

ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕРРИТОРИИ ТОМСКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОЙ КОСМОСЪЕМКИ

В.П. Иванов, А.И. Рюмкин, А.Л. Фукс

1. Введение

В настоящее время для гражданских приложений доступны российские космические системы высокодетального наблюдения, позволяющие получать качественные цифровые модели территории с помощью отечественных аппаратов высокого разрешения. Весной 1997 года в рамках подписанного с городской администрацией соглашения в Томске начались работы по организации градостроительного мониторинга на основе данных космического дистанционного зондирования. Основной целью на первом этапе было получение обновленных материалов для управления городской недвижимостью.

Полный технологический цикл формирования цифровой модели местности на основе классического метода цифровой фотограмметрии включает:

- организацию собственно космической съемки;
- выполнение ряда подготовительных работ по обрабатываемой территории (в основном связанных с построением модели рельефа и привязкой снимка);
- сканирование негатива и компьютерную обработку изображения;
- ортофототрансформирование;
- оцифровку (векторизацию) ортоизображения;
- проверку топологической корректности векторных данных;
- полевые работы по уточнению модели и сбору недостающих данных, а также камеральные работы по окончательной сборке модели, редактированию, нанесению текста, условных знаков, наполнению атрибутивных баз данных.

Подготовка электронной модели выполнялась в два этапа. Первый соответствовал территории города в прежних границах, второй дополнял ее за счет присоединенных земель. Территория города в старых границах достаточно хорошо покрыта необходимыми картографическими материалами. На большую ее часть имеются планшеты масштабов 1:500, 1:2000, но, к сожалению, довольно старые. На основе этих планшетов была осуществлена подготовка цифровой модели рельефа. На втором этапе выполнялась работа на присоединенных территориях, для которых практически не было крупномасштабных картографических материалов. Здесь потребовалось проведение геодезической съемки точек планово-высотной основы с помощью GPS-аппаратуры Ashtek Z12. Результаты измерений использовались для проверки качества рельефа, полученного со старых мелкомасштабных карт. Точки наземно-плановой высотной основы (около



Рис. 1. Фрагмент космоснимка.

40 шт.) снимались дифференциальным GPS-приемником в местной системе координат с точностью 10 см. Время одного измерения составляло несколько десятков минут. Количество навигационных спутников составляло от 5 до 8.

Съемка Томска проводилась летом и осенью 1997 года. Кроме того, при обработке была использована съемка 1989 года, которая в совокупности с последними снимками позволила получить данные об изменениях территории за данный период. Работы велись на основе космических данных камеры высокого разрешения (КВР-1000). Камера данного типа обеспечивает разрешение 2 м на панхроматической пленке со средним масштабом 1:200000. Отдельный кадр покрывает участок местности около 1600 км². Фрагмент снимка приведен на рис. 1.

2. Построение цифровой модели рельефа

Цифровую модель рельефа необходимо было получить в виде стандартной матрицы DEM высот в узлах регулярной сетки с шагом 2 м. Общий объем информации о рельефе города слишком велик, чтобы ее можно было обработать целиком, поэтому была выбрана технология построения цифровой модели рельефа по планшетам с последующим сшиванием отдельных частей в единую

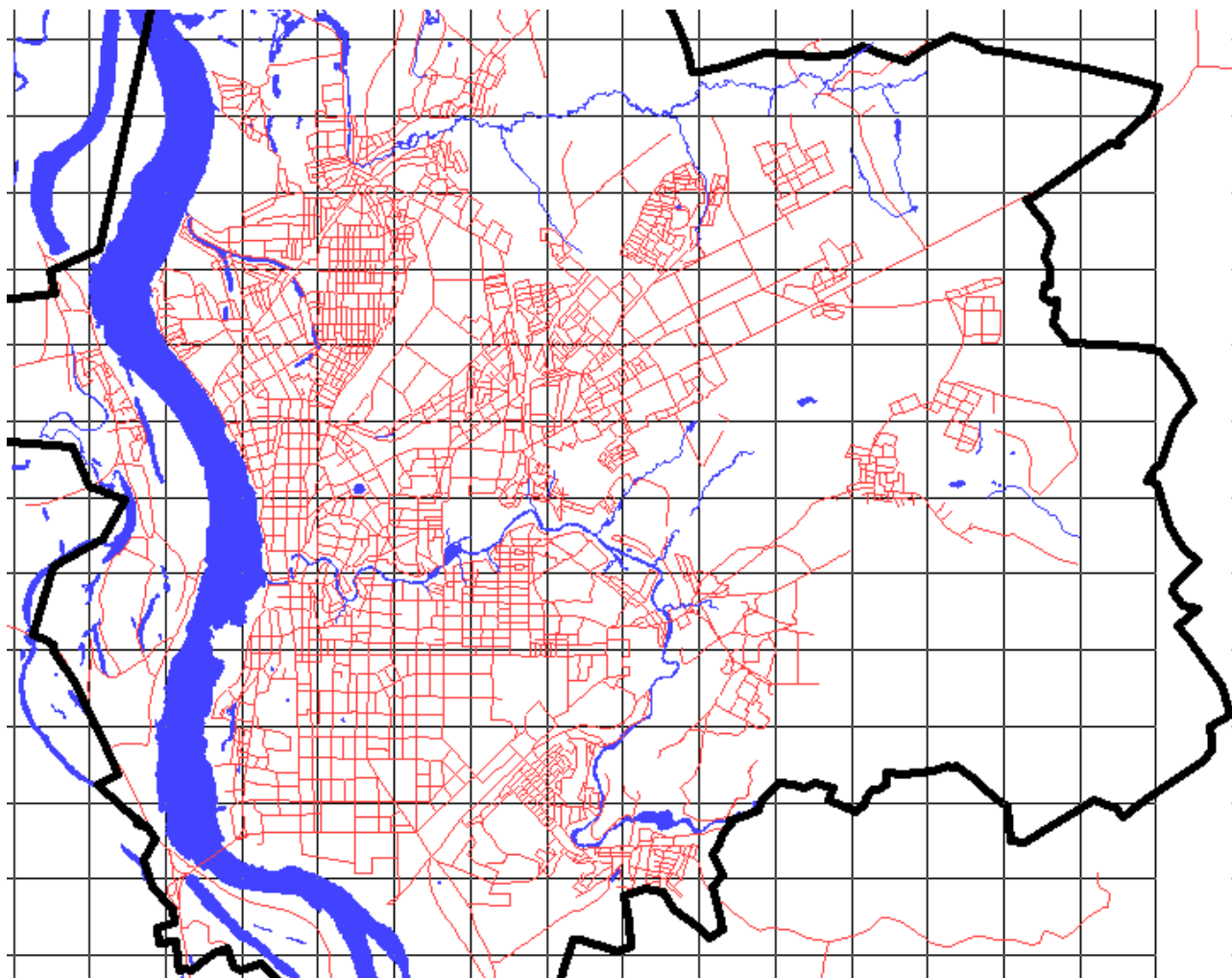


Рис. 2. Схема центральной части г. Томска.

матрицу. В основном использовались планшеты масштаба 1:2000. Они обеспечивают достаточную точность (изолинии проведены через 1 м), не слишком перегружены информацией о зданиях и сооружениях, и общее их число относительно невелико (около 300 на г. Томск). На рис. 2 изображена схема центральной части города с разбивкой на планшеты данного масштаба (жирные черные линии – части границы города, тонкие светлые – уличные сегменты, заштрихованные участки средней темноты – реки и озера).

Рельеф на планшетах представлен изолиниями, высотными отметками и дополнительными структурными линиями (береговыми линиями рек и озер, границами обрывов, оврагов, промышленных выработок и т.д.). В отличие от изолиний данные структурные линии – не плоские, так как принадлежащие им точки могут иметь различные высоты на участке рельефа (в дальнейшем такие линии будем называть трехмерными).

Все линии и высотные отметки рельефа необходимо оцифровать, т.е. представить их наборами узловых точек с прямоугольными координатами X, Y (положение на плоскости). Кроме того, в каждой точке должна быть известна высота (координата Z). Значения высот в узлах изолиний и высотных отметках

задаются прямо при оцифровке, а в узлах трехмерной линии их можно определить с помощью интерполяции, если к линии примыкают изолинии (граница оврага, обрыва) или прямо на ней заданы высотные отметки (уровни уреза воды на береговых линиях). Для расчета цифровой модели рельефа необходимо по множеству узловых точек всех линий и высотных отметок построить интерполирующую поверхность. При этом требуется, чтобы не только узлы, но и все структурные линии рельефа целиком принадлежали данной поверхности. Наиболее простой и удобной является кусочно-линейная интерполяция поверхности рельефа. При этом по координатам X, Y всех точек строится триангуляция Делоне [1] таким образом, чтобы множество ребер треугольников включало все отрезки структурных линий. Тогда задание высоты Z во всех вершинах определяет интерполирующую поверхность как набор пространственных треугольников.

Обработка каждого планшета требовала 3-4 дня и включала:

- сканирование карты;
- корректировку растра;
- векторизацию линий рельефа и высотных отметок с заданием высот;
- проверку правильности векторного изображения;
- расчет высот в узловых точках трехмерных линий;
- интерполяцию поверхности участка рельефа с учетом сохранения всех структурных линий и сшивания соседних планшетов, а также собственно расчет высот в узлах равномерной сетки.

Первым шагом в оцифровке карт является их сканирование – считывание исходного изображения на сканере, перевод его в растровую форму и сохранение полученного изображения (матрицы точек, имеющих свой цвет) в файле на диске. Из-за достаточно больших размеров планшетов (примерно 70x70 см) необходим широкоформатный сканер. При стандартном разрешении 300 dpi (точек на дюйм) размер растрового изображения будет составлять около 8000x8000 точек. Ограничиваясь без ущерба для качества только черно-белыми изображениями, можно сохранять их в стандартном TIF-формате в файлах размером 1,5-2,5 Мб, поэтому сохранение растровых изображений 300 планшетов для последующего использования не является технической проблемой.

Иногда полученный растр содержит много «шума», для уменьшения которого приходится либо пересканировать изображение, меняя параметры контрастности и яркости сканерной утилиты, либо использовать какой-нибудь редактор растров, например Adobe Photoshop. Но более важным недостатком являются деформации исходного изображения, которые приводят к заметным ошибкам в определении координат узловых точек при оцифровке. Обычно это локальные деформации отдельных участков, которые не могут быть устранены

линейным преобразованием всего изображения (поворотом, сдвигом, изменением масштаба по осям). Поэтому было использовано кусочно-линейное преобразование (интерполяция) раstra. На любом планшете можно указать по крайней мере 36 точек-перекрестий, для которых известны реальные координаты

на местности (чем больше таких точек, тем лучше). По этим точкам в координатах исходного раstra строится триангуляция Делоне. Размер нового раstra выбирается таким образом, чтобы можно было легко перейти от реальных координат выбранных точек к их координатам в новом растре (например, 5000 или 10000 точек на 1000 м). Теперь для произвольной точки M исходного раstra (не фонового цвета), лежащей в некотором треугольнике ABC , можно вычислить ее координаты r и p (строка и позиция) в новом растре:

$$r_M = a \cdot r_A + b \cdot r_B + c \cdot r_C, \quad p_M = a \cdot p_A + b \cdot p_B + c \cdot p_C, \quad (1)$$

где $a = \frac{s(BCM)}{s(ABC)}$, $b = \frac{s(CAM)}{s(ABC)}$, $c = \frac{s(ABM)}{s(ABC)}$ – барицентрические координаты

M в $\triangle ABC$ (s – площадь треугольника, рис. 3). Данное преобразование непрерывно на ребрах треугольников, а взаимное положение вершин в новом растре соответствует реальным координатам точек.

Полученный растр использовался в качестве подложки, необходимой для векторизации (оцифровки) изображения – отслеживания всех линий рельефа с расстановкой необходимого числа узловых точек, а также установки высотных отметок. Векторизация проводилась с помощью известного векторизатора MapEDIT 3.0 для Windows, имеющей удобный полуавтоматический режим работы, при котором достаточно только указать начало линии, а далее узловые точки будут расставляться с заданной точностью до тех пор, пока линия не оборвется либо не пересечется с другой линией. К сожалению, этот режим очень чувствителен к качеству исходного растрового изображения: при наличии мелких разрывов линий он превращается практически в ручной – требуется постоянно соединять мелкие отрезки в единую линию, добавляя вручную узловые точки. Очень важно, что MapEDIT дает возможность вводить дополнительные атрибуты для векторных объектов, это позволило прямо в процессе векторизации задавать высоты всех линий и точек (ноль для трехмерных линий – высоты в их узлах рассчитываются с помощью интерполяции). Кроме того, полученное векторное изображение можно легко трансформировать в нужную систему координат и экспортировать в открытый формат шейп-файлов системы ArcView для дальнейшей обработки.

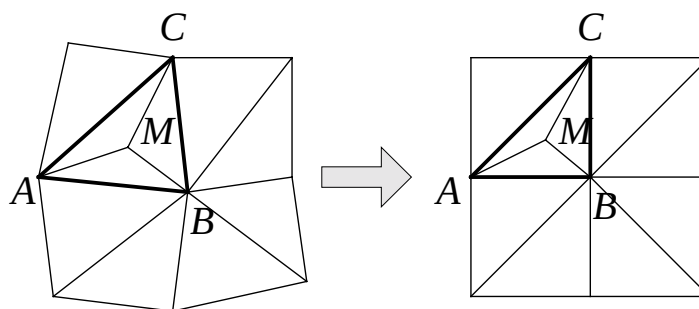


Рис. 3. Кусочно-линейное преобразование раstra.

Векторизация является самой трудоемкой частью работы по построению модели рельефа: число линий на разных планшетах составляет от нескольких десятков до нескольких сотен (в зависимости от рельефа) соответственно, число снятых узловых точек изменяется от 5000 до 30000 и более.

Правильность проведения линий при векторизации легко определяется визуально, однако при оцифровке возможны ошибки, которые существенно искажают рельеф, но обнаруживаются только специальными проверками:

- наличие частично или полностью совпадающих, а также пересекающихся объектов, имеющих разные высоты;
- недостаточное количество примыкающих к трехмерной линии изолиний и высотных отметок, что не позволяет рассчитать высоты во всех узловых точках;
- недопустимые значения высот для изолиний и высотных отметок.

Для обнаружения ошибок были разработаны специальные программы, которые получают информацию обо всех векторных объектах в реальных координатах в формате шейп-файлов. В дальнейшем шейп-файлы не сохранялись, а корректировка проводилась снова в системе MapEDIT, что обеспечивало постоянное соответствие растровой и векторной моделей и позволяло более компактно хранить векторное изображение. Проверка правильности задания высот проводилась после коррекции остальных ошибок, при этом вначале рассчитывались высоты во всех узлах трехмерных линий, а затем по множеству узловых точек и высотных отметок строилась интерполирующая поверхность в виде системы пространственных треугольников (точно такая, как для расчета матрицы высот). Перепад высоты вдоль любого ребра триангуляции более чем на шаг изолинии (1 м) указывал на наличие ошибки, которую можно было легко локализовать.

Для интерполяции поверхности по координатам X и Y узловых точек линий и высотных отметок с помощью итеративного алгоритма строится триангуляция Делоне. В получаемой системе треугольников сохраняются все линии рельефа, так как отдельные отрезки линий образуют ребра треугольников. Для этого при триангуляции используется информация обо всех отрезках всех линий, и, если необходимо, на отрезках добавляются новые точки, в которых рассчитываются высоты. На рис. 4 изображен фрагмент триангуляции (выделены линии рельефа).

В каждой вершине треугольника задана высота, благодаря чему плоская триангуляция определяет систему пространственных треугольников (интерполирующую поверхность). Для вычисления высоты в произвольной точке достаточно определить, в какой треугольник (на плоскости) попадает данная точка, а затем рассчитать высоту по координатам трех вершин данного треугольника. Поверхность на каждом треугольнике можно дополнительно сгладить, для это-

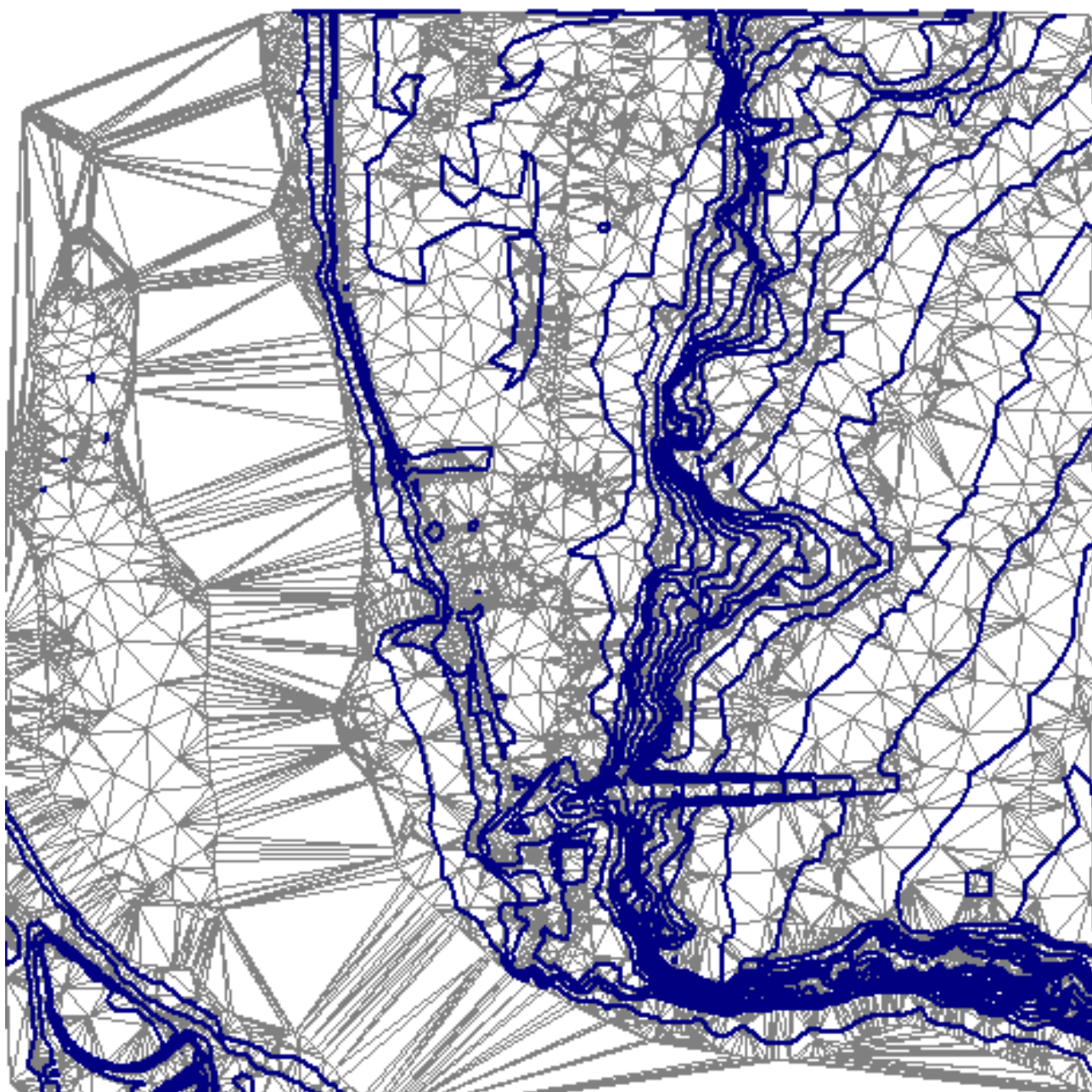


Рис. 4. Триангуляционная модель рельефа.

го в каждой вершине треугольника по прилегающим граням рассчитывается нормальный вектор касательной плоскости.

Строить интерполирующую поверхность отдельно для каждого планшета нельзя: возле их границ обычно расположено мало точек, треугольники получаются очень вытянутыми и точность интерполяции резко снижается. В результате на границах соседних планшетов появляются нестыковки рельефа. Для устранения этих недостатков использовался следующий подход: система треугольников строилась сразу по четырем смежным (имеющим одну общую точку) планшетах, при этом последующий расчет высот в узлах регулярной сетки производился только на участке, примыкающем к общей точке (1/4 от общей площади каждого планшета). Впоследствии отдельные «четверти» объединя-

лись в матрицы высот целых планшетов, а последние – в цифровую модель любого прямоугольного участка на местности.

3. Обработка космического снимка

Сканирование негатива производилось на планшетном фотограмметрическом сканере РСМ-3 с апертурой 7 мкм. Данная аппаратура позволяет работать с рулонными фильмами без вырезания кадров и без изготовления дубля, что позволяет сохранить оптическое и геометрическое качество. Размер апертуры сканирования выбран по более жестким критериям, чем требует правило Найквиста. Это объясняется тем, что исходное изображение помимо дискретизации подвергается размытию апертурой сканера. Если бы апертура сканера была бесконечно малой, то, как известно, для сохранения предельно высокой частоты изображения необходимо сканировать с удвоенной этой частотой. Конечные размеры апертуры приводят к размытию предельно высокой частоты изображения. Влияние апертуры на результирующее разрешение становится незаметным при частоте дискретизации, в 2,5 раза превышающей предельно высокую частоту изображения.

Сканированное изображение подвергалось следующей поэтапной обработке:

1. Устранение оптических искажений фотокамеры и сканирующих устройств. При этом проводились предварительная фильтрация изображения на основе построенной гистограммы, повышение контрастности, улучшение резкости, выделение границ контуров и переоцифровка с целью улучшения качества визуализации изображения.
2. Приведение изображения к заданной картографической проекции и масштабу. Оно осуществлялось с помощью цифровых геометрических преобразований исходного растрового массива.
3. Формирование цифрового ортофото, свободного от искажений на рельефе. Выполнялось после завершения этапов 1, 2 и подготовки матрицы высот на обрабатываемый участок территории.
4. Векторизация растрового изображения в соответствии с согласованной легендой тематической карты, формирование топологии и сборка электронной модели местности.

Векторизация полученного ортофотоизображения проводилась в среде геоинформационной системы ARC/INFO по 18 слоям. Важнейшие из них:

- здания и сооружения площадью от 40 м² (полигоны);
- гидрография (полигоны);



Рис. 5. Фрагмент векторной модели.

- зеленые насаждения от 100 м² (полигоны);
- дороги шириной от 4 м (полигоны);
- перекрестки (полигоны);
- центральные линии дорог (линии).

На рис. 5 приведен пример векторного изображения, полученного для фрагмента снимка на рис. 1: здания закрашены темным цветом, зеленые насаждения – более светлым, отрезки отмечают центральные линии уличных сегментов. С помощью сервисных команд ARC/INFO проводилась проверка топологии на отсутствие двойных объектов, замыкание полигонов, корректировка «недолетов», «перелетов». Автономно написанная программа автоматически осуществляла закругление краев дорог в местах изломов и пересечений.

Заполнение баз данных сводилось к внесению информации о типе, принадлежности зданий, огнестойкости и других данных, необходимых для служб города.

В настоящее время получена электронная модель территории города в старых границах, проводится ее проверка, корректировка и заполнение атрибутивных баз данных. Продолжается работа по созданию электронной модели для новых, присоединенных к городу территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фукс А.Л. Предварительная обработка набора точек при построении триангуляции Делоне // Наст. книга, с. 48-60.