

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

УДК 004.528.9

ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ПРИ МУЛЬТИМАСШТАБНОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ

© 2019 г. Т. Е. Самсонов*, Е. А. Прохорова**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

**e-mail: eaprohorova@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2016 г.; после доработки 01.02.2018 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

В статье предложен подход к генерализации транспортных сетей на мультимасштабных картах, основанный на автоматизированном выделении полимагистралей. Показана логическая связь между понятием полимагистрали как способа представления пространственно сопряженных участков транспортных путей разного типа и процессом генерализации картографического изображения. Разработана четырехуровневая спецификация уровней детализации для мультимасштабных карт транспортных сетей, в которой определено место полимагистралей на третьем и четвертом уровне детализации. Дано формализованное определение полимагистрали и компактной полимагистрали. На основе определения предложена геоинформационная технология выделения полимагистралей, основанная на пространственной интеграции линейных объектов и операций оверлея (пространственного наложения). Произведены алгоритмизация и реализация технологии на языке программирования Python. На примере железных и автомобильных дорог, отображенных на фрагментах цифровых общегеографических карт масштабов 1:1 000 000 и 1:2 500 000, апробировано выделение полимагистралей, показано сходство в экспертных и автоматически полученных результатах. Исследовано влияние расстояния поиска на пространственный охват выделяемых полимагистралей, дана их краткая географическая характеристика. В заключении намечены пути развития и совершенствования предложенного подхода.

Ключевые слова: мультимасштабное картографирование, карты транспортных сетей, генерализация, полимагистрали.

DOI: 10.31857/S2587-556620191107-117

Введение. Транспортная сеть обладает сложной внутренней организацией, которая характеризуется наличием дорог разного типа и класса, объединенных в топологическую структуру, и вместе обеспечивающих сложную систему транспортных связей и потоков [13]. Широкий диапазон географического охвата и неравнозначность элементов транспортной сети говорят о том, что ей, как и многим географическим явлениям, свойственна полимасштабность организации [15]. Отсюда следует, что аспекты картографирования транспортных сетей, связанные с масштабом, следует трактовать не только узко – в разрезе изменения масштаба и уровня детализации карты, но и в контексте отображаемых на ней объектов, которые могут иметь различный масштаб: пространственный (расстояния и зоны обслуживания), семантический (транспортная нагрузка, интенсивность сообщения) и временной (продолжительность, цикличность перевозок).

Масштаб транспортного потока может формироваться не только высокой интенсивностью

сообщения по одной магистрали, но также сочетанием сонаправленных близко идущих путей сообщения разного типа, образующих линейно вытянутые кластеры. Для обозначения таких сочетаний П.М. Поляном введено понятие *полимагистрали* [6]. Выделение полимагистралей представляет собой один из важных методов *генерализации* транспортных сетей на тематических картах.

Известно, что географический рисунок транспортной сети формируется под воздействием ряда факторов, отражая как экономико-, так и физико-географические условия [21]. В свою очередь, его особенности существенно влияют на экономические связи и во многом определяют уровень хозяйственного развития территории [2]. В соответствии с этим при генерализации изображения транспортных сетей на картах принимаются во внимание такие важные функции путей сообщения, как обеспечение связности населенных пунктов, перемещение грузов и населения, доступность центров обслужива-

ния [5]. Введение полимагистралей на тематических картах позволяет выделить комплексный характер транспортного сообщения на ключевых направлениях перевозок. В то же время понятие полимагистрали, основанное на оценке географической близости путей сообщения, может реализовываться в широком спектре пространственных масштабов, поскольку результат выделения полимагистралей зависит от расстояния, используемого в качестве порогового значения близости.

Многообразие проявлений масштаба в изучаемом явлении и размерах территории традиционно являлось причиной создания серий тематических карт разных масштабов, в том числе карт транспорта. В последнее десятилетие получило интенсивное развитие *мультимасштабное картографирование (МК)* – создание и использование электронных карт переменной детализации, обеспечивающих представление географических явлений во множестве масштабов [9]. Мультимасштабность карты в широком смысле слова означает не только возможность изменения масштаба и уровня детализации, но также возможность адаптации к различным проявлениям масштаба в картографируемом явлении, выражающейся во введении новых собирательных абстракций – таких, как полимагистрали.

Автоматизация процесса мультимасштабного картографирования требует разработки спецификации уровней детализации для представления многоуровневой структуры явления, а также наличия технологии автоматизированного получения этих уровней детализации на основе генерализации пространственных данных. В настоящем исследовании эти задачи решены на примере транспортных сетей с использованием полимагистралей.

Постановка проблемы. Впервые задача картографической генерализации как научная проблема была сформулирована немецким картографом Максом Эккертом [18]. В генерализации всегда выделяли две основные ее стороны, хотя называли их по-разному – формальная и смысловая [3], масштабная и целевая [17], феноменориентированная и графическая [23], пространственная и содержательная [5]. С.А. Тархов [13] определил ряд критериев отбора социально-экономических элементов и среди них один из самых значимых – принцип “географической типичности объектов”, который, с одной стороны, весьма отличен от формальных подходов к отбору объектов, а с другой – может учитывать их геометрическую сущность в пределах одного типа территории. Строгое обоснование выбора тех или иных алгоритмов генерализации является трудно разрешимой задачей [16], тем не менее, существует ряд зарекомендовавших себя

подходов, связанных с геометрическим обобщением рисунка транспортной сети.

Отбор элементов транспортных сетей осуществляется по разным принципам в зависимости от масштаба картографирования. В крупных масштабах особое внимание уделяется отбору наиболее значимых дорог, выделению сквозных проездов и городских магистралей [27, 28]. При переходе к мелким масштабам картографирования нюансы транспортной сети отходят на второй план и основными принципами отбора элементов становятся сохранение связности населенных пунктов и топологической структуры сети [10, 30]. При этом важным аспектом отбора дорог является необходимость обеспечить заданную графическую нагрузку [12].

Геометрическое упрощение линий при генерализации дорожной сети имеет место на всех масштабах картографирования и выполняется стандартными алгоритмами картографической генерализации линий [22]. При этом особое внимание уделяется сохранению топологических отношений между населенными пунктами [1].

Слияние дорог часто применяется при крупномасштабном картографировании, когда полосы движения преобразуются в коридоры движения и далее в осевые линии магистралей. Для этого могут быть использованы как алгоритмы конфликации (совмещения) данных [26, 29], так и методы, основанные на построении медианной оси [25].

В работах по картографированию транспортных сетей важную роль играют не только методы генерализации, но и различные абстракции, возникающие при описании полимасштабной структуры транспортной системы на высоких уровнях ее организации. К таким абстракциям относятся *полимагистрали* и *транспортные коридоры*.

Полимагистрали представляют собой “единение параллельно идущих линий различных видов общего и специального транспорта в территориально-сближенные и однонаправленные пучки” [6]. С одной стороны, полимагистрали объединяют несколько путей сообщения, образуя пространственно более крупный объект, покрывающий некоторую полосу, с другой – аккумулируют в себе пропускную способность и типы входящих в их состав транспортных путей, что наделяет их более крупным масштабом характеристик – как пространственных, так и содержательных (семантических). Под *транспортным коридором* понимается определенное направление (маршрут) массовых перевозок пассажиров и грузов между центрами социально-экономической активности, которое обслуживается несколькими видами транспорта, способными обеспечить высокие скорости перевозки [20].

Транспортные коридоры вводятся, как правило, в сверхмелких масштабах картографирования при необходимости сделать акцент на общегосударственный и международный аспект работы транспорта.

В [7] отмечается, что важнейшей проблемой в изучении и картографировании полимагистралей является определение критериев и пороговых расстояний для их выделения. Эта проблема отмечается также в работах [4, 30]. Очевидно, что постановка задачи выделения полимагистралей и транспортных коридоров с геометрической точки зрения родственна процедуре *слияния*, упомянутой ранее, однако к настоящему моменту методы и технологии, решающие эту проблему в приложении к мультимасштабному картографированию транспортных сетей, не разработаны.

Полимагистралей являются полезной высокоуровневой абстракцией, позволяющей идентифицировать линейные кластеры путей сообщения. Для их выделения и использования необходима не только соответствующая геометрическая процедура, но также определение их места в масштабном ряду картографирования. Решение этой проблемы в рамках мультимасштабного картографирования требует наличия спецификации уровней детализации: определения включаемых классов объектов, подробности их представления, оптимальных масштабов визуализации. Разработка такой спецификации, а также технологии выделения полимагистралей составляют основное содержание настоящей статьи.

Материалы и методы. Задача мультимасштабного картографирования транспортных сетей — отражение полимасштабности в организации транспортной сети путем последовательного обобщения и визуализации ее структуры, а также введения собирательных абстракций, таких как полимагистралей и транспортные коридоры, которые дают представление о сопряженности путей сообщения в обзорных масштабах рассмотрения. В основе реализации мультимасштабного подхода к картографированию транспортной сети лежит разработка спецификации уровней детализации.

Основное внимание при выделении уровней картографирования уделяется составу, пространственным и семантическим характеристикам отображаемых путей сообщения, принципам их отбора и генерализации. Целесообразно выделить четыре таких уровня, при этом разграничение присущих им масштабных диапазонов достаточно *условно*: они могут корректироваться в зависимости от географических особенностей территории.

Первый уровень — это, как правило, исходный картографический материал с минимальной

степенью отбора: сеть железных дорог общего пользования, автомагистрали, автомобильные дороги с усовершенствованным покрытием, грунтовые автомобильные дороги, водные пути сообщения, трубопроводы. Для высокого уровня сложности структуры транспортной сети на картах 1-го уровня находят отражение первые три вида транспортных путей. Масштабный диапазон — 1:1 000 000—1:2 500 000.

Второй уровень сохраняет автомагистрали и шоссе, железные дороги, трубопроводы и водные пути (генерализация сети путей сообщений по двум направлениям — отбор и упрощение очертаний) — все магистральные пути сообщения. При сложной структуре транспортной сети, если не удастся при проведении отбора обозначить конкретные количественные критерии, генерализация выполняется исходя из принципа сохранения структуры ведущих международных и внутригосударственных транспортных путей широтного и меридионального направлений. При низком уровне сложности сохраняются автомагистрали и скоростные дороги с покрытием, соединяющие транспортные узлы; допустимы отрезки и сегменты дорог к населенным пунктам, удаленным от основных дорог до 30 км. Основным критерием для отбора второстепенных дорог является их значимость (соединяет ли населенные пункты и транспортные узлы, является ли единственной дорогой в малонаселенном регионе). Масштабные диапазоны: 1:2 000 000—1:4 000 000; 1:4 000 000—1:8 000 000; 1:8 000 000—1:15 000 000.

Третий уровень характеризуется значительной степенью отбора и геометрического упрощения, при его создании выделяются, прежде всего, основные магистрали — ведущие линии в коммуникационной сети, характеризующиеся наибольшей пропускной способностью. Кроме отдельных видов путей сообщения сеть дорог на этом уровне представлена также полимагистральями. Масштабные диапазоны: 1:4 000 000—1:8 000 000; 1:8 000 000—1:15 000 000; 1:15 000 000—1:100 000 000. С помощью выделения магистралей и полимагистралей, которые отражают важнейшие экономические связи, ярко проявляется линейная концентрация территориальной структуры хозяйства.

Четвертый уровень предполагает изображение в качестве отдельных путей сообщений лишь автодорог самого высокого класса, полимагистралей, а также транспортных коридоров. Масштабные диапазоны картографирования: 1:15 000 000—1:100 000 000, 1:100 000 000—1:200 000 000.

Проведение генерализации при смене уровня детализации требует правильного учета факторов, влияющих на конфигурацию транспорт-

ной сети: природных – рельефа, конфигурации (очертаний) береговой линии, материка и речной сети; экономико-географических – плотности населения, экономической эффективности отдельных путей, размещения транспортных узлов, основных направлений транспортных потоков, территории, обслуживаемой транспортной сетью; политико-географических – очертания границ.

Учет взаимосвязи между различными элементами содержания карты, например, между населенными пунктами и путями сообщения (устранение второстепенных населенных пунктов) влечет исключение местных путей, связывающих эти пункты с магистральными линиями. В процессе отбора населенных пунктов – изображение или неизображение определяется в зависимости от их удаленности от показываемых дорог. При этом сеть населенных пунктов обобщается в соответствии с дорожной сетью. Непременным условием является необходимость сохранить густоту дорог [8].

При составлении карт масштаба 1:4 000 000 и мельче первоочередной задачей становится сохранение и визуальное подчеркивание иерархической структуры дорожной сети, то есть на смену однообразному графическому оформлению дорог приходит система условных знаков с четкой дифференциацией по иерархическим ступеням [11].

Одним из важных приемов генерализации является введение на третьем, иногда втором уровне детализации понятия полимагистрали. Критерий сближенности при этом будет зависеть от масштаба визуализации. Так, например, в масштабах 1:4 000 000–1:8 000 000 оптимально использовать расстояние в пределах 10–20 км. При составлении карты “Транспорт и его влияние на природную среду” [14] масштаба 1:60 000 000 объединение разных магистралей в полимагистраль на отдельных участках происходило при 70-километровом интервале.

Важнейшие условия при выделении полимагистралей – сонаправленность линий разных видов транспорта, а также возможность соединения полимагистралей с собственно дорогами и выбора в каждом конкретном случае наиболее подходящего вида и структуры условного знака, позволяющего различить состав полимагистралей. Различные структурные типы полимагистралей (железнодорожно-речные, автомобильно-речные, комплексные и т.д.) выделяются исходя из специфики их функционирования. Основной компонентный тип – железнодорожно-автомобильный, который рассмотрен в настоящей статье.

Автоматизированный поиск элементов транспортной сети, участвующих в формировании

полимагистрали, может быть осуществлен путем нахождения участков линий, которые при заданном расстоянии поиска d отклоняются друг от друга на расстояние, не превышающее d . Сформулируем данный принцип для случая двух линий.

Пусть дана линия A . Введем систему линейных координат – такую, что координатой любой точки $p \in A$ будет являться криволинейное расстояние вдоль A от начальной точки $p_0 \in A$ до p . Обозначим через A_{pq} участок линии A между точками p и q . Аналогичным образом введем систему линейных координат и участок для линии B и точек v и w , принадлежащих ей. Тогда при заданном расстоянии d будем считать формирующими полимагистраль участки A_{pq} и B_{vw} если расстояние от любой точки $a \in A_{pq}$ до ближайшей к ней точки $b \in B_{vw}$ не превышает d , и наоборот. Иначе говоря, это такие пары участков линий A и B , Хаусдорфово расстояние между которыми $d_H(A_{pq}, B_{vw}) \leq d$.

Расширим понятие полимагистрали на случай $N > 2$ линий. Пусть даны линии $A_i, i = 1 \dots N$, образующие множество $\Omega = \cup A_i$. Тогда Ω является полимагистралью шириной d , если выполнено условие $d_H(A_i, A_j) \leq d$ при любых $i, j \in \{1, \dots, N\}$. То есть *все линии упакованы в коридор шириной d* . Представим теперь, что множество Ω состоит из трех параллельных линий, отстоящих друг от друга на расстояние 15 км. Будет ли их совокупность являться полимагистралью при $d = 20$ км? Пары соседних линий – да, однако суммарная ширина найденного коридора составляет 30 км, что превышает заданный порог. Для разрешения таких ситуаций можно “ослабить” определение полимагистрали следующим образом. Будем считать множество линий Ω полимагистралью при заданном расстоянии d , если для любого $i \in \{1, \dots, N\}$ существует такое $j \neq i, j \in \{1, \dots, N\}$, что $d_H(A_i, A_j) \leq d$. При данном определении полимагистрали будет достаточно, чтобы Хаусдорфово расстояние *до ближайшей линии* в пучке полимагистрали не превышало d . Для обозначения отличия полимагистралей, полученных исходя из двух данных определений, объекты первого типа (упакованные в коридор заданной ширины) мы будем называть *компактными полимагистралями*.

Целесообразно выдвинуть следующие требования к технологии (алгоритму) выделения полимагистралей:

1. Поиск полимагистралей осуществляется в соответствии с формальным определением.
2. Алгоритм поиска полимагистралей должен работать для произвольного количества линейных объектов и их типов.
3. Результатом поиска должно быть множество линейных объектов, в котором найденные

полимагистралей представлены в виде одной осевой линии.

- Объекты, не образующие полимагистралей, сохраняют свою атрибутивную информацию (вид транспорта).

При такой постановке задачи нахождение осевых линий полимагистралей может быть осуществлено различными путями: посредством слияния входящих сегментов или путем выделения площади, занимаемой полимагистралью [19] и построения ее срединной оси [24]. Дополнительно можно добавить условие параллельности линий, однако на практике строгая параллельность выполняется только в крупных масштабах, и на обзорных уровнях детализации это условие только усложнит решение задачи.

Результаты и их обсуждение. На основе предложенных требований была разработана технология построения *компактных полимагистралей*, состоящих из железных и автомобильных дорог (*бимагистралей*). Технологическая схема алгоритма представлена на рис. 1. Ключевой компонентой, обеспечивающей нахождение полимагистралей, является операция *Интеграции (Integrate)*, которая совмещает вершины и линейные сегменты близко расположенных объектов (точек, линий, границ полигонов), если они находятся на расстоянии, не превышающем d . Количество интегрируемых объектов при этом не ограничено. Также в процессе интеграции совмещению подвергаются вершины самого объекта – происходит стягивание ребер, узлы которых расположены на расстоянии, меньшем d . Эта особенность позволяет реализовать одновременно со слиянием соседних линий их геометрическое упрощение. Обратим внимание, что в процедуре участвуют также точки населенных пунктов и узлы пересечения автомобильных и железных дорог, выделяемые функцией *Пересечения (Intersect)*. Это

позволяет, по возможности, сохранить корректность топологических отношений в системе “населенные пункты – транспортная сеть”.

Таким образом, использование интеграции позволяет полностью удовлетворить требования 1, 3 и частично 2. Расширение возможностей работы алгоритма для включения произвольного количества типов объектов возможно путем введения дополнительных параметров. Остальные компоненты технологии реализуют чтение, подготовку и сохранение данных, а также обеспечение выполнения требования 4. В частности, после интеграции данных выполняются операции *оверлея* данных *Пересечение (Intersect)* и *Симметрическая разность (Symmetrical Difference)*, позволяющие выделить полимагистралей (совпадающие участки автомобильных и железных дорог), а также автомобильные и железные дороги (участки дорог, не совпадающие с полимагистральями). Результирующие линии объединяются с помощью операции *Объединения (Merge)* в один набор данных с сохранением атрибутивной информации линий, что удобно для последующего управления результатами и их отображения. Еще одним выходным параметром инструмента являются точки населенных пунктов, которые могут подвергаться смещению в процессе интеграции. Реализация технологии осуществлена путем разработки скрипта на языке программирования Python и его интеграции в виде инструмента для ГИС-пакета ArcGISDesktop 10.5.

Технология была апробирована на примере поиска полимагистралей по данным общегеографических карт России масштабов 1:1 000 000 (предоставлена компанией Дата+) и 1:2 500 000 (ВСЕГЕИ). В качестве тестовой области были выбраны Волгоградская область (1:1 000 000) и Центральный федеральный округ (1:2 500 000).

Результаты экспертного (ручного) и автоматизированного выделения полимагистралей на

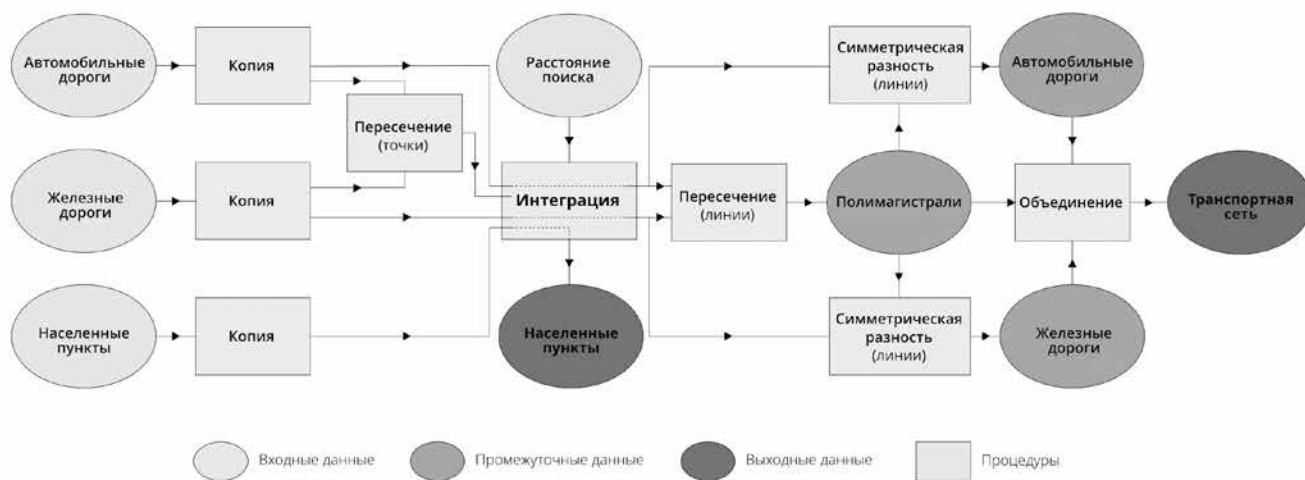


Рис. 1. Технологическая схема (алгоритм) выделения полимагистралей.

территорию Волгоградской области приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно. В процедуре участвовали все населенные пункты (на рисунке показаны не все в целях обеспечения читаемости), а также дороги с исходного картографического материала. При анализе полученных изображений можно наблюдать рост количества полимагистралей с увеличением параметра d . Наиболее адекватным и приближенным к экспертному выделению полимагистралей представляется результат, полученный при расстоянии поиска 4 км. При дальнейшем увеличении расстояния (6 км) начинаются значительные сдвиги линий, приводящие к неестественной изломанности полимагистралей, а при больших расстояниях (12 км) транспортная сеть приобретает черты абстрактного графа.

На рис. 4 представлены результаты поиска полимагистралей по данным карты масштаба 1:2 500 000. В этом эксперименте были использованы все элементы транспортной сети с исходного картографического материала, но из населенных пунктов были сохранены преимущественно транспортные узлы и тупиковые поселения.

На этом примере наблюдается схожий рост полимагистралей при увеличении расстояния поиска. Первое оптимальное значение достигается при расстоянии поиска 2 км, когда заполняются многие пробелы на основных направлениях, но линии при этом не приобретают угловатый характер. При расстоянии 4 км поли-

магистраль образуется на Рижском, Смоленском и Брянском направлениях, 6 км – Воронежском. При расстоянии поиска 12 км почти все радиальные транспортные артерии преобразуются в полимагистралей на длительном протяжении, их геометрические очертания приобретают абстрактные формы.

Таким образом, можно сделать вывод, что с использованием предложенной технологии можно получить несколько уровней детализации представления транспортной сети с последовательным введением полимагистралей при увеличении расстояния поиска. Предложенная технология может быть использована в рамках разработанной спецификации уровней детализации мультимасштабной карты транспортной сети. В то же время заметим, что использование стандартной для ГИС процедуры интеграции при выделении полимагистралей обладает своими особенностями. Так, например, при увеличении расстояния слияние линий может происходить не последовательно, то есть одна и та же линия может присоединяться к разным соседним линиям при изменении расстояния поиска, что является недостатком конкретной реализации используемой нами функции интеграции. Соответственно, одним из направлений дальнейшего совершенствования предложенной технологии должна быть разработка более робастного алгоритма выделения осевой линии полимагистралей.

Заключение. По итогам выполненных работ получены следующие результаты:

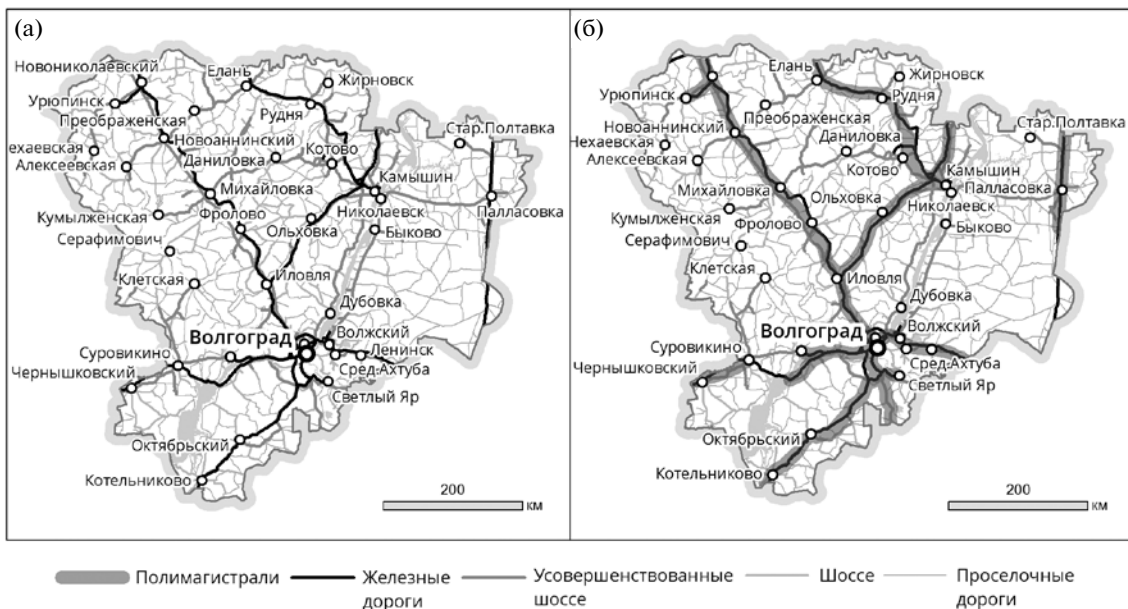


Рис. 2. Полимагистралей, автомобильные и железные дороги Волгоградской области: (а) исходные данные (масштаб 1:1 000 000), (б) результат ручного выделения полимагистралей.

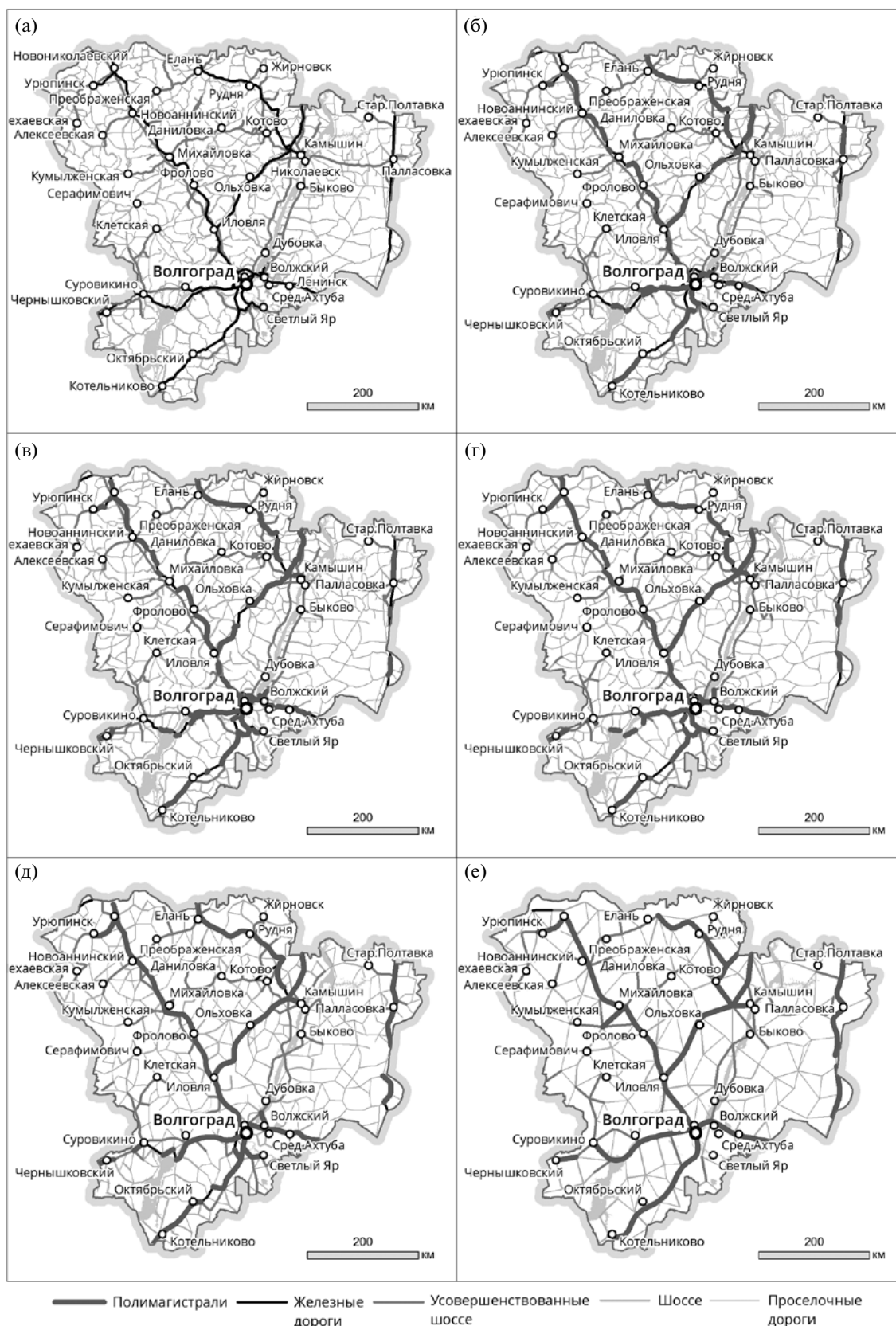


Рис. 3. Полимагистралы, автомобильные и железные дороги Волгоградской области: (а) исходные данные с топографической карты масштаба 1:1 000 000, (б)–(е) полимагистралы, полученные при расстоянии поиска 1, 2, 4, 6, 12 км.

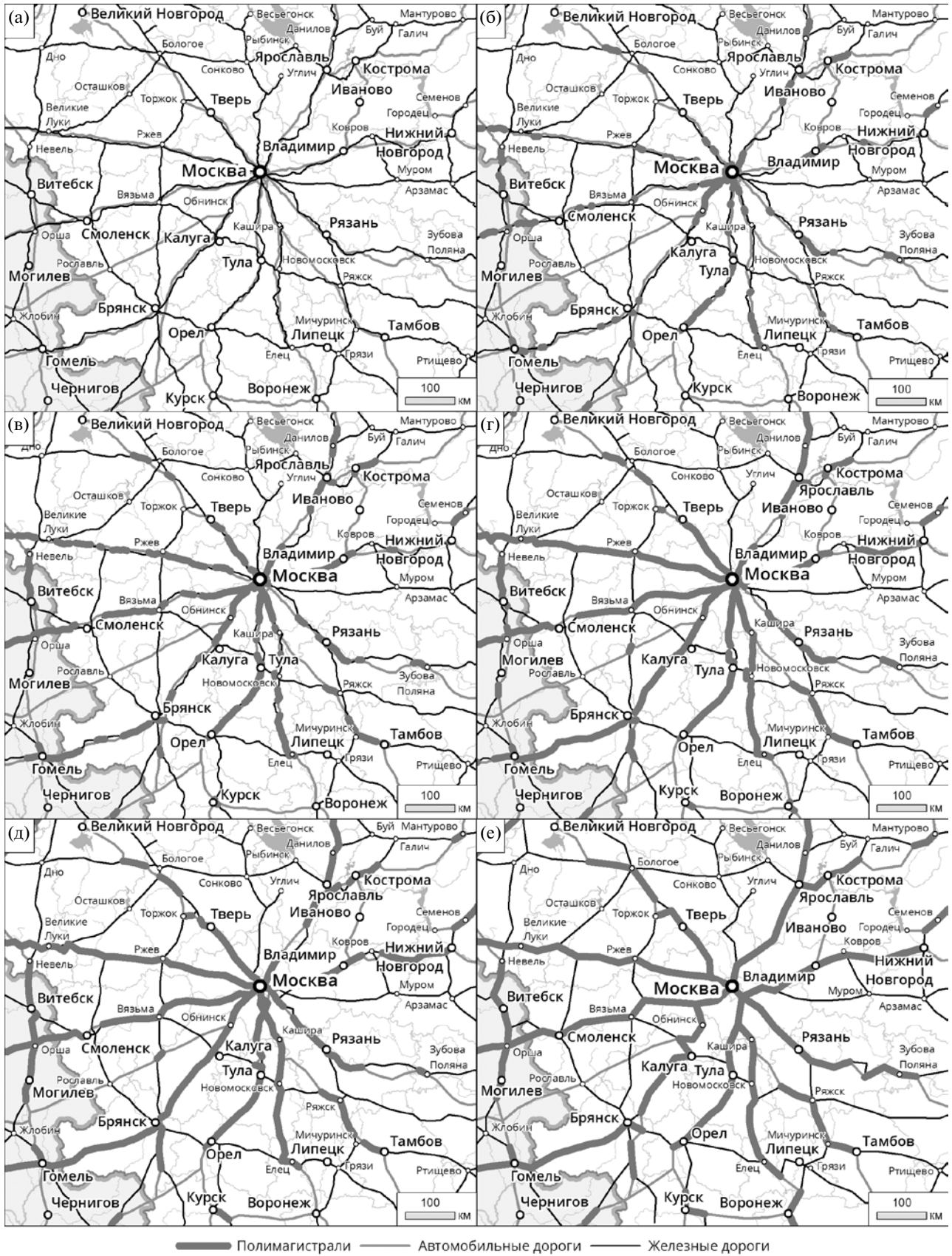


Рис. 4. Полимагистралы, автомобильные и железные дороги центра европейской части России: (а) исходные данные с топографической карты масштаба 1:2 500 000, (б)–(е) полимагистралы, полученные при расстоянии поиска 1, 2, 4, 6, 12 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Показана логическая связь между понятием полимагистрали как способа представления пространственно сопряженных участков транспортных путей разного типа и процессом генерализации картографического изображения на мультимасштабных картах.

2. Разработана четырехуровневая спецификация уровней детализации для мультимасштабных карт транспортных сетей, в которой определено место полимагистралей на третьем и четвертом уровнях детализации.

3. Дано формализованное определение полимагистрали, необходимое для автоматизации процесса их выделения методами пространственного анализа. На основе него предложена технология выделения полимагистралей, базирующаяся на пространственной интеграции линейных объектов и операций оверлея (пространственного наложения). Произведены алгоритмизация и реализация технологии на языке программирования Python.

4. На примерах данных цифровых карт масштабов 1:1 000 000 и 1:2 500 000 апробировано выделение полимагистралей путем объединения сопряженных путей автомобильных и железных дорог, показано сходство при экспертном и автоматизированном способах выделения полимагистралей.

Дальнейшее развитие предложенного подхода видится в разработке более совершенного алгоритма выделения полимагистралей, а также методики мультимасштабного картографирования транспортных сетей, основанной в том числе на опыте создания тематических карт транспорта. Многоуровневое картографическое представление с выделением полимагистралей и параметризацией их характеристик предоставляет возможность анализировать полимасштабную структуру транспортной сети страны, представить ее основные векторы напряжения и коридоры в наглядной графической форме. Результаты могут найти применение как в среде исследователей, специализирующихся в географии транспорта, так и при решении производственных транспортных задач.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ 17-05-41115-RGO_a и РФФИ 18-07-01459-а.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов и редколлегию журнала за полезные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

Funding. The study was funded by RFBR, projects 17-05-41115-RGO_a and 18-07-01459-a.

Acknowledgments. The authors thank the reviewers and the editorial Board of the journal for useful comments that allowed to improve the quality of the paper.

1. Алгоритм геометрического упрощения множества линий путем стягивания ребер графа с сохранением топологии / ред. Т.Е. Самсонов, О.П. Якимова, В.В. Алексеев, В.Г. Богаевская, А.А. Горохов, В.Н. Князев, М.М. Преображенская, А.Ю. Ухалов, Х. Эдельсбруннер // Геодезия и картография. М. 2014. № 3. С. 29–36.
2. *Баранский Н.Н.* Экономическая география. Экономическая картография. М.: Географиздат, 1956 (2-е изд. 1960). 367 с.
3. *Васмут А.С.* Моделирование в картографии с применением ЭВМ. М.: Недра, 1983. 200 с.
4. *Воробьев А.А.* Политранспортные магистрали // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1973. № 3. С. 88–91.
5. *Евтеев О.А.* Проектирование и составление социально-экономических карт. М.: Изд-во МГУ, 1999. 225 с.
6. *Полян П.М.* Методика выделения и анализа опорного каркаса расселения. М.: ИГ АН, 1988. Ч. 1 – 220 с., ч. 2 – 66 с.
7. *Полян П.М.* Территориальные структуры – урбанизация – расселение: теоретические подходы и методы изучения. М.: Новый хронограф, 2014. 783 с.
8. *Прохорова Е.А.* Социально-экономические карты. М.: Книжный дом Университет, 2010. 414 с.
9. *Самсонов Т.Е.* Мультимасштабное картографирование – новое направление картографии // Современная географическая картография / под ред. И.К. Лурье, В.И. Кравцовой. М.: Изд. Дата+, 2012. С. 21–35.
10. *Самсонов Т.Е., Кривошеина А.М.* Генерализация дорожной сети в мелких масштабах картографирования с сохранением связности населенных пунктов // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. М. 2015. № 2. С. 23–30.
11. *Самсонов Т.Е., Кривошеина А.М.* Автоматизация отбора населенных пунктов с учетом пространственной неравномерности их распределения для целей мелкомасштабного картографирования // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. М. 2015. № 1. С. 74–82.
12. *Самсонов Т.Е., Подольский А.С.* Автоматизация вычисления параметров отображения дорожной сети и структуры населенных пунктов на мультимасштабных картах // Геодезия и картография. М. 2014. № 9. С. 21–28.
13. *Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск: Универсум, 2005. 386 с.
14. Транспорт и его влияние на природную среду (карта) // Атлас “Природа и ресурсы Земли”. Вена–М., 1998. Atlas “Resources and Environment”. Wien, M., 1998.
15. *Трейвиш А.И.* Принцип полимасштабности в географии и страноведении // Меняющаяся география зарубежного мира / под ред. И.С. Ивановой, И.М. Кузиной, А.С. Фетисова. Т. 17. Вопр. экономической и политической географии зарубежных стран. М., Смоленск: Ойкумена, 2007. С. 50–65.
16. *Флоринский И.В.* Генерализация в картографии: краткий обзор проблемы. Изд. АН СССР. Пушкин.

- науч. центр, Ин-т почвоведения и фотосинтеза, 1991. 54 с.
17. Ширяев Е.Е. Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. М.: Недра, 1984. 248 с.
 18. Eckert M. Die Kartenwissenschaft. Forschungen und Grundlagen einer Kartographischen Wissenschaft. Berlin, Leipzig: Walter de Gruyter & Co, Bd.1, 1921. 640 p.
 19. Edelsbrunner H., Kirkpatrick D., Seidel R. On the shape of a set of points in the plane. *Information Theory, IEEE Transactions on*. 1983. № 29 (4). P. 551–559.
 20. *European Yearbook 1994*. V. XLII. London: Martinus Nijhoff Publishers, 1996. 1256 p.
 21. Kohl J. Der Verkehr des Menschen in seiner Abhängigkeit von der Erdoberfläche. Dresden, 1841. 602 p.
 22. Li Z. Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation, CRC Press: Boca Raton, 2006. 310 p.
 23. Mark D.M., Csillag F. The nature of boundaries on “area-class” maps // *Cartographica*. 1989. V. 26. № 1. P. 65–78.
 24. Mekhedov I., Mestetskiy L. Skeleton of a Multi-ribbon Surface. Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space. 2010. P. 557–573. URL. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12156-2_42
 25. Nickerson B.G. Automated Cartographic Generalization For Linear Features // *Cartographica: The Int. J. for Geographic Inf. and Geovisualization*. 1988. V. 25. Issue 3. P. 15–66. URL. <http://utpjournals.press/doi/10.3138/4144-3U7G-MW01-1Q72>
 26. Saalfeld A. Conflation. Automated map compilation // *Int. J. of Geographical Inf. Systems*. 1988. V. 2. Issue 3. P. 217–228. URL. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02693798808927897>
 27. Thomson R.C., Richardson D.E. The “good continuation” principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks. *Proceedings of the ICA th International Cartographic Conference*, 1999. P. 1215–1223. URL. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.202.4737>
 28. Touya G. A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection // *Transactions in GIS*. 2010. V. 14. № 5. P. 595–614. URL. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2010.01215.x>
 29. Walter V., Fritsch D. Matching spatial data sets: a statistical approach // *Int. J. of Geographical Inf. Sci.* 1999. V.13. Issue 5. P. 445–473. URL. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/136588199241157>
 30. Weiss R., Weibel R. Road network selection for small-scale maps using an improved centrality-based algorithm // *J. of Spatial Inf. Sci.* 2014. № 9. URL. <http://josis.org/index.php/josis/article/view/166>
 2. Baransky N.N. *Ekonomicheskaya geografiya. Ekonomicheskaya kartografiya* [Economic Geography. Economic Cartography]. Moscow: Geografizdat Publ., 1956. 367 p.
 3. Vasmut A.S. *Modelirovanie v kartografii s primeneniem EVM* [Computer Modeling in Cartography]. Moscow: Nedra Publ., 1983. 200 p.
 4. Vorob'ev A.A. Polytransport trunk-lines. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1973, no. 3, pp. 88–91. (In Russ.).
 5. Evteev O. A. *Proektirovanie i sostavlenie sotsial'no-ekonomicheskikh kart* [Design and Social and Economic Mapping]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1999. 225 p.
 6. Polyani P.M. *Metodika vydeleniya i analiza opornogo karkasa rasseleniya* [An Approach for Determining and Analysis of Base Settlement Framework]. Moscow: Inst. Geogr. Akad. Nauk, 1988. Part 1 - 220 p.; part 2 - 66 p.
 7. Polyani P.M. *Territorial'nye struktury – urbanizatsiya – rasselenie: teoreticheskie podkhody i metody izucheniya* [Territorial Structures – Urbanization – Settlement: Theoretical Approaches and Methods of Study]. Moscow: Novyi Khronograf Publ., 2014. 783 p.
 8. Prokhorova E.A. *Sotsial'no-ekonomicheskie karty* [Social and Economic Maps]. Moscow: Knizhnyi Dom Univ. Publ., 2010. 414 p.
 9. Samsonov T.E. Multiscale mapping as a new direction in cartography. In *Sovremennaya geograficheskaya kartografiya* [Modern Geographical Cartography]. Lurie I.K., Kravtsova V.I., Eds. Moscow: Data+ Publ., 2012, pp. 21–35. (In Russ.).
 10. Samsonov T.E., Krivosheina A.M. Generalization of the road network in a small scale mapping while preserving the connectivity of settlement network. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Geodeziya i Aerofotos'emka*, 2015, no. 2, pp. 23–30. (In Russ.).
 11. Samsonov T.E., Krivosheina A.M. Automation of settlements selection procedure for small-scale mapping taking into account their uneven spatial distribution. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Geodeziya i Aerofotos'emka*, 2015, no. 1, pp. 74–82. (In Russ.).
 12. Samsonov T.E., Podolskii A.S. Automation of calculation of the road network mapping parameters and structure of settlements on multi-scale maps. *Geodeziya i Kartografiya*, 2014, no. 9, pp. 21–28. (In Russ.).
 13. Tarkhov S.A. *Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setei* [Evolutionary Morphology of Transport Networks]. Smolensk: Universum Publ., 2005. 386 p.
 14. Transport and its impact on natural environment. In *Atlas «Priroda i resursy Zemli»* [Atlas «Environment and Resources»]. Wien, Moscow, 1998. (In Russ.).
 15. Treivish A.I. The principle of polyscale in geography and regional geography. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries]. Ivanova I.S., Kuzina I.M., Fetisov A.S., Eds. Moscow, Smolensk: Oikumena Publ., 2007, vol. 17, pp. 50–65. (In Russ.).

REFERENCES

1. Samsonov T.E., Yakimova O.P., Alekseev V.V., Bogaevskaya V.G., Gorohov A.A., Knyazev V.N., Preobrazhenskaya M.M., Ukhalov A.Yu., Jedel's-brunner H. The algorithm of geometric simplification of a set of lines by tightening the edges of the graph while preserving the topology. *Geodeziya i Kartografiya*. Moscow, 2014, no. 3, pp. 29–36. (In Russ.).

16. Florinsky I.V. *Generalizatsiya v kartografii: kratkij obzor problemy* [Generalization in Cartography: Short Review of a Problem]. Pushchinskii Nauch. Centr, Inst. Pochovovedeniya i Fotosinteza, 1991. 54 p.
17. Shiryaev E.E. *Kartograficheskoe otobrazhenie, preobrazovanie i analiz geoinformatsii* [Cartographical Display, Transformation and Analysis of Geoinformation]. Moscow: Nedra Publ., 1984. 248 p.
18. Eckert M. *Die Kartenwissenschaft: Forschungen und Grundlagen zu einer Kartographie als Wissenschaft*. Berlin, Leipzig: W. de Gruyter, vol. 1, 1921. 640 p.
19. Edelsbrunner H., Kirkpatrick D., Seidel R. On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1983, no. 29(4), pp. 551–559.
20. *European Yearbook 1994*, vol. 42. London: Martinus Nijhoff Publishers, 1996. 1256 p.
21. Kohl J.G. *Der Verkehr und die Ansiedelungen der Menschen in ihrer Abhängigkeit von der Gestaltung der Erdoberfläche*. Dresden: Arnold, 1841. 602 p.
22. Li Z. *Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 310 p.
23. Mark D.M., Csillag F. The nature of boundaries on “area-class” maps. *Cartographica*, 1989, vol. 26(1), pp. 65–78.
24. Mekhedov I., Mestetskiy L. Skeleton of a multi-ribbon surface. In *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2010*, Taniar D., Gervasi O., Murgante B., Pardede E., Apduhan B.O., Eds., vol. 6016 of *ICCSA 2010. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 557–573.
25. Nickerson B.G. Automated cartographic generalization for linear features. *Cartographica*, 1988, no. 25(3), pp. 15–66.
26. Saalfeld A., Conflation. Automated map compilation. *Int. J. Geogr. Inf. System*, 1988, no. 2(3), pp. 217–228.
27. Thomson R.C., Richardson D.E. The ‘good continuation’ principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks. In *Proc. 19th Int. Cartographic Conf.*, 1999, pp. 1215–1223.
28. Touya G. A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection. *Transactions in GIS*, 2010, no. 14(5), pp. 595–614.
29. Walter V., Fritsch D. Matching spatial data sets: a statistical approach. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 1999, no. 13(5), pp. 445–473.
30. Weiss R., Weibel R. Road network selection for small-scale maps using an improved centrality-based algorithm. *Journal of Spatial Information Science*, 2014, no. 9, pp. 71–99.

Generalization of Transport Networks for Multiscale Mapping

T. E. Samsonov* and E. A. Prokhorova**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

**e-mail: eaprohorova@mail.ru

Received June 16, 2016; revised February 01, 2018; accepted September 21, 2018

The article presents an approach to the generalization of transport networks on multiscale maps, based on the automated derivation of transport corridors. The logical connection between the concept of a polymagistral as a way of representing spatially conjugated sections of transport routes of various types and the process of generalization of a cartographic image is shown. A four-level specification of levels of detail has been developed for multiscale maps of transport networks, in which the position of polymagistral routes is placed at the third and fourth levels of detail. A formal definition of a polymagistral route and a compact polymagistral route is given. Based on the definition, a GIS technology for extracting polymagistral routes based on spatial integration of linear objects and overlay operations (spatial overlay) was proposed. Algorithmic description of the proposed technology has been developed and then implemented using Python programming language. Using the railways and roads from 1:1 000 000 and 1:2 500 000 digital general maps, the extraction of polymagistral routes was tested, followed by the analysis of similarity between expert and automatically obtained results. The influence of the search distance on the spatial coverage of the polymagistral routes has been investigated, and their geographical characteristics are given. The ways of development and improvement of the proposed approach are outlined in the conclusion.

Keywords: multiscale mapping, transport network maps, generalization, polymagistral routes.