера [10, 11], имеющий следующий вид:

$$N_G = N_S \sqrt{\left(\frac{S_S}{S_G}\right)^x},$$

где  $N_G$ ,  $N_S$  — число объектов в целевом исходном масштабе;  $S_G$ ,  $S_S$  — значения целевого и исходного масштабов (более детальный анализ см в [1]); параметр  $x$  определяет степень отбора при генерализации и принимает следующие характерные значения: 0 — нет отбора; (0, 4) — увеличение плотности; 4 — сохранение плотности;  $> 4$  — уменьшение плотности.

Заметим, что при оценке генерализации линий правильней учитывать не количество объектов, а именно их суммарную длину [12], которая и была использована вместо значений  $N_G$  и  $N_S$ .

Имея исходный и результирующие масштабы, а также суммарную протяженность дорожной сети до и после генерализации по классам плотности, был определен параметр  $x$  для каждого класса. На основе него можно оценить, насколько изменилась густота дорог по территории по выделенным классам плотности. В первых двух классах плотности этот параметр приблизительно равен 1,7, в третьем — 1,5. Таким образом, можно сделать вывод, что в целом густота дорожной сети увеличилась, причем в третьем классе несколько больше чем в первых двух. Это объясняется

стремлением показать в самых малоосвоенных регионах связи между всеми населенными пунктами.

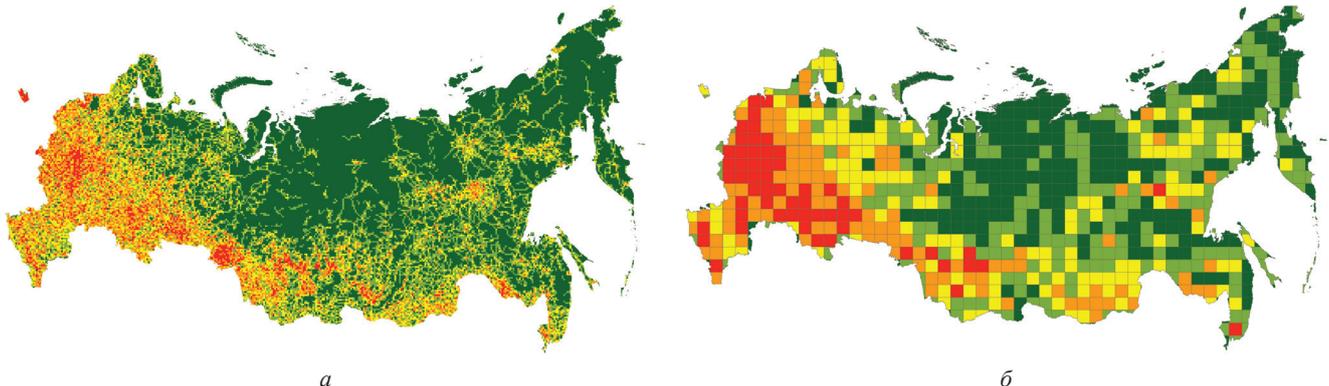
Для сравнения графической нагрузки объектов на единицу площади до и после генерализации, на исходные и полученные в результате генерализации данные была построена сетка с шагом 2 см в масштабе карты (как и для населенных пунктов). Для каждой ячейки была подсчитана суммарная протяженность попадающих в нее дорог. Длина каждого  $i$ -го иерархического класса дорог была умножена на весовой коэффициент равный  $i$ , чтобы учесть площадь, занимаемую знаком на карте. Далее на основе классификации были построены карты условной графической нагрузки дорожной сети на единицу площади карты (предполагается, что классификация дорог и сами условные знаки остались неизменными).

В исходных данных масштаба 1:1 000 000 на 4 см<sup>2</sup> на карте (400 км<sup>2</sup> на местности) в густозаселенных районах в среднем приходится 7–15 см автомобильных дорог (рис. 5, а). После генерализации для масштаба 1:8 000 000 в густозаселенных районах на 4 см<sup>2</sup> карты (40 000 км<sup>2</sup> на местности) приходится в среднем 8–15 см автомобильных дорог (рис. 5, б), а в малоосвоенных сохраняются практически все дороги, соединяющие населенные пункты.

При сравнении двух картограмм можно сделать вывод, что в целом рисунок пространственной дифференциации графической нагрузки примерно сохраняется. Однако максимальные значения густоты дорожной сети после генерализации выше, чем в исходных данных.

**Визуальная оценка результатов генерализации.** Для визуальной оценки качества генерализации наиболее интересно рассмотреть регионы с кластерным и равномерным размещением населенных пунктов, которое в свою очередь определяет и морфологию транспортной сети.

На рис. 6 представлены фрагменты карты масштаба 1:8 000 000 на территории юга Восточной Сибири, а также Центральной части Европейской России, включая столичный регион. Анализ данных фрагментов позволяет утверждать что алгоритм позволяет сохранить связность населенных пунктов, используемых



**Рис. 5. Условная графическая нагрузка дорог на карте:**

*a* — масштаб 1:1 000 000; *б* — масштаб 1:8 000 000;  
 условная графическая нагрузка: ■ — >7; ■ — 5–7; ■ — 3–5; ■ — <3; ■ — 0;  
 1 усл. ед. — 1 см дороги самого низкого класса на 4 см<sup>2</sup> карты

в качестве начального условия, вне зависимости от типа размещения населенных пунктов.

При этом, благодаря сильной зависимости размещения населенных пунктов и конфигурации транспортных сетей в мелких масштабах, удается также сохранить и характерные пространственные рисунки, образы территории. Так, например, на рис. 6, *б* хорошо прослеживается радиальный рисунок дорожной сети, расходящейся от Москвы в разных направлениях. Сравнение результатов генерализации с рукописной картой масштаба 1:8 000 000 [13] показывает, что комбинация предложенных алгоритмов дает схожий с ручным отбором результат.

Следует обратить внимание также на то, что в результаты отбора можно легко включить те сегменты дорожной сети, которые ведут не к населенным пунктам, а к промышленным (месторождения), рекреационным объектам и любым точкам интереса. Для этого достаточ-

но эти точки добавить к населенным пунктам. При необходимости такие особые точки могут быть установлены оператором вручную.

В силу высокой автоматизации процесса отбора дорог полученная карта содержит и ряд ошибок в связности населенных пунктов, которые требуют ручной коррекции. Так, например, оказались потерянными важнейшие магистрали, соединяющие города Нефтеюганск и Тобольск (рис. 7, *а*), Алдан и Якутск (рис. 7, *б*). Данные ошибки частично обусловлены географической асимметрией построения маршрутов, которая обусловлена конфигурацией населенных пунктов. Так, например, если к северу от населенного пункта сосредоточено большое число соседей, то будут отобраны только магистрали ведущие на север. Для устранения этого недостатка в будущем предполагается интегрировать подход, предложенный в работе [14] и основанный на вычислении маршрутов до соседей по диаграмме Вороного и дополнить



**Рис. 6. Фрагмент карты масштаба 1:8 000 000:**  
*a* — юг Восточной Сибири; *б* — центр Европейской части России

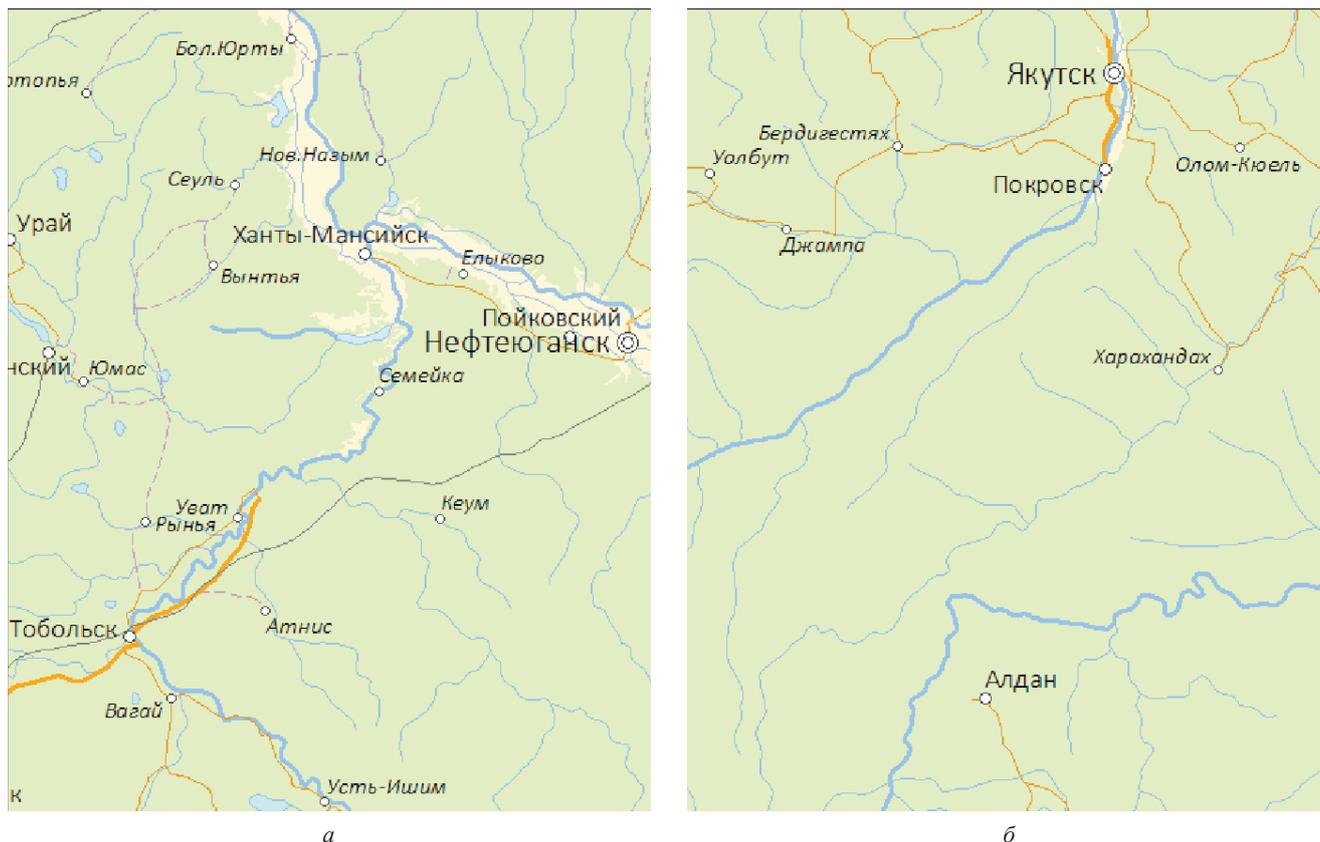


Рис. 7. «Потерянные» при отборе автодороги:  
 а — Тобольск — Нефтеюганск; б — Алдан — Якутск

им разработанную методику в части проверки полноты состава маршрутов.

**Выводы.** Предложен новый подход к автоматизированному отбору сегментов дорожной сети в мелких масштабах картографирования, основанный на построении маршрутов между заданными населенными пунктами. Основной параметр отбора — число маршрутов — дифференцируется по регионам различной густоты дорожной сети на основе численного анализа зависимости процента сохраняемых дорог от количества маршрутов.

В результате генерализации разработанным алгоритмом сохраняется соотношение графической нагрузки дорожной сети между разными регионами, при этом основной отбор производится в самых густозаселенных регионах и сохраняется достаточное количество дорог в малоосвоенных. В силу высокой связи морфологической структуры транспортной сети и конфигурации населенных пунктов с помощью предложенного алгоритма удается также сохранить характерные рисунки дорог в мелких масштабах. На основе визуального ана-

лиза полученной карты масштаба 1:8 000 000 выявлены ошибки в работе алгоритма и предложено направление их разрешения с использованием анализа соседства по диаграмме Вороного.

Дальнейшее совершенствование сопряженной методики генерализации населенных пунктов и дорожной сети видится в усилении обратной связи, при которой также и отбор населенных пунктов будет зависеть от их транспортной значимости, что может быть введено на основе сетевого и топологического анализа.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 14-05-00888-а и гранта Президента поддержки ведущих научных школ России НШ-2248.2014.5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самсонов Т.Е., Кривошеина А.М. Автоматизация отбора населенных пунктов с учетом пространственной неравномерности их распределения для целей мелкомасштабного картографирования. // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – №1. – С. 74–83.
2. Заруцкая И.П., Сваткова Т.Г. Проектирование и составление карт. Общегеографические карты. М.: Изд-во МГУ, 1982.

3. *Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. – Смоленск: Универсум, 2005. – 386 с.
4. *Mackness W.A. and Beard M.K.* Use of the graph theory to support map generalization // *Cartography and Geographic Information Systems*, 20(4), 1993.– p. 210–221.
5. *Li Z. and Choi Y.H.* Topographic map generalization: association of road elimination with thematic attributes // *The Cartographic Journal*, 39(2), 2002.– p.153166.
6. *Thomson R and Brooks R.* Generalization of Geographical Network. In: W.A. Mackness, A. Ruas and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalization of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*, 2007.– p.255–267.
7. *Krylov S., Dvornikov A., Zagrebin G., Petrov V., Plotnikov I.* The automation of technological processes for creating small-scale digital cartographic bases for general geographic and thematic mapping // *Proceedings of the 26th International Cartographic Conference*, 5 p.
8. *Samsonov T., Krivosheina A.* Joint generalization of city points and road network for small-scale mapping // *Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science GIScience 2012*, September 18–21, 2012, Columbus, Ohio, 2012. 7 p.
9. *Wang Z., Muller J.C.* Line Generalization Based on Analysis of Shape // *Cartography and Geographic Information Systems*, 25, 1998, pp 3–15.
10. *Töpfer, F., Pillewizer, W.* The Principles of Selection // *The Cartographic Journal*, 3 (1), 1966, p. 10–16.
11. *Li Z.*, 2007, *Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation*. CRC Press, 2007.– 310 с.
12. *Brewer C.A., Stanislawski L.V., Buttenfield B.P., Sparks K.A., McGilloway J., Howard M.A.* Automated Thinning of Road Networks and Road Labels for Multiscale Design of The National Map of The United States // *Cartography and Geographic Information Science*, 40(4), 2013, p. 259–270.
13. *Общегеографическая карта России*. Масштаб 1:8 000 000. Омская картографическая фабрика, 2012.
14. *Schmid F., Janetzek H.* A method for high-level street network extraction of OpenStreetMap data in OpenScienceMap // *Proceedings of the 26th International Cartographic Conference*, 2013.– 14 p.

*Принята к печати 8 сентября 2014 г.  
Рекомендована кафедрой картографии  
и геоинформатики МГУ им. Ломоносова*