

Оценка трехмерных параметров объектов хозяйственной инфраструктуры по растровым областям на базе типизированных элементов

Рихтер А.А., Козуб В.А., Кошелева Н.В.

НИИ "АЭРОКОСМОС", Москва, Российская Федерация
urfin17@yandex.ru

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0312).

Постановка задачи

- Современный уровень развития вычислительной техники позволяет с высоким качеством визуально воспроизводить картину местности по спутниковым изображениям на широкодоступных компьютерах. Однако одна из проблем воспроизведения заключается в построении трехмерных моделей наблюдаемых объектов.
- Под трехмерной моделью объекта мы будем понимать совокупность геометрических фигур, описывающих объект земной поверхности, имеющих физические размеры, соответствующие размерам объекта, и координаты узловых точек, соответствующие координатам на поверхности объекта.
- Для построения трехмерной модели объекта по спутниковому изображению должна быть решена совокупность следующих задач: 1. Сегментация спутникового изображения для выделения объектов; 2. Оценка высоты объектов по данным сегментированного спутникового изображения; 3. Построение объемной трехмерной модели по выделенным элементам объекта.
- Предлагается метод восстановления трехмерных моделей ригидных объектов по их растровым областям, полученным в результате машинного обучения, по масштабирующим коэффициентам и направляющим (для горизонтальных элементов, вертикальных элементов и размеров теней от вертикальных элементов), выводимых по типизированным элементам (таким как железнодорожная колея, линии контактной сети и др.).

Объекты железнодорожного транспорта

1. По видимости:

- видимые объекты – в целом различаются на снимках и идентифицируются своими наборами дешифровочных признаков;
- невидимые объекты – не различаются (могут быть выявлены только «следы» их наличия). Включают: объекты на земной поверхности, «переменно» или «постоянно» скрытые другими объектами; объекты под земной поверхностью (в тоннелях, заглублённые под водой или зарытые под землёй ЖД-коммуникации);

2. По подвижности:

- подвижные объекты – в каждый момент времени могут иметь разные географические координаты;
- неподвижные объекты – в каждый момент времени имеют одинаковые географические координаты;

3. По принадлежности к подсистемам ЖД-инфраструктуры: путевой; станционной; электроснабжения; автоматики; телемеханики; электросвязи;

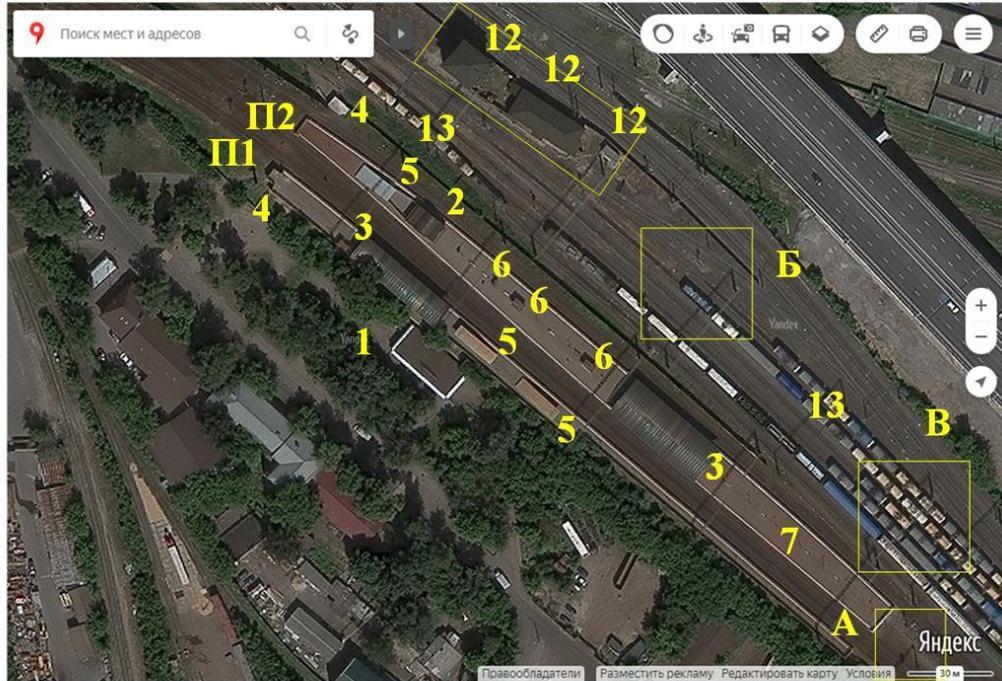
4. По типизации:

- типовые инвариантные – геометрические параметры идентичны, то есть объекты стандартизированы (например, вагоны, контейнеры, путевые знаки, фонарные или электрические столбы, семафоры);
- типовые параметрические – геометрия объектов задаётся одинаковым набором параметров, но разных и детерминированных значений (пассажирские платформы и павильоны, тоннельные входы и выходы, подвижные составы, шумозащитные экраны и путевые ограждения);
- типовые стохастические – те же, что параметрические, но значения параметров случайны (такие как деревья и кустарники);
- уникальные – с уникальным набором и детерминированными значениями геометрических параметров (например, ЖД-вокзалы и некоторые пассажирские здания, спроектированные с уникальным архитектурным решением);

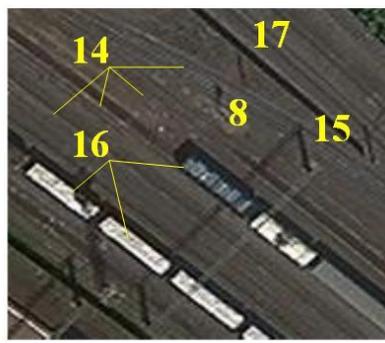
5. По эталонности:

- эталонные объекты – имеют известные геометрические параметры и инициализируют эталоны линейных и / или угловых размеров для данного спутникового изображения;
- расчётные объекты – имеют неизвестные геометрические параметры, которые выводятся по известным параметрам эталонных объектов.

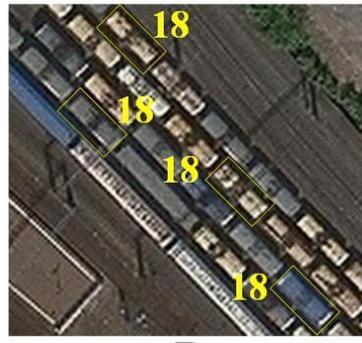
Примеры объектов железнодорожного транспорта



А



Б



В

В составе станционной (П1, П2, 1-10) и путевой подсистем (8, 11-17)

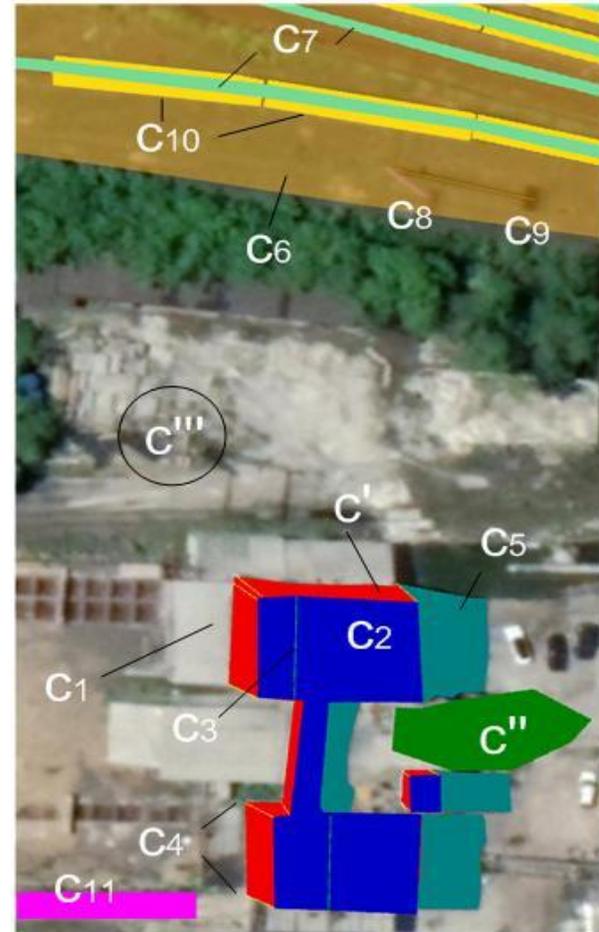
П1 и П2 – береговая и островная платформы (пассажирские перроны); 1 и 2 – турникетно-кассовый (за перронами) и турникетный (на перронах) павильоны, 3 – пассажирские павильоны на П1 и П2 (перекрытия); 4 – туннельные входы, 5 – выходы на платформы (туннельные переходы скрыты под поверхностью); 6 – объекты торгового назначения; 7 – основание платформы П2, 8 – фонарные столбы, 9 – скамейки, 10 – сигнальная разметка, 11 – ограждения на платформе П2; 12 – административно-служебные здания, 13 – грузовые подвижные составы, 14 – железнодорожные пути, 15 – электрические столбы, 16 – вагоны подвижных составов, 17 – шумозащитные экраны (ограждения).

Выбор информативных классов

1. Здание (полигон, c_1)
 - Крыша (полигон, c_2)
 - Ребро крыши (полилиния, c_3)
 - Ребро стены (полилиния, c_4)
 - Тень здания (полигон, c_5)
2. Железнодорожная инфраструктура (полигон, c_6)
 - ЖД-колея (полигон, c_7)
 - Столб (полилиния, c_8)
 - Тень столба (полилиния, c_9)
 - Вагон (полигон, c_{10})
3. Автомобильная дорога (полигон, c_{11})
4. Другие классы:
 - Стены (полигон, $c' = c_1 - c_2$)
 - Исключенные объекты (полигон, c'')
 - Фон (c''')

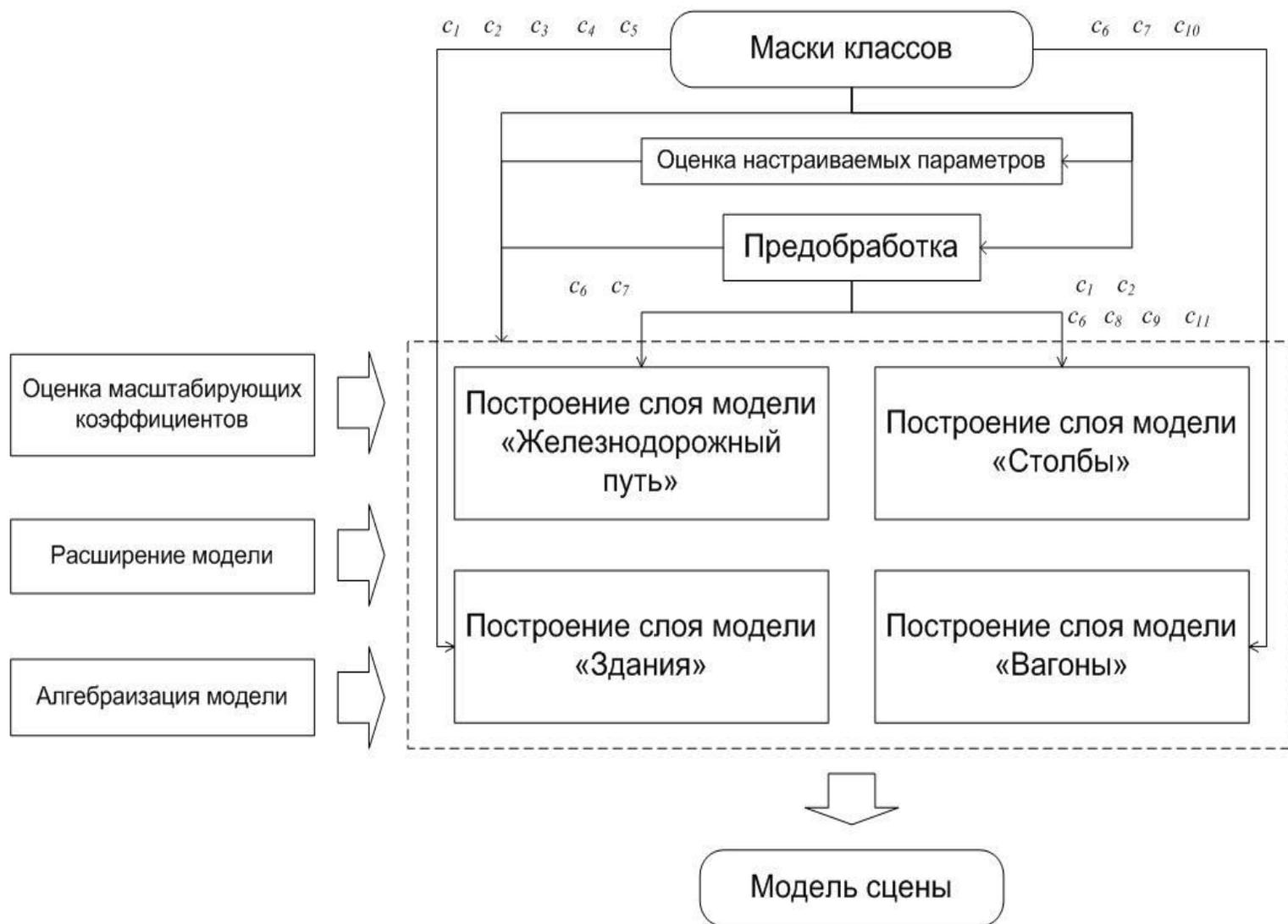


Изображение



Разметка

Общая схема алгоритма по построению геометрической модели объектов железнодорожной инфраструктуры



Особенности предлагаемого подхода:

- Оценка трёхмерной модели объекта проводится по одному ортотрансформированному спутниковому изображению
- Метаданные изображения не используются, а для оценки трёхмерных параметров прилагается дополнительная входная информация – размеры эталонных стандартизированных объектов
- Растры информативных классов непрерывны, могут иметь произвольную форму, в том числе с наличием пустот
- Качество оценки трёхмерной модели объекта зависит от полноты известной растровой информации об этом объекте

Модель сцены земной поверхности

Модель объекта: $\xi: p = (x, y, z), w; \xi \in K$

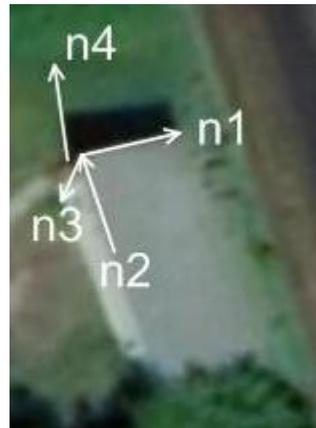
p – точки модели, w – линейные связи (набор отрезков, соединяющих две точки), K – типизированный класс, ξ – объект класса K

Базовая модель – выводится в результате векторизации растровых масок классов.

Расширенная модель – строится на основе базовой модели, модифицируя и дополняя её новыми элементами.

Способы расширения модели:

- Интерполяция (экстраполяция)
- Кластеризация
- Нормализация
- Фигурация
- Конъектура



Закон распределения объектов в пространстве:

$$\xi = f(T): \xi_i = f(T_i), i = 1..l, \quad u = \{T_1, T_2, \dots, T_l\}$$

f – функция моделей объектов

ξ_i – точки этой функции (модели объектов)

u – область определения функции

T – набор параметров, идентифицирующих модель объекта, например, геометрический центр (x_0, y_0, z_0) , ориентация $(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ и масштаб (s_x, s_y, s_z) (T_i – значения этих параметров для ξ_i)

$$m_i = R_i / r_i, i = 1..q \quad \bar{n}_i = \bar{r}_i / r_i$$

m_i – масштабирующие коэффициенты

r_i – меряются координатами точек на изображении (маска)

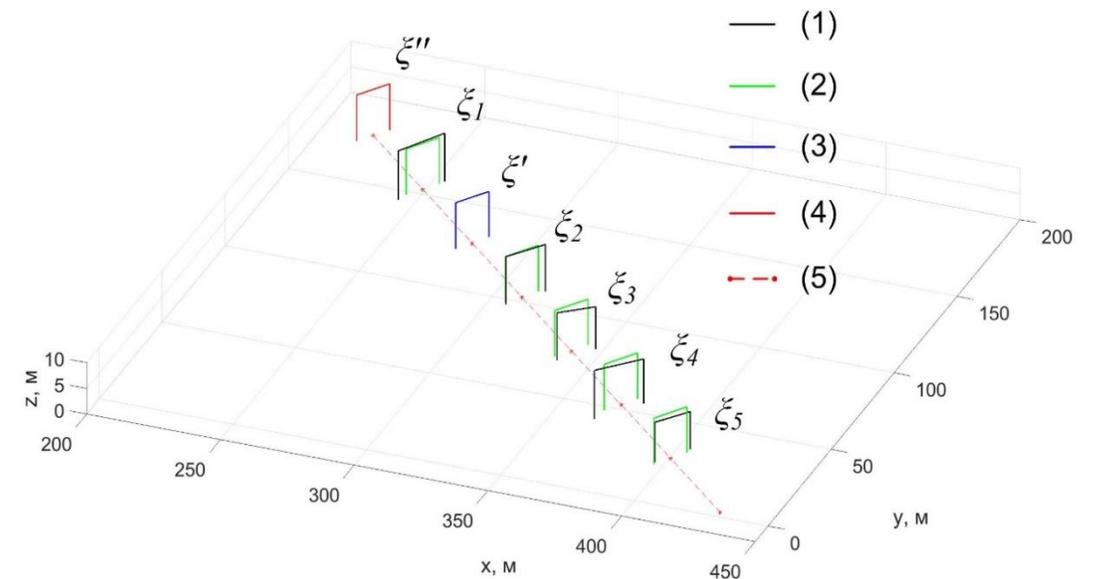
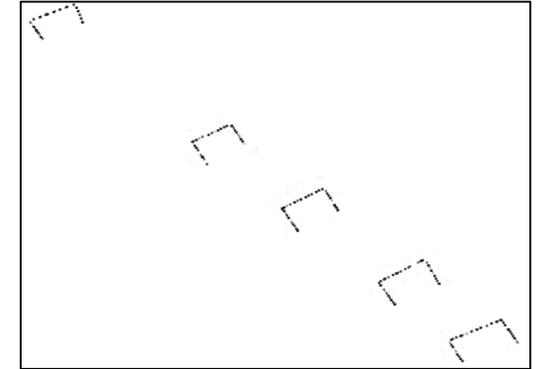
R_i – соответствующие линейные размеры отрезков

\bar{n}_1 – направляющие

q – число коэффициентов и направляющих

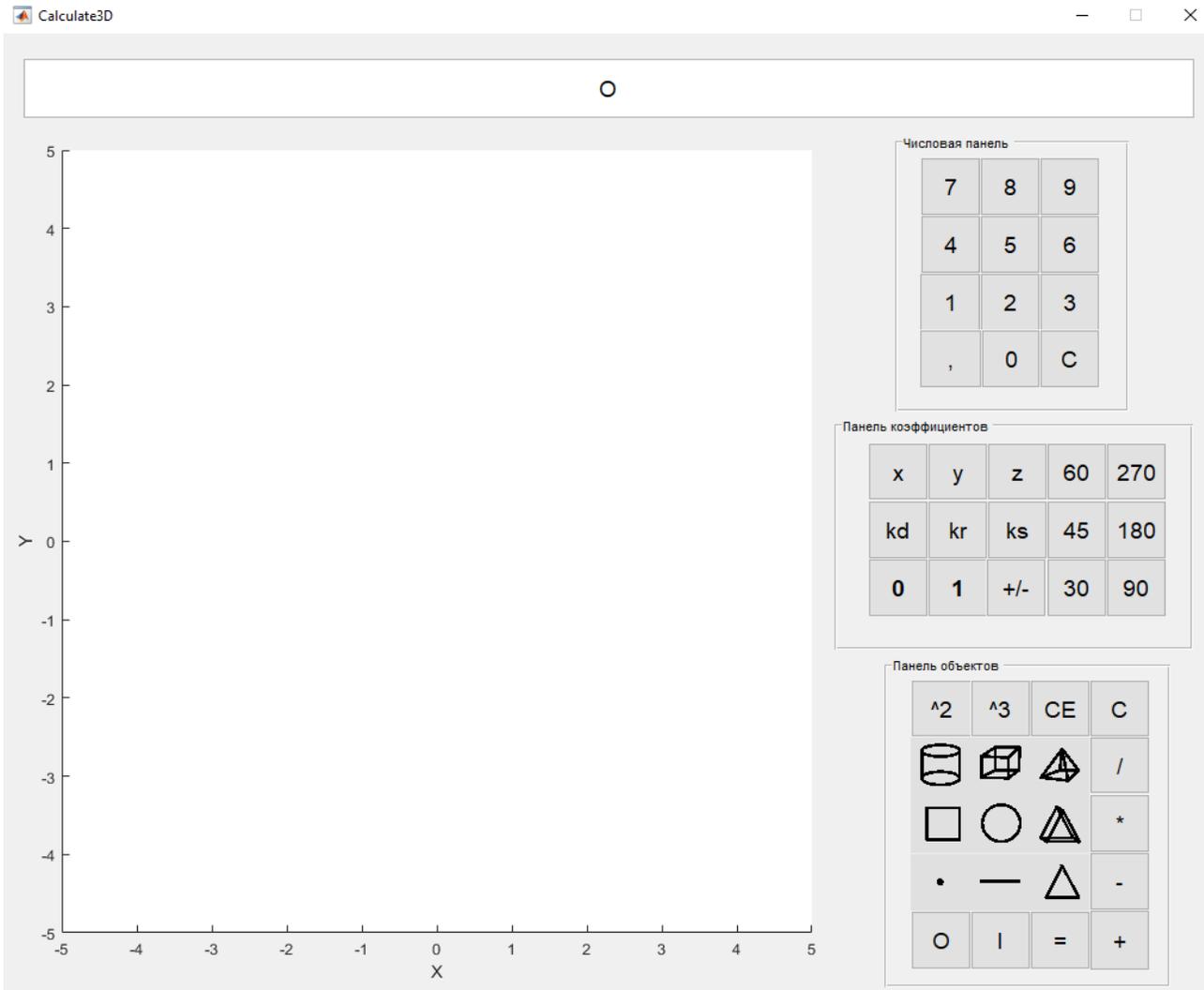
Способы расширения модели

1. Интерполяция – добавление новой точки (точек) $\xi' = f(T')$, $T' \in u$; экстраполяция – добавление новой точки (точек) $\xi'' = f(T'')$, $T'' \notin u$
2. Кластеризация моделей – способ расчёта типизированных классов посредством выделения или разложения на кластеры базовых моделей объектов, объединённых близкой структурой и значениями геометрических параметров
3. Нормализация – линейные или угловые параметры объектов приводятся к калибровочным значениям в рамках некоторой сетки размеров. Пример угловой сетки – сетка ортогональных углов несущих стен зданий; пример линейной сетки – сетка стандартных высот зданий
4. Фигурация – базовая модель объекта заменяется на заранее подготовленную модель типизированного класса в той или иной степени детализации (LoD0-LoD4), к которому объект принадлежит
5. Конъектура – предположение наличия объекта (элемента объекта) исходя из окрестности объекта (элемента объекта). Различаются конъектуры: структуры объекта, структуры сцены, границы изображения, невидимой части объекта



1 – базовая, 2-4 – расширения (2 – кластеризация, 3 – интерполяция, 4 – экстраполяция), 5 – линия регрессии

Геометрический калькулятор



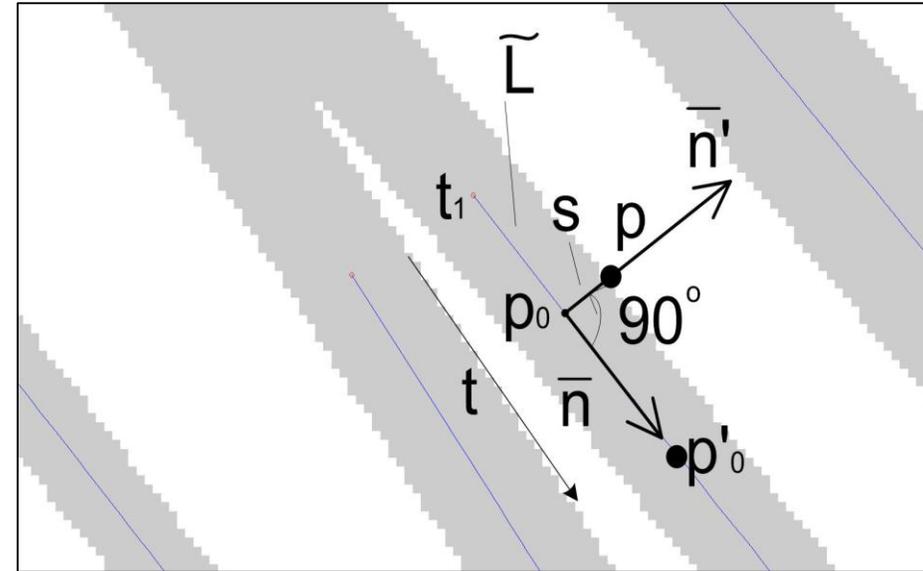
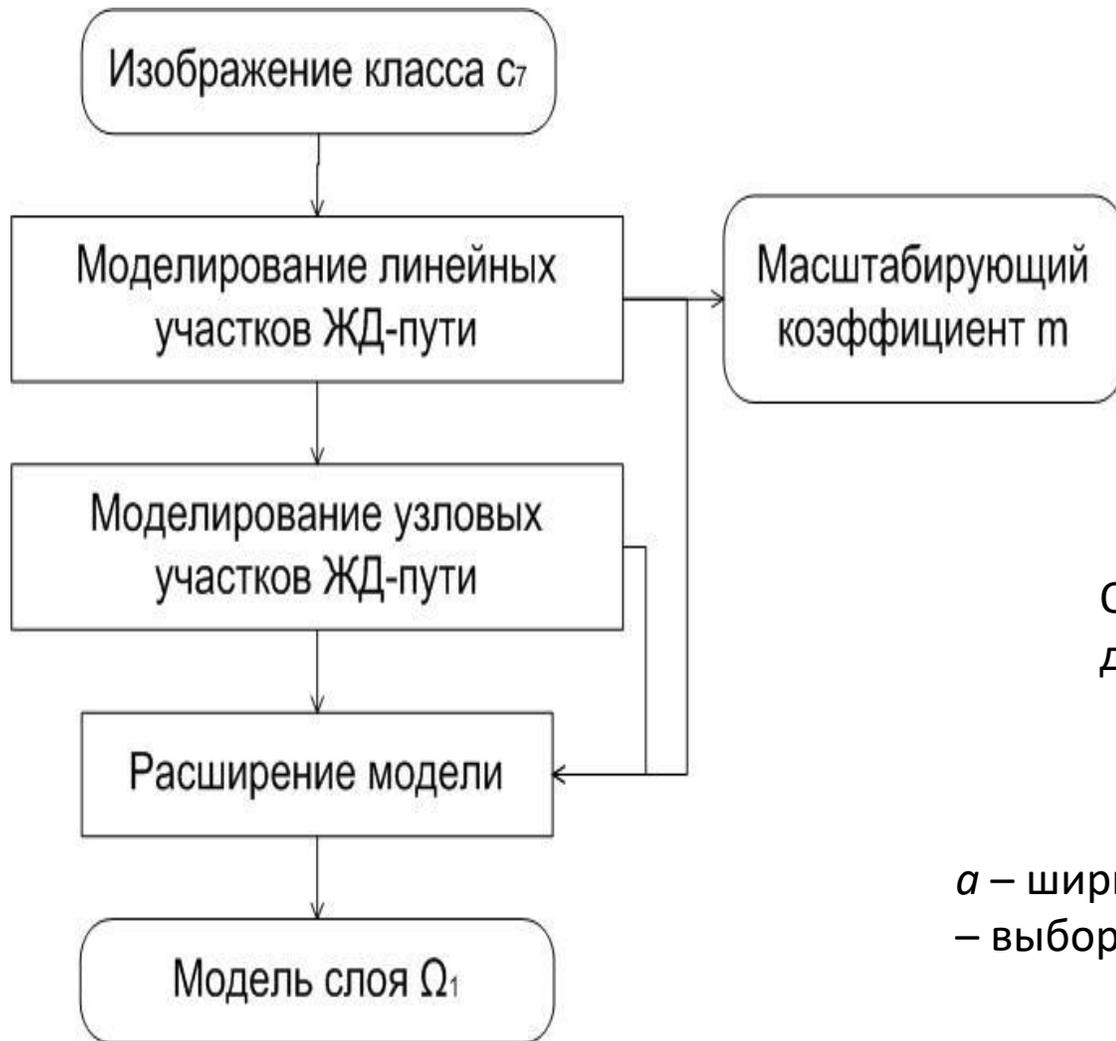
Интерфейс программы

Алгебраические операции над объектами и коэффициентами: Сложение, Вычитание, Умножение, Деление, Возведение в степень, Разложение на множители

С точки зрения спутникового мониторинга имеет место множество закономерностей 3D-моделей земной поверхности и их пространственно-временного распределения.

Сеточное умножение даёт периодические структуры объектов и сцен, которые характеризуются: 1) периодом – повторяющийся элемент сцены, с варьированием размеров, наклонов и положений; 2) частотой – числом повторений в тех или иных направлениях и подобластях; 3) точкой отчёта – начала периодической структуры; 4) кратностью – простые периодические структуры, на которые раскладывается данная (композиция сеток); 5) отклонениями от детерминированного распределения – характеристиками случайных алгебраических или геометрических величин, регулирующих отклонение поведения сцены от периодического.

Слой модели «Железнодорожный путь»

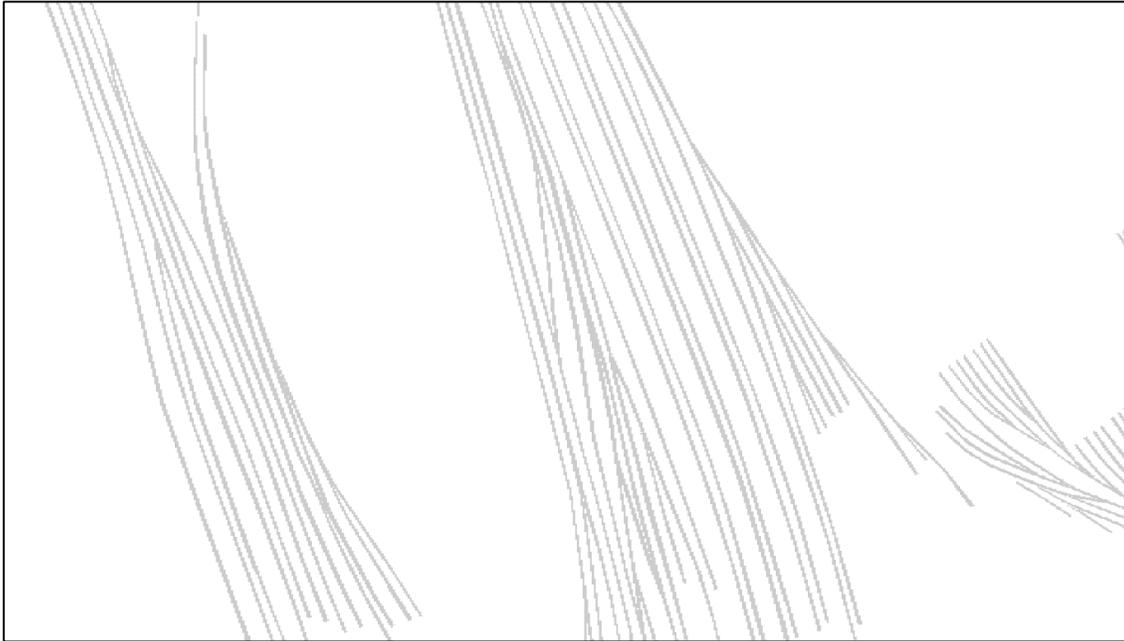


Оценка масштабирующего коэффициента для горизонтальных размеров:

$$m = \frac{a}{2 \cdot \mu[s] - 2}$$

a – ширина ЖД-колеи (стандартна, для РЖД $a=1.52$), $\mu[s]$ – выборочное среднее значений s по изображению

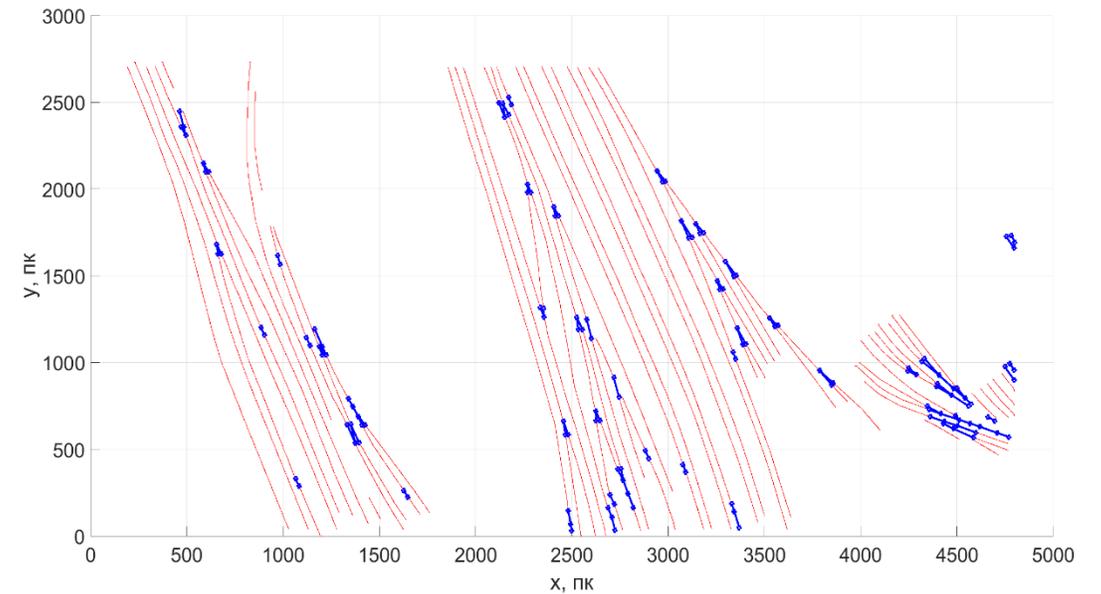
Пример оценки масштабирующего коэффициента горизонтальных размеров



Маска класса c_7

Оценка коэффициента:

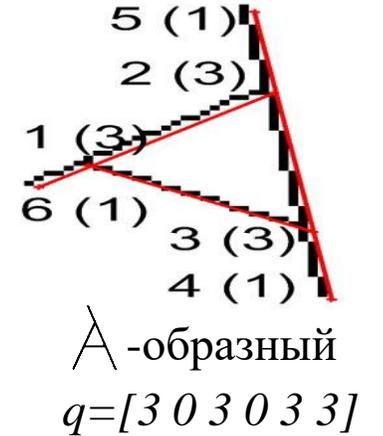
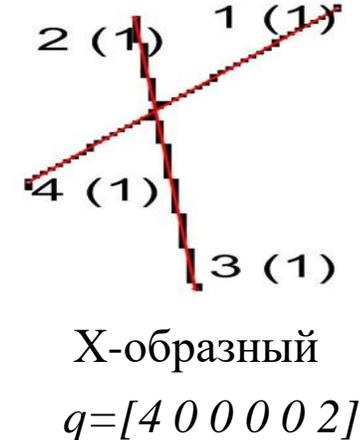
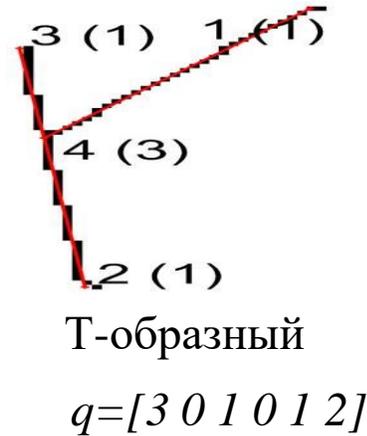
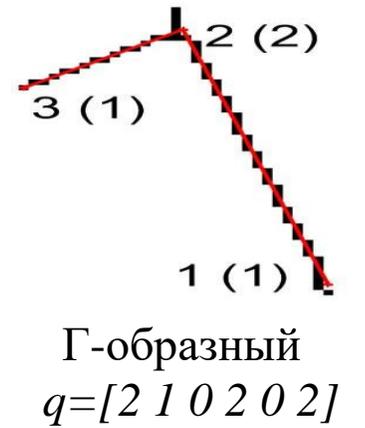
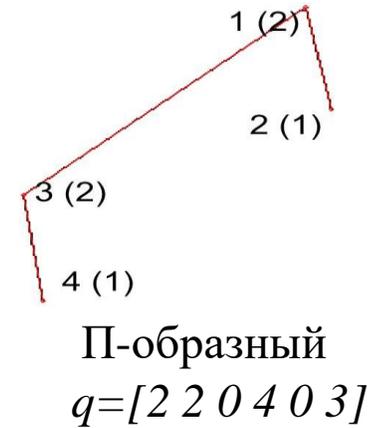
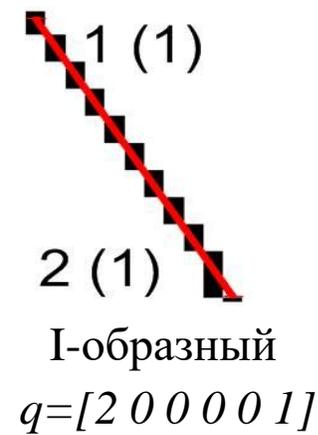
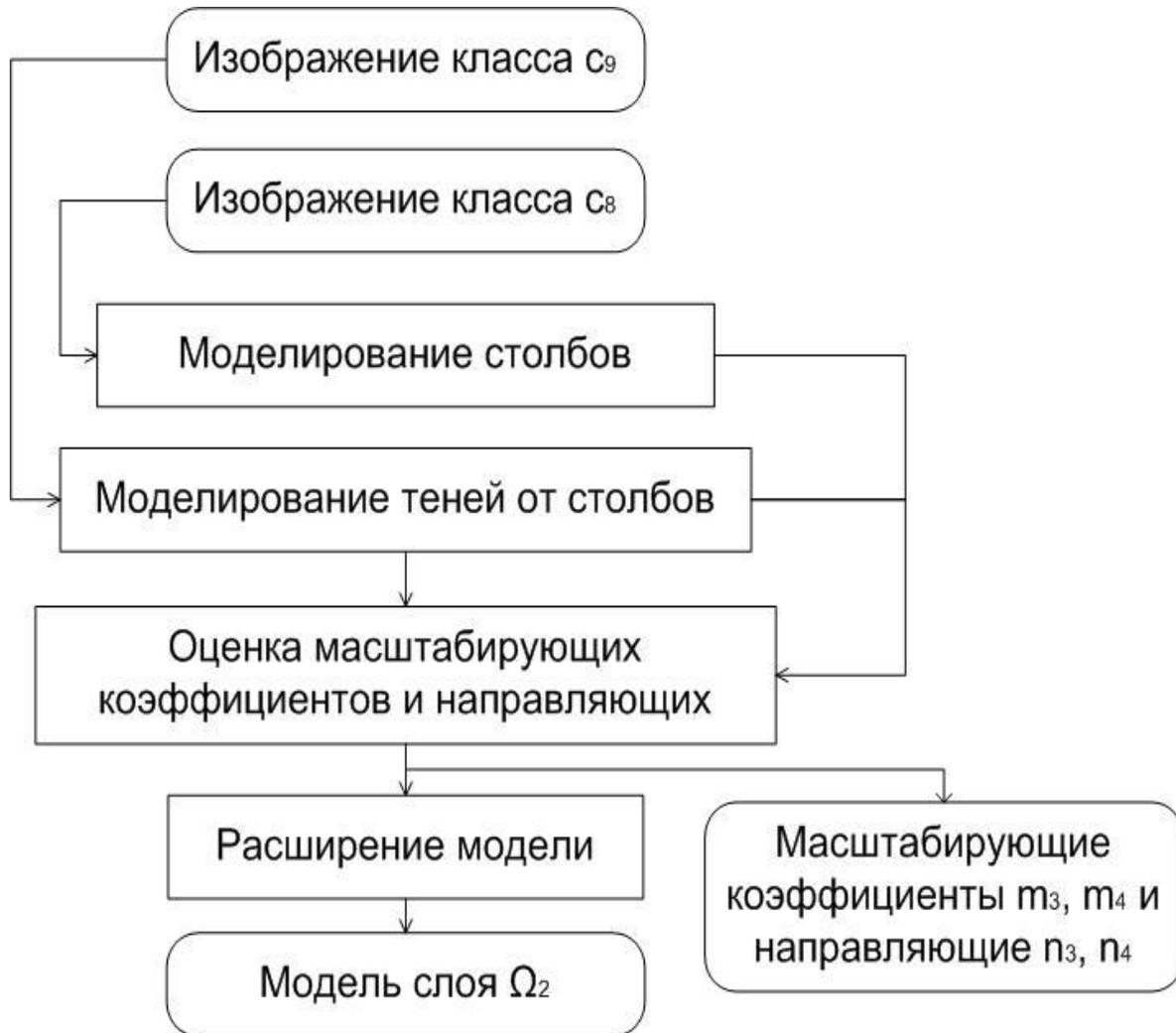
$$m_1 = m_2 = m \approx 0.12 \frac{\text{М}}{\text{ПК}}$$



Векторизация ЖД-путей

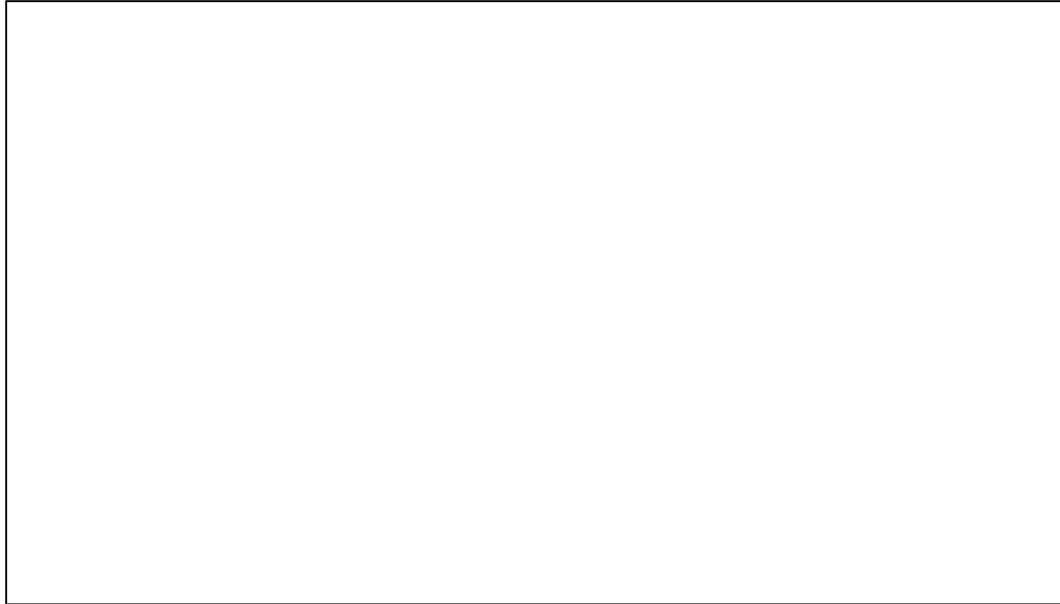
- Линейные участки
- Узловые участки

Слой модели «Столбы»

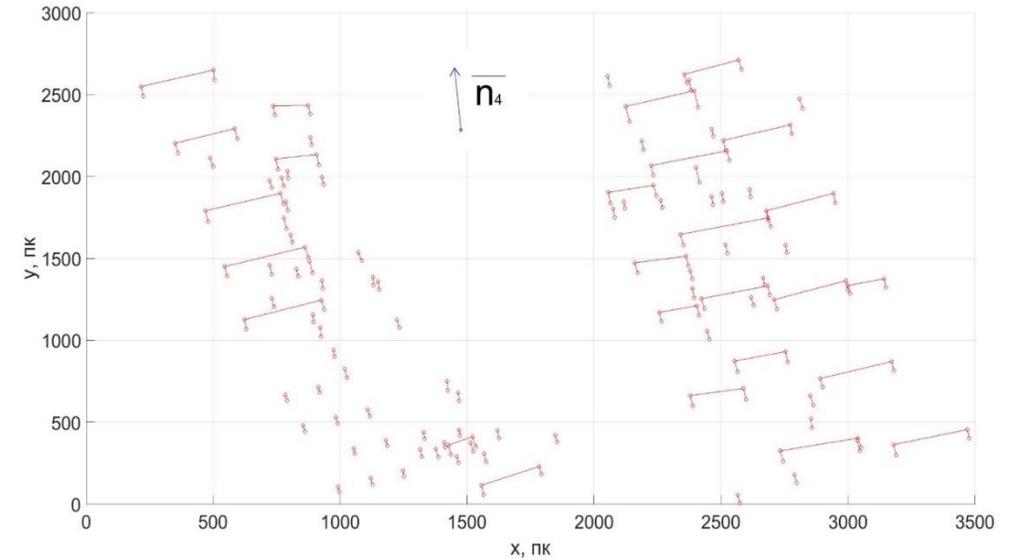


Примеры форм столбов и их характеристические векторы q

Пример оценки масштабирующих коэффициентов и направляющих вертикальных размеров по столбам и их теням



Маска класса c_9



Векторизация теней столбов

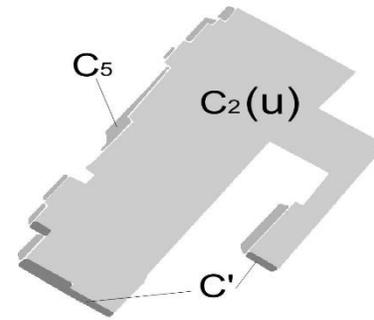
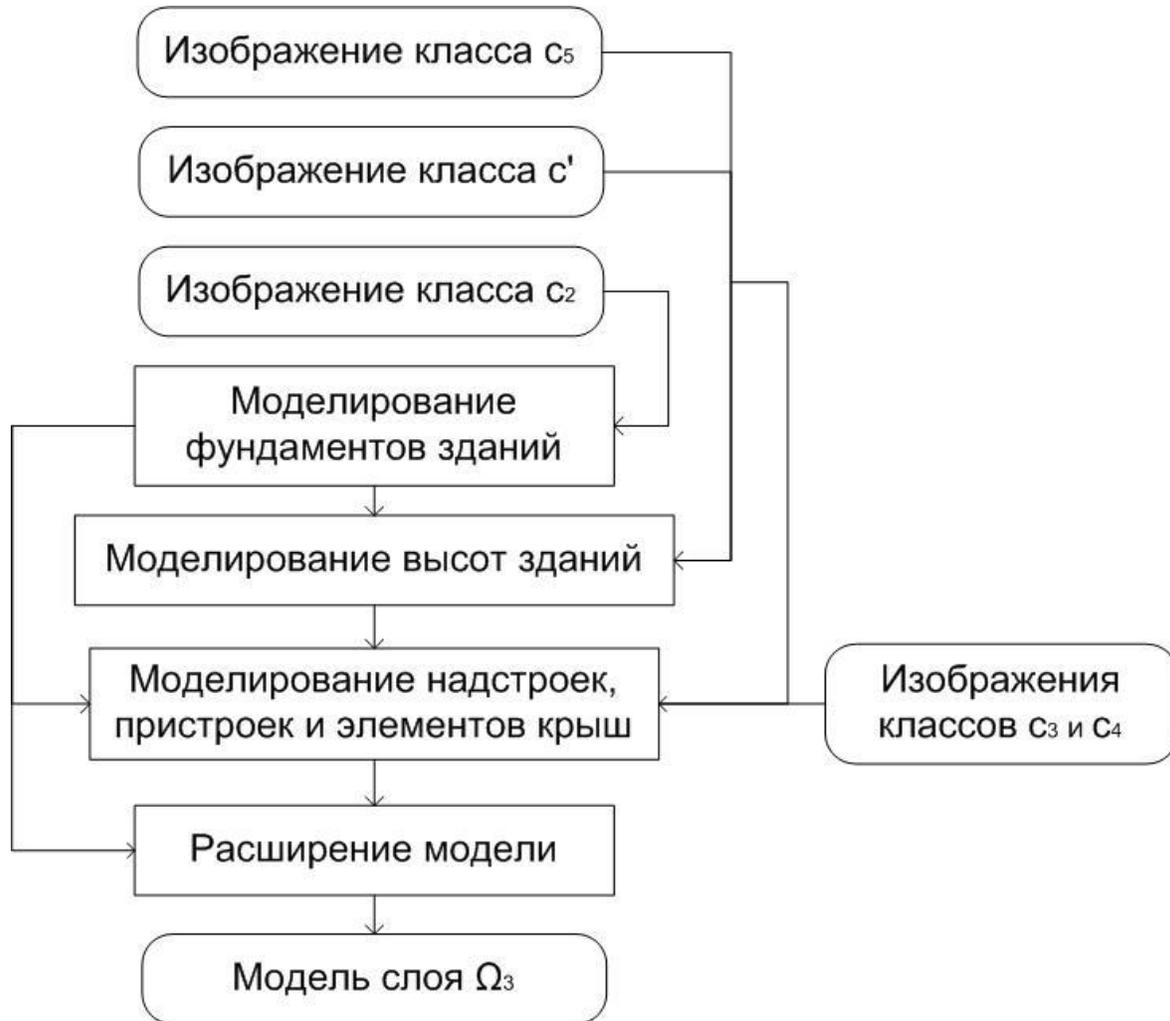
Оценка коэффициента и направляющей по столбам:

$$m_3 \approx 2.3 \frac{\text{М}}{\text{ПК}} \quad \bar{n}_3 \approx [0.67 \quad 0.74]$$

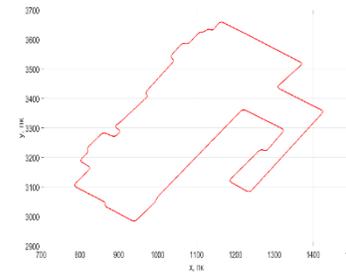
Оценка коэффициента и направляющей по теням столбов:

$$m_4 \approx 0.17 \frac{\text{М}}{\text{ПК}} \quad \bar{n}_4 \approx [-1 \quad -0.1]$$

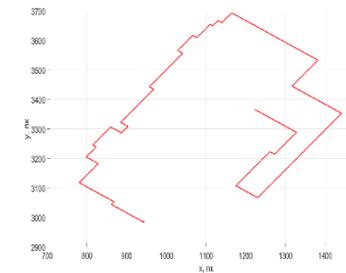
Слой модели «Здания»



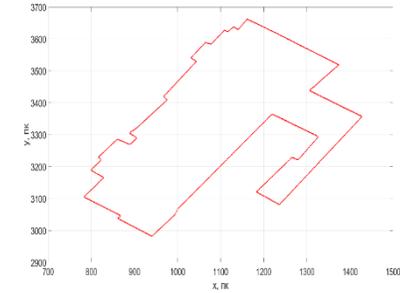
Растр крыши



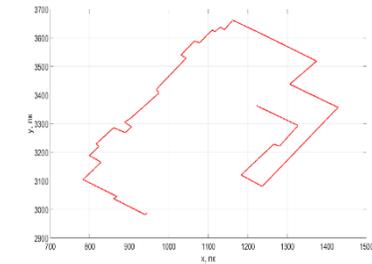
Сглаживание



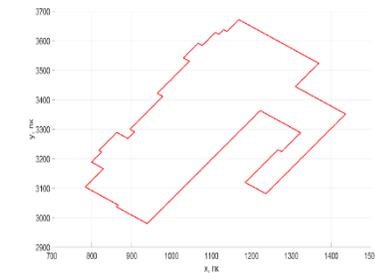
Поляризация



Прослеживание



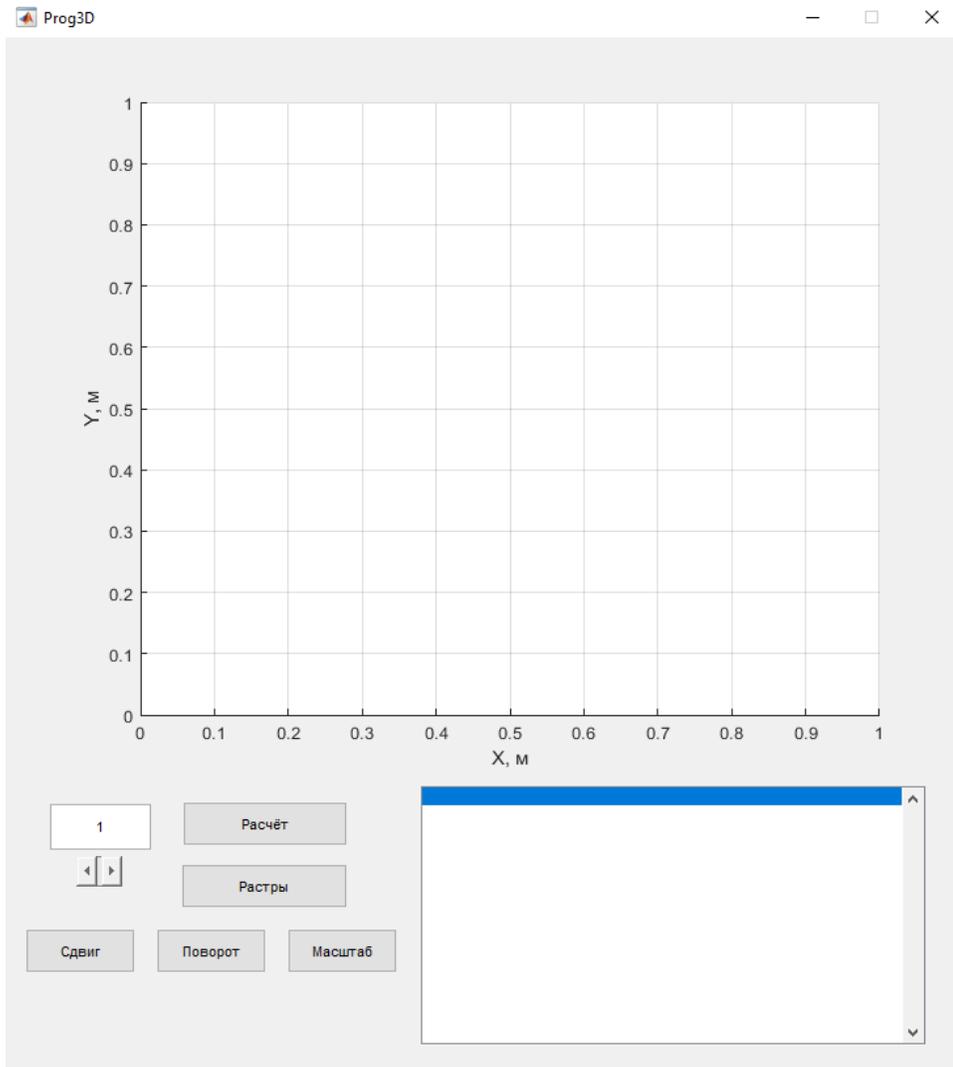
Линеаризация



Геометрическая коррекция

Основные этапы векторной обработки при построении модели фундамента

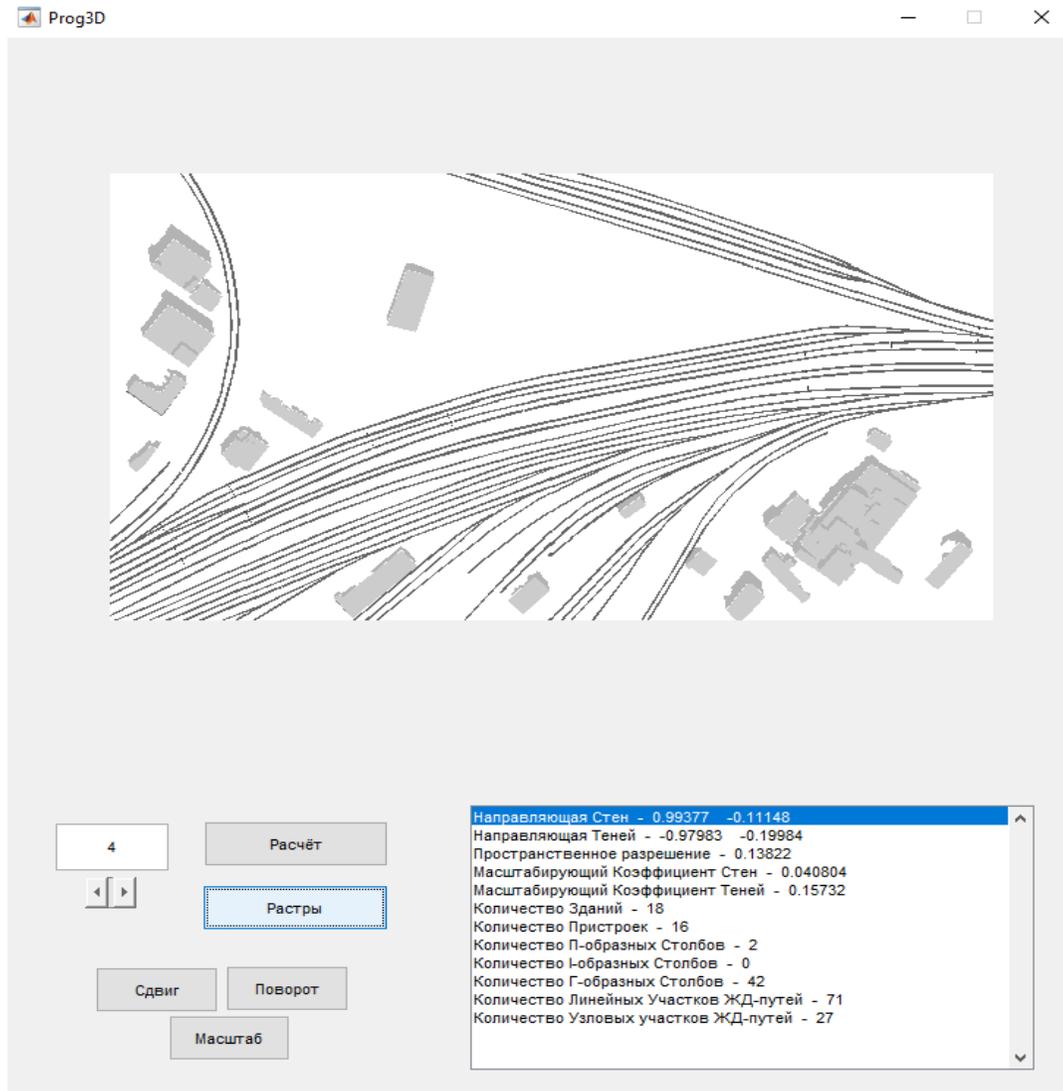
Программа по построению трёхмерных моделей объектов в окрестности железнодорожной инфраструктуры по маскам информативных классов



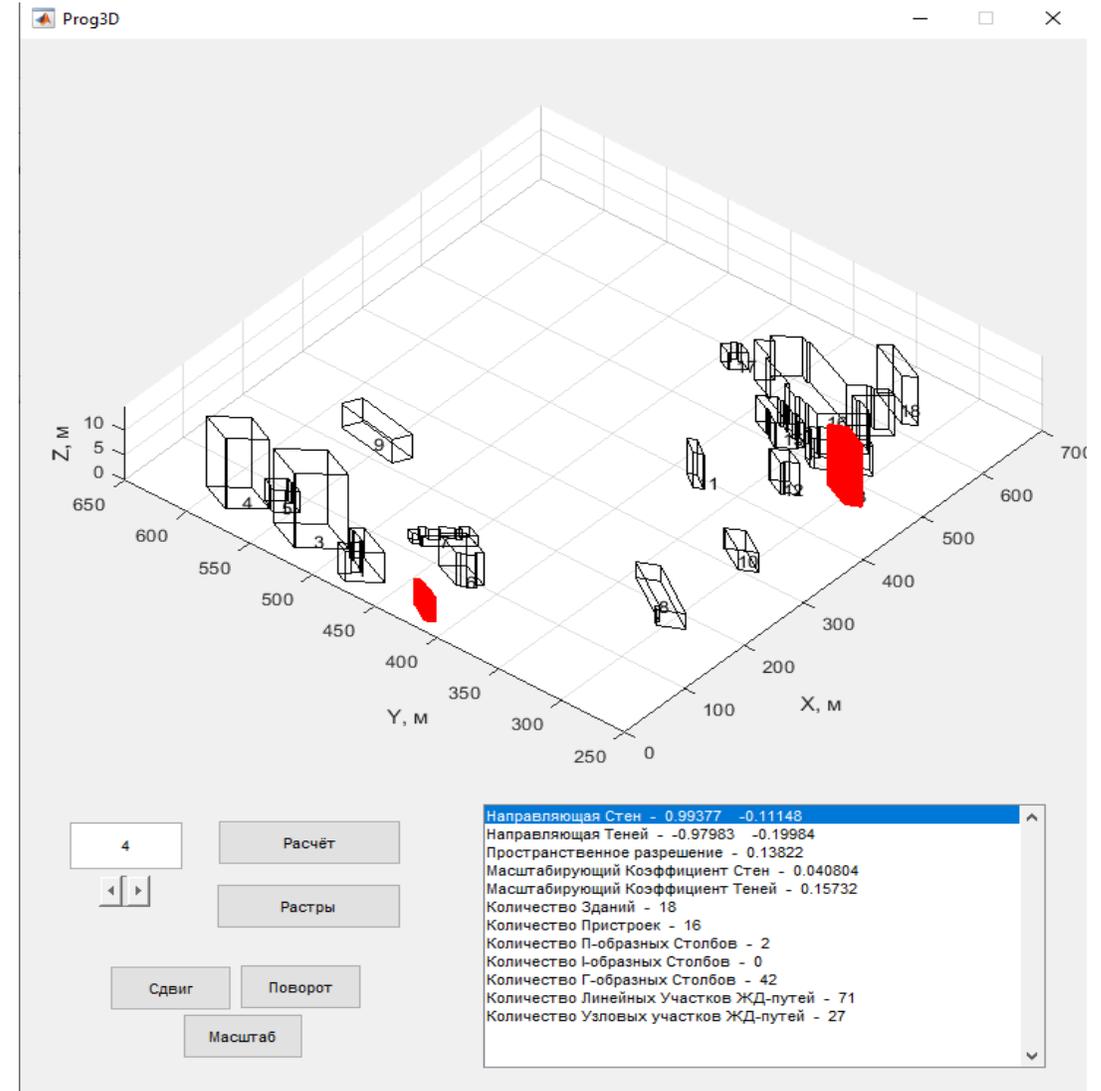
Упрощённая версия программы (v1):

- Надстройки зданий и элементы крыш не моделируются
- Не учитываются в качестве пристроек здания, отстоящие от основного здания на малое расстояние, но не имеющих с ним общих стен
- Выводится геометрическая модель только слоя зданий;
- Отсутствует возможность задавать свои масштабирующие коэффициенты и направляющие
- При оценке m_3 , m_4 , \bar{n}_3 , \bar{n}_4 учитываются только столбы Г-, Т-, П- и I-образной форм, а метод координатных сеток – не используется
- Не применяется метод эквивалентного эллипса для определения ориентации здания при отсутствии опорного отрезка
- Отсутствуют функции расширения модели, в частности экстраполяция и интерполяция
- Настраиваемые параметры не управляются и не вычисляются в зависимости от разного сорта входных данных

Пример работы программы



Отображение масок классов (для снимка 1)



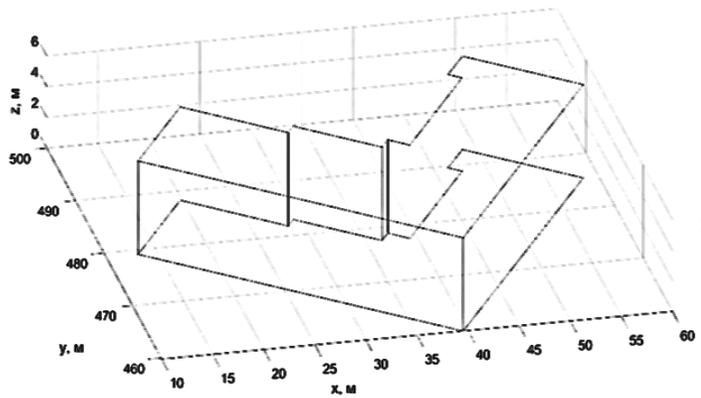
Отображение трёхмерной модели

Геометрические параметры зданий

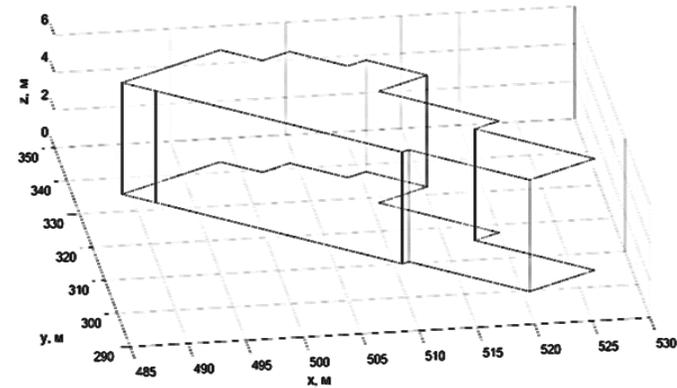
Номер Здания	Средняя Высота, м	Максимальная Высота, м	Получена Форма?	Получена Высота?	Абсцисса Центра, м	Ордината Центра	Периметр, м
1	8.74308	10.7632	1	1	482.1816	38.70098	1404.8229
2	6.48075	7.40177	0	1	421.9257	25.18057	5.7313431
3	16.4203	16.6792	1	1	521.1246	49.19068	3200.1739
4	16.8074	18.3265	1	1	580.6223	51.84728	2261.2507
5	6.98163	8.92106	1	1	558.8167	72.75628	455.06774
6	8.84046	10.2792	1	1	423.5138	97.65866	909.82774
7	6.23917	9.60007	1	1	461.5571	134.1898	1855.5706
8	5.89949	8.08071	1	1	315.9678	196.9876	4653.5437
9	7.15982	8.59858	1	1	556.0497	222.8094	1314.7021
10	7.8392	11.2807	1	1	308.2052	313.1566	1070.0084
11	8.33969	8.92106	1	1	378.8425	393.2467	520.76142
12	7.91945	8.75975	1	1	333.9404	441.0863	489.54438
13	13.9799	15.1598	0	1	300.3866	477.3812	8.1002983
14	7.56338	8.24213	1	1	324.6719	509.3174	835.65572
15	9.5027	13.1228	1	1	367.5574	511.8514	681.72177
16	12.1045	14.1247	1	1	357.7964	565.6654	4952.0086
17	5.12426	5.69011	1	1	437.3333	579.5725	336.15912
18	13.1066	13.7692	1	1	330.4819	631.9473	1569.7998

Таблица основных геометрических параметров моделей зданий для снимка I

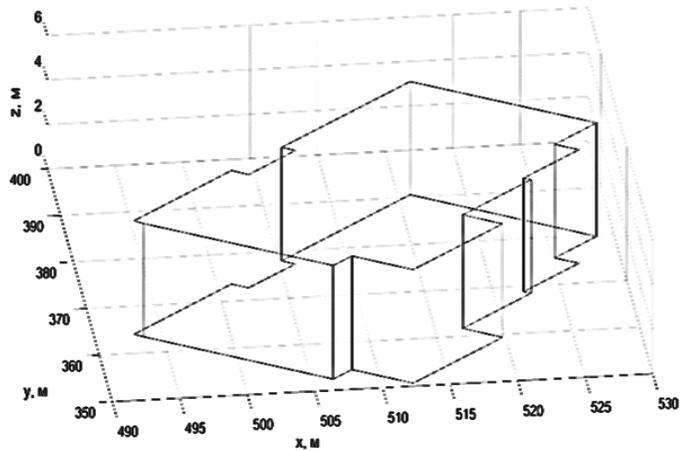
Примеры моделей зданий



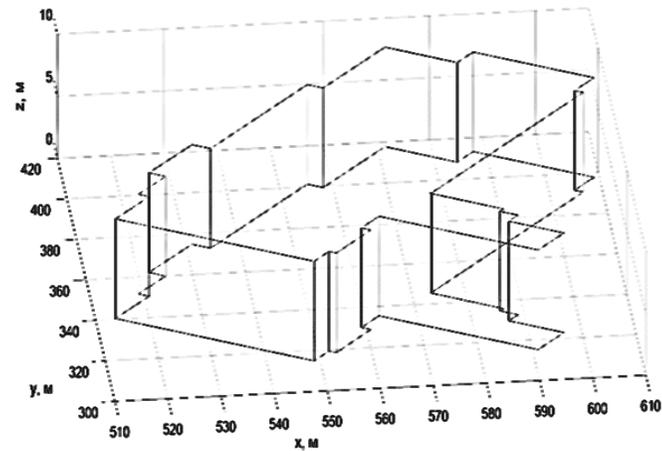
Объект 1



Объект 14



Объект 15



Объект 16

*Примеры моделей зданий
для снимка I*

Выводы

- Разработан метод определения формы и размеров объектов железнодорожной инфраструктуры по маскам информативных классов, которые могут генерироваться в результате работы искусственных нейронных сетей.
- Предлагаемый подход позволяет работать: с областями «неправильной» формы (с частичным или полным отсутствием «ровных» границ), а также частичного заслонения областей, в условиях дефицита данных для обучения, неполноты или нечеткости разметки, с одним изображением при отсутствии метаданных.
- В процессе машинного обучения возможно использование для обучения других вариантов типизации частей объекта, например: выявление двухмерных или трехмерных геометрических примитивов, а также углов (орты зданий, углы на крышах разных форм – полувальмовых, вальмовых и т.д.); генерация обучающей выборки посредством использования алгебраических операций над геометрическими объектами; разметка типизированных формообразующих элементов объектов в виде точечной разметки, позволяющая детализировать трёхмерную модель объекта.