

УДК 711.4:681.3

© С.В. Еремеев, Д.Е. Андрианов, В.А. Комков

С.В. Еремеев, Д.Е. Андрианов, В.А. Комков

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ В ГИС

Введение

Интенсивное развитие геоинформационных технологий влечет за собой создание новых методов и алгоритмов для обработки пространственных данных. Хорошо проработаны и изучены вопросы обработки информации в области геологии и природопользования [1-3]. Структура пространственной информации становится более насыщенной и сложной при увеличении масштаба карты, что требует исследования закономерностей образования слоев и их взаимосвязей [4-8]. В качестве такого объекта исследования будем рассматривать карты городских территорий, которые образуются совокупностью слоев.

Существуют различные практические задачи, где используется информация о карте [9-10]. Это поиск пространственных объектов по определенному признаку, прокладка оптимальных маршрутов, прогнозирование пробок на городских улицах и т.д. Отметим, что многие задачи требуют для своего решения использования графа.

Граф городской территории может быть построен либо вручную, либо в автоматическом режиме. Ручной процесс достаточно трудоемкий и может быть оправдан, если территория имеет небольшие размеры или граф города имеет схематичное представление. Для карты города масштаба уровня 1:500 необходимо использовать алгоритмы автоматического построения графа.

Если городская территория содержит в себе информацию о кварталах и улицах в векторном виде, то задача построения графа упрощается. Однако если в карте отсутствует подобная информация или есть частично, но есть информация о других объектах городской территории, то стоит задача построения графа по этим неполным данным, где граф можно обнаружить по дополнительным неявным признакам. То есть, если будет алгоритм, с помощью которого можно получить слой кварталов или улиц из некоторого слоя или некоторых слоев, то граф будет построен. Решение этой задачи открывает в геоинформатике новую ветвь развития алгоритмов, сводящихся к получению искомого слоя из набора других слоев по неявным данным.

Представление графовой модели векторного слоя

В настоящее время одна и та же территория может иметь несколько моделей представления. Самое простое и наиболее часто используемое – это растровая и векторная модель местности. Если обозначить городскую территорию T , то существуют различные способы преобразования одной модели в другую, что выражается следующим образом:

$$T_V = F_V(T_R), \quad (1)$$

где T_V – векторное представление городской территории T , T_R – соответствующее растровое представление, F_V – преобразование растра в вектор.

$$T_R = F_R(T_V), \quad (2)$$

где F_R – преобразование векторного представления в растровое.

Существуют более абстрактные модели представления территории T . Рассмотрим представление территории в виде графа и свяжем ее с предыдущими описаниями.

Пусть T_G – это графовая модель территории T . Она может быть получена из векторной модели T_V и связана с ней следующим соотношением:

$$T_G = F_G(T_V), \quad (3)$$

где F_G – преобразование векторного представления в графовое.

Однако стоит заметить, что для формирования графовой модели из векторной необходима информация по одному из слоев s , из которых состоит территория T . То есть графовая модель строится не по всем объектам векторной модели, а лишь по объектам одного слоя.

Для того чтобы учитывать это факт введем дополнительное обозначение. Пусть $T_V^1, T_V^2, \dots, T_V^n$ – это серия векторных представлений исходной территории T по каждому из n слоев. Тогда графовая модель формируется по отдельному слою следующим образом:

$$T_G^1 = F_G^1(T_V^1), T_G^2 = F_G^2(T_V^2), \dots, T_G^n = F_G^n(T_V^n). \quad (4)$$

Запишем формулу (4) в общем виде:

$$T_G^s = F_G^s(T_V^s), \quad (s = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где T_G^s – серия графовых моделей городской территории по слоям s , T_V^s – серия векторных моделей

городской территории по слоям s , F_G^s – серия преобразований векторных слоев в соответствующую графовую модель, n – количество слоев.

Центральным звеном в формуле (5) является серия преобразований F_G^s , которые представляют собой набор алгоритмов получения графовых моделей из слоя s . То есть в зависимости от слоя необходимо использовать тот или иной алгоритм.

Задача автоматического преобразования карты в графовую модель решалась в [11] для создания дорожной сети путем анализа пересечения перекрестков слоя дорог. Результатом алгоритма является граф, который можно применять в навигации движения автотранспорта.

Использование графовой модели

В нашей задаче мы будем строить графовую модель, которая будет соответствовать расположению кварталов городской территории.

Рассмотрим слои, которые содержат явную и неполную информацию для создания графа городской территории, структура которого соответствует каркасу города.

Пусть имеем следующий набор слоев: слой улиц (рис. 1), слой кварталов (рис. 2), слой зданий (рис. 3). Очевидно, что слой кварталов и улиц содержит полную информацию для построения графа. Однако из слоя зданий тоже можно создать в точности такой же граф, но только по неявным признакам. На рис. 3 для наглядности слой зданий изображен вместе со слоем улиц. Причем в один слой объеди-

нены два типа зданий, на что указывают разные цвета. На рис. 4. показана графовая модель участка городской территории, вершины которой соответствуют пересечению улиц между кварталами. Для задач поиска оптимального пути в графе результатом являются координаты его вершин, а также матрица связей между ними. В этом случае требуется высокая точность вычисления координат.

Однако существует ряд задач, в которых требуется лишь структура графа, независимо от того, где расположены точки пересечения улиц. Важно лишь знать, какая вершина с какой связана.

Итак, пусть мы имеем несколько независимых ГИС-проектов, каждый из которых содержит свою карту местности или наборы карт, представленные отдельными планшетами. Причем могут встречаться одинаковые местности. То есть у одной и той же местности есть несколько карт. Эти карты имеют разные слои. Стоит задача из множества набора карт в автоматическом режиме найти те, которые описывают одинаковую местность, чтобы решать задачу объединения слоев. Для этого как раз требуется использование графовой модели городской территории, где анализироваться при поиске будут не сами карты, а структура их графов. Графы, соответствующие друг другу, и будут решением задачи.

Будем считать, что каркас городской территории, соответствующий структуре кварталов, имеет единственное графовое представление, которое обозначим через $G(V, E)$. Граф городской территории будем формировать из линейных пересекающихся

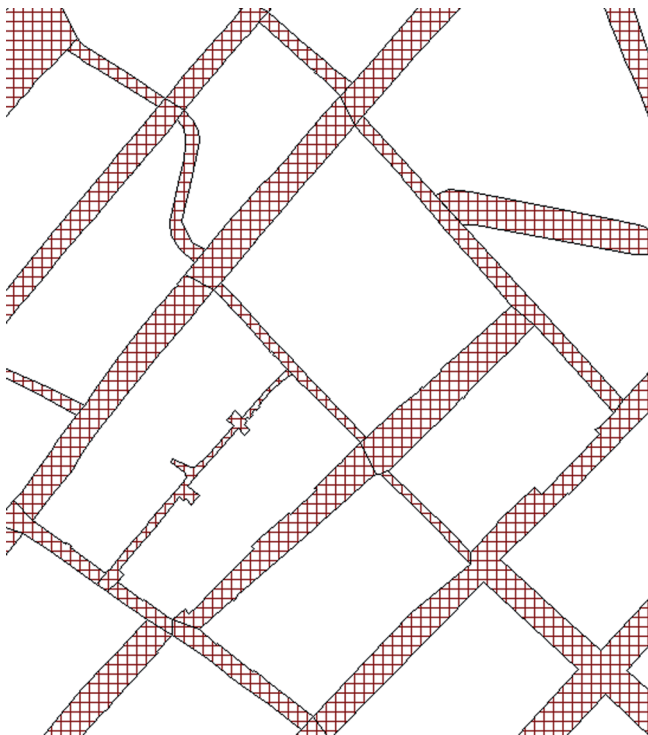


Рис. 1. Слой улиц

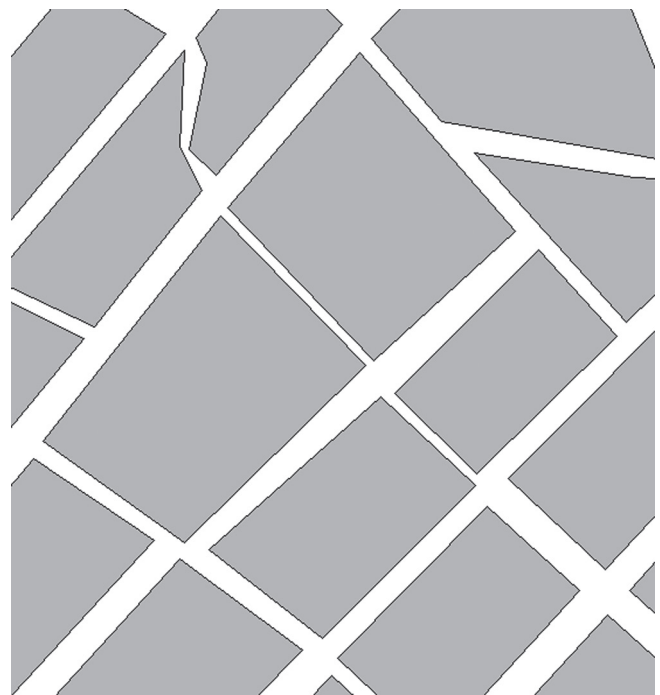


Рис. 2. Слой кварталов

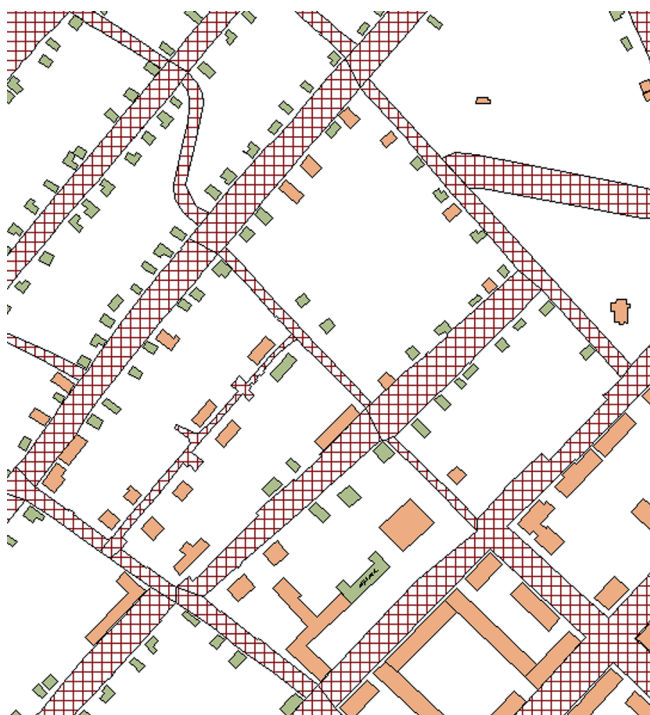


Рис. 3. Слой зданий и улиц

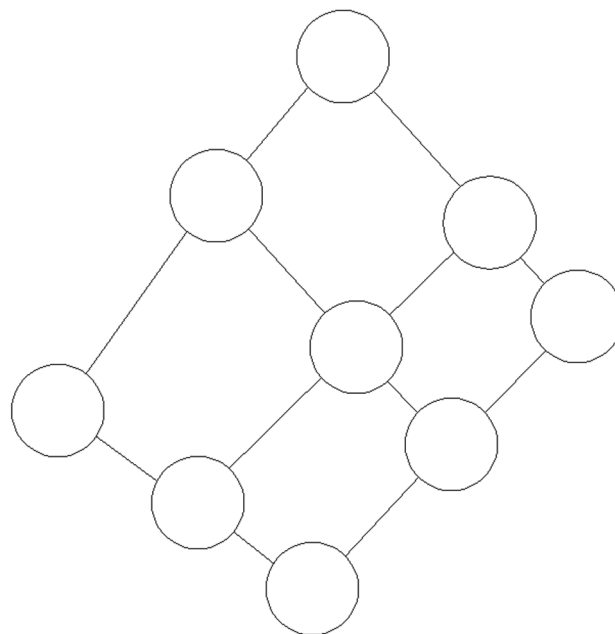


Рис. 4. Граф городской территории

объектов, которые располагаются на отдельном слое. То есть имеем, что:

$$G(V, E) = T_G^l, \quad (6)$$

где $G(V, E)$ – графовая модель городской территории, V – множество вершин графа, E – множество ребер, l – номер слоя, который состоит из линейных пересекающихся объектов.

Можно считать, что среди всех слоев s в векторной карте найдется k слоев, из которых можно построить граф $G(V, E)$. Очевидно, что не из всех слоев карты можно получить искомым граф.

Итерационный процесс формирования графа городской территории

Рассмотрим следующий итерационный процесс. Пусть мы можем получить граф из линейных объектов. Для того чтобы построить граф из слоя улиц, необходимо преобразовать его полигональные объекты (рис. 1) в линейные и записать в отдельный слой (рис. 4). Аналогичная ситуация наблюдается для кварталов. С другой стороны, пусть у нас есть только слой зданий или магазинов. Напрямую получить слой линейных объектов в этом случае нельзя из-за отсутствия явной информации. Однако скрытой информацией здесь является тот факт, что часть зданий и магазинов расположены вдоль дорог, что дает возможность предположить, где строить границу кварталов. То есть между этими слоями и кварталами априорно заложены топологические отношения, такие, как «Вложенность» и «Соседство». Значит, только лишь на основании одного такого слоя

мы можем сформировать слой кварталов или улиц, а затем и сам граф. Аналогично можно рассмотреть размещение любых других объектов карты, например, рекламных щитов, которые расположены либо на перекрестке, либо вдоль дороги.

То есть для построения графовой модели можно использовать не только слои улиц или кварталов, но и другие, менее информативные, но по которым все-таки можно построить граф $G(V, E)$.

Итерационное построение графа для рассмотренных случаев имеет вид:

$$G(V, E) = F_V^l(T_V^l)$$

$$T_V^l = \begin{bmatrix} f_1(T_V^u) \\ f_2(T_V^q) \end{bmatrix}$$

$$T_V^u = \begin{bmatrix} f_3(T_V^z) \\ f_4(T_V^m) \end{bmatrix}, T_V^q = \begin{bmatrix} f_5(T_V^z) \\ f_6(T_V^m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

где $G(V, E)$ – графовая модель городской территории, $F_V^l(T_V^l)$ – преобразование векторной модели линейных объектов в граф, $f_1(T_V^u), f_2(T_V^q)$ – преобразование слоя улиц и кварталов в линейные объекты, $f_3(T_V^z), f_4(T_V^m)$ – преобразование слоя зданий и магазинов в слой улиц и кварталов.

В данном случае преобразование f является обобщенным и для каждого случая имеет свой алгоритм, который позволяет рассчитать один векторный слой на основании другого. Например, для получения линейных объектов из кварталов и улиц в основе алгоритма лежит скелетизация объекта,

а для получения кварталов из зданий – топология и рекурсивный алгоритм перебора.

По формуле (7) формирования графа из слоя зданий будет записано так:

$$G(V, E) = F_V^l(f_2(f_5(T_V^z))). \quad (8)$$

Алгоритмы построения графовых и векторных моделей

Рассмотрим поочередно алгоритмы, соответствующие преобразованиям в формуле (7).

Алгоритм 1.

Функция $G = Graph(L)$ возвращает граф $G(V, E)$ в виде матрицы смежности на основе списка линейных объектов L .

Input: Список линейных объектов L слоя T_V^l , каждый из которых состоит из множества точек.

Output: Граф $G(V, E)$.

Begin

Установить G как пустую матрицу
 $count = 0$

For each l_i from L

$G \leftarrow V_s$ from l_i

$G \leftarrow V_e$ from l_i

$count += 2$

End For

For each $l_i \cap l_j : i \neq j$ from L

If V_p is not from G

$G \leftarrow V_p$

$count++$

$include(V_p, l_i)$

$include(V_p, l_j)$

End If

End For

For each l_i from L

$V_c = V_s$

$sum = 0$

For each p_j from l_i

If $p_j \neq V_s$ and $(p_j = V_p \text{ or } p_j = V_e)$

$G \leftarrow edge(V_p, V_c) = sum + dis(V_p, p_{j-1})$

$V_c = V_s$

$sum = 0$

End If

Else $sum += dis(p_j, p_{j-1})$

End For

End For

End

На начальной стадии алгоритма устанавливаем G как пустую матрицу и количество вершин $count$ в графе равно нулю. Из каждой линии l_i из L в граф G заносим новые вершины: начальную V_s и конечную V_e точки. Количество вершин в графе при этом увеличивается на два. Далее определяем все пересечения линий l_i и l_j из L таких, что линия не пересекается сама с собой, и находим точку пересечения V_p , которую

записываем в матрицу G , при условии, что она встречается впервые. Также вставляем ее как точку в линии l_i и l_j методом $include(V_p, l_i)$ и $include(V_p, l_j)$ соответственно.

Теперь необходимо связать вершины между собой. Для этого берем каждую линию, текущей вершине V_c присваиваем начальную вершину V_s и для каждой точки p_j из l_i проверяем: если она не начальная и является точкой пересечения или конечной, то заносим в граф G ребро $edge(V_p, V_c)$, которое связывает вершину V_p с предыдущей вершиной. После этого текущей вершиной становится V_p . Иначе формируем расстояние между точками линии l_i .

Схематично этот процесс изображен на рис. 5. Серые вершины соответствуют начальным и конечным точкам линий, а черные – перекресткам. На последнем этапе промежуточные точки заменяются ребрами.

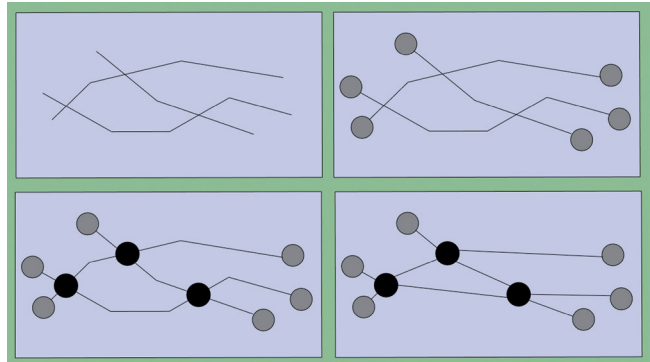


Рис. 5. Процесс преобразования слоя линейных объектов в граф

Алгоритм 2.

Функция $L = LinesFromStreets(U)$ возвращает список линейных объектов L , полученных на основе слоя улиц, которые представлены полигональными объектами.

Input: Список полигональных улиц U из векторного слоя T_V^u .

Output: Список линейных объектов L для слоя T_V^l .

Begin

Установить L как пустой список

$count = 0$

For each u_i from U

$l = skelet(u_i)$

$L \leftarrow l$

$count++$

End For

End

Сначала обнуляем список линейных объектов. Затем по каждому полигональному объекту строим его скелет и новый линейный объект l добавляем в список L .

Схема построения показана на рис. 6. Из каждого объекта выделяется середина и линии соединяются друг с другом.

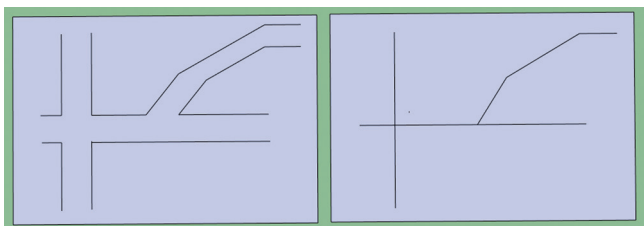


Рис. 6. Фрагмент полигонального слоя улиц и его скелетизация

Алгоритм 3.

Функция $L=LinesFromQuarters(Q)$ возвращает список линейных объектов L , полученных на основе слоя кварталов, которые представлены полигональными объектами.

```

Input: Список полигональных кварталов  $Q$  из векторного слоя  $T_v^n$ .
Output: Список линейных объектов  $L$  для слоя  $T_v^n$ .
Begin
    Установить  $L$  как пустой список
     $count=0$ 
    For each  $q_i$  from  $Q$ 
         $l = skeleton(q_i)$ 
         $L \leftarrow l$ 
         $count++$ 
    End For
End
    
```

Алгоритм 3 по своей структуре похож на алгоритм 2, за исключением метода формирования скелета объекта, который имеет одинаковое название, но разный механизм выполнения и зависит от входного слоя, т.е. присутствует полиморфизм.

Процесс формирования линейных объектов из полигональных кварталов проиллюстрирован на рис. 7. Находим середины между кварталами, соединяем и удаляем лишние грани.

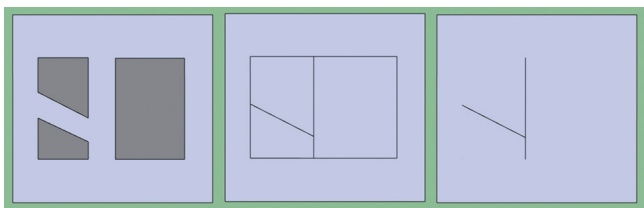


Рис. 7. Формирование линейных объектов из полигональных кварталов

Алгоритм 4.

Функция $Q=QuartersFromBuildings(Z)$ возвращает список полигональных объектов Q , полученных на основе слоя зданий, которые представлены также полигональными объектами.

```

Input: Список полигональных зданий  $Z$  из векторного слоя  $T_v^n$ .
Output: Список полигональных объектов  $Q$  для слоя  $T_v^n$ .
Begin
    Установить  $Q$  как пустой список
     $count=0$ 
    For each  $group$  from  $Z$ 
         $c = contour(group)$ 
         $Q \leftarrow c$ 
         $count++$ 
    End For
End
    
```

В алгоритме 4 необходимо рекурсивным перебором обнаружить группы полигональных объектов из слоя зданий. Затем на основе топологических отношений обнаружить контур каждой группы и записать его в слой кварталов. Процесс создания кварталов из слоя зданий продемонстрирован на рис. 8.

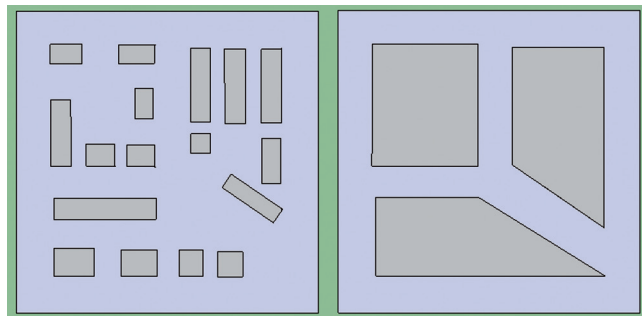


Рис. 8. Создание кварталов из слоя зданий

Исследование работы алгоритмов построения графовой модели

Разработано программное обеспечение в ГИС ИнГео, которое позволяет формировать графовую модель городской территории. Приложение работает как расширение геоинформационной системы, где на вход поступает необходимый слой и строится граф, что можно видеть на рис. 9.

Тестирование системы проводилось для карты города Муром. Входными данными являются кварталы городской территории, после чего в автоматическом режиме анализируется взаиморасположение пространственных объектов и формируется граф в отдельной программе. Полученный граф соответствует каркасу городской территории и может быть использован для решения других практических задач в ГИС.

Заключение

В работе рассмотрены существующие задачи для обработки пространственных данных применительно к крупномасштабным картам. Показана потребность в автоматическом создании графовой модели на основе существующих слоев карты. Математическими преобразованиями связаны растровая, векторная и графовая модель. Описана серия преобразований, которая позволяет получить серию графовых моделей карты. Показан на примерах итерационный процесс создания графовой модели как по явным так и по неявным данным. Разработаны алгоритмы, которые дают возможность получить искомым граф. На основе алгоритмов разработано программное обеспечение в ГИС ИнГео и исследована их работа на примере карты города Муром.

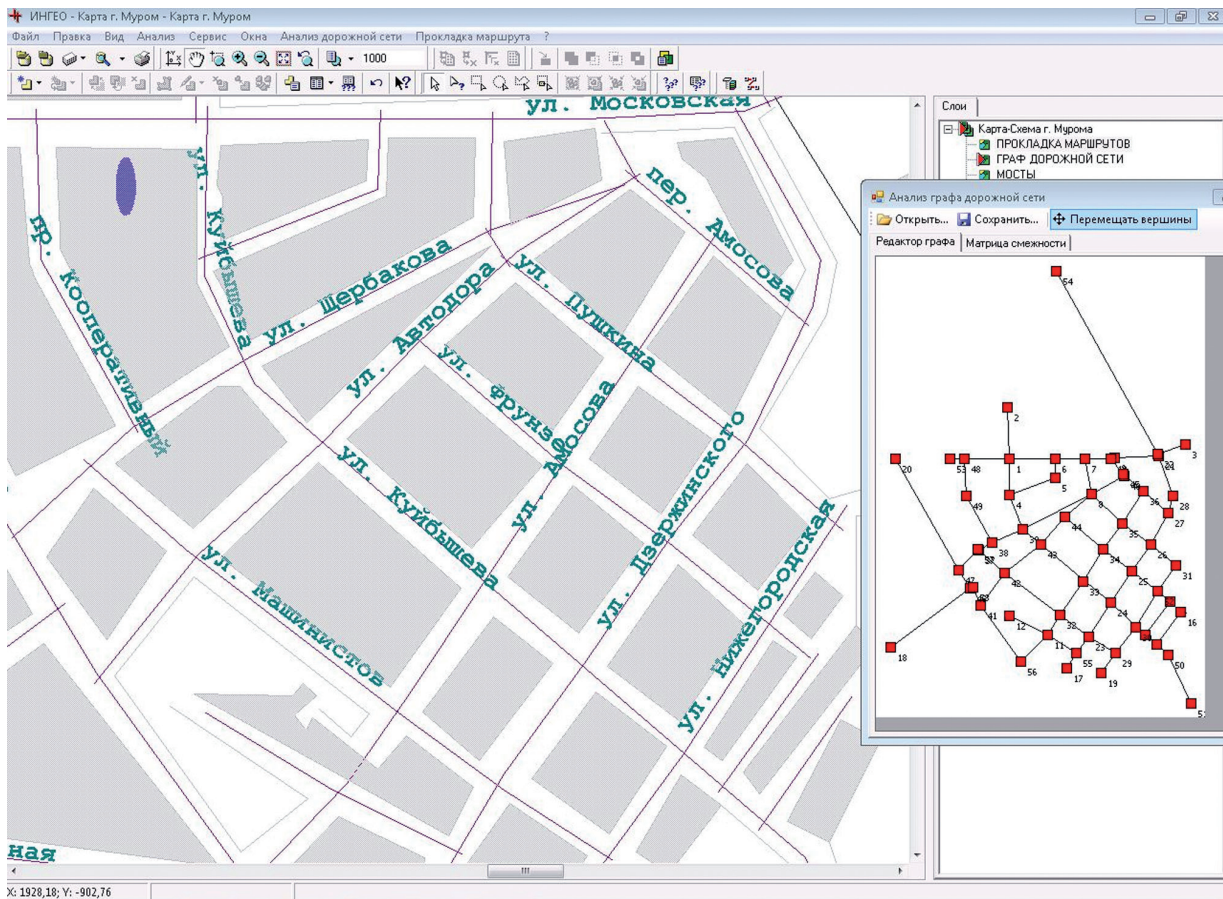


Рис. 9. Пример построения графовой модели городской территории в ГИС ИнГео

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-07-31182 мол_а).

Ключевые слова: графовая модель, городская территория, ГИС ИнГео.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Системный анализ процесса физико-геологического моделирования на основе геоинформационных систем // Геоинформатика. – 2012. – № 4. – С. 1-7.
2. Касимов Н.С., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы) // Геоинформатика. – 2013. – № 1. – С. 28-32.
3. Блискивицкий А.А., Климова Л.С. Интеллектуальная советующая процедура верификации номенклатуры и идентификации листа топографической карты (плана) // Геоинформатика. – 2012. – № 3. – С. 28-35.
4. Roland Billen, Yohei Kurata. Refining Topological Relations between Regions Considering Their Shapes // GIScience : 5th International Conference, 2008. – P. 20-38.
5. Дулин С.К. Розенберг И.Н. О развитии методологических основ и концепций геоинформатики // Системы и средства информатики. – М. : ИПИ РАН, 2006. – С. 201-256.
6. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Баринев А.Е., Титов Д.В. Алгоритмы поиска объектов по пространственным характеристикам в задачах муниципальных ГИС // Известия юго-западного государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 37-41.
7. Еремеев С.В. Алгоритмы обработки данных в геоинформационной системе для учета земельных участков // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 121-125.
8. Еремеев С.В. Пространственно-временной анализ муниципальных карт // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2012. – № 4. – С. 52-57.
9. Садыков С.С., Еремеев С.В., Автоматический контроль размещения пространственных объектов на цифровой карте с использованием топологических отношений // Информационные технологии. – 2005. – № 8. – С. 6-9.
10. Еремеев С.В. Алгоритм размещения слоев на цифровой карте в ГИС // Геоинформатика. – 2005. – № 2. – С. 22-26.
11. Мехедов И.С., Козлов А.В. Модель улично-дорожной сети на основе скелета // Графикон-2009 : сб. докл. 19-й междунар. конф., 2009. – С. 356-359.