

Оценка пространственных геометрических параметров объектов захоронения отходов по радарным изображениям

Рихтер А.А. (1); Мурынин А.Б. (1, 2)

1/ НИИ АЭРОКОСМОС

Москва, Гороховский пер., 4, 105064, Россия

E-mail: www.aerocosmos.info

2/ Вычислительный центр РАН

Москва, ул. Вавилова, 40, 680021, Россия

E-mail: www.ccas.ru

(Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 16-51-55019)

Докладчик – Рихтер Андрей Александрович

Постановка задачи

1. Разработать методику оценки пространственных геометрических параметров объектов захоронения отходов (ОЗО) по данным радарной съёмки поверхности Земли;
2. Построить 3D-модели крупных ОЗО на примере полигонов ТБО и терриконов Московского региона;
3. Оценить пространственные геометрические параметры ОЗО;
4. Разработать методику детектирования крупных высотно ориентированных ОЗО по данным радарных изображений.

Высотные объекты захоронения отходов



Вид спереди



Вид сверху

Полигон ТБО и ПО Саларьево, Ленинский район Московской области

Приведен пример высотного объекта захоронения отходов (ОЗО) полигон твёрдых бытовых (ТБО) и промышленных (ПО) отходов Саларьево Московского региона – крупнейшей свалки Европы, названной «Голубем Мира». Высота свалки на 2007 г. достигла 75 м. В связи с достижением максимальной вместимости полигон закрыт, и на нем по настоящее время проводится рекультивация.

Пространственное визуальное детектирование свалок по Космическим снимкам



2002 г.



2013 г.

Закрытый террикон фосфогипса Зелёная Гора, пос. Шиферная, Воскресенский район, 55°17'29.55"С, 38°42'58.38"В (высота не изменилась)



2003 г.



2015 г.

Полигон ТБО и ПО Саларьево, Ленинский район, 55°36'43.77"С, 37°25'52.42"В (средние изменения высоты)

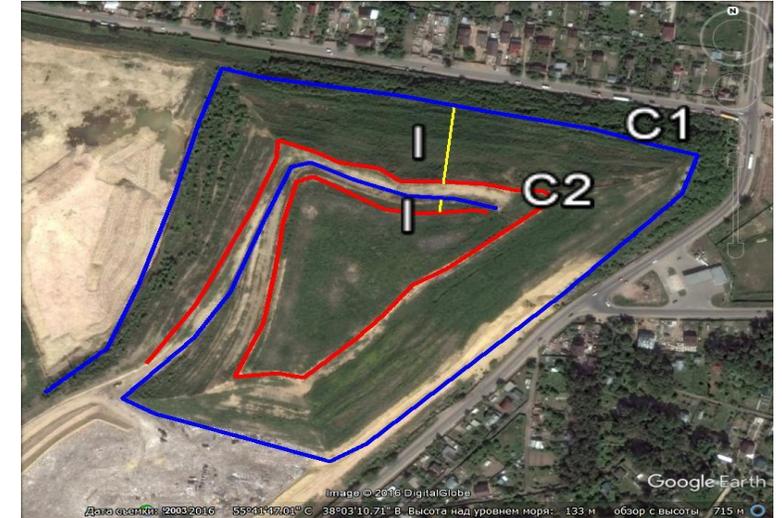


2002 г.



2016 г.

Действующий террикон фосфогипса Белая Гора, Воскресенский район, 55°19'28.3"С, 38°45'4.35"В (значительные изменения высоты)



Построения для визуальной оценки высоты свалки

$$H_{cp} = l_{cp} \cdot tg f_{cp}, \quad f_{cp} = arctg \frac{H_{cp}}{l_{cp}}$$

C1 и C2 – внешний и внутренний контуры откоса ОЗО

l – расстояния между точками контуров

l_{cp} – среднее расстояние

f_{cp} – средний угол откоса свалки

H_{cp} – средняя высота свалки

Изменение высотности свалок (космические снимки, Google Earth)

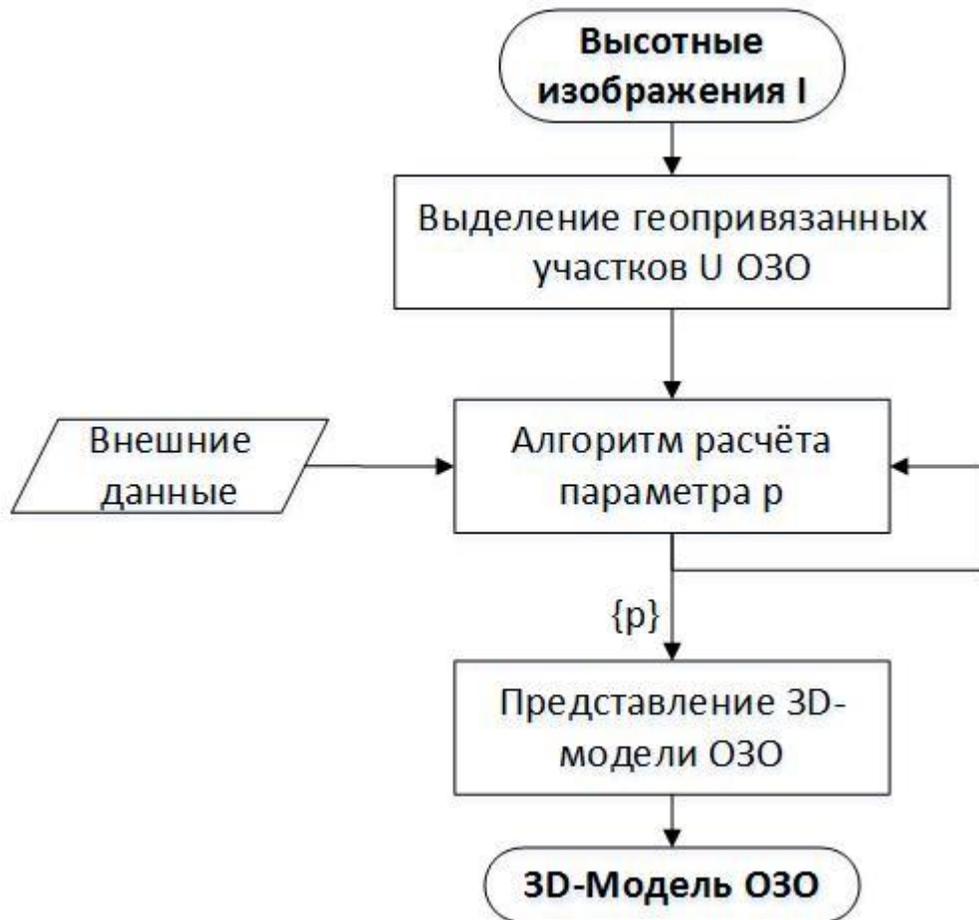
Пространственные дешифровочные признаки свалки

1. ОЗО имеют определенную вместимость (пропускную способность), которая увеличивается с ростом ее площади;
2. С ростом площади и высоты ОЗО стремится от «бесформенной» формы к «правильной»;
3. Горизонтальная поверхность ОЗО (карты складирования) имеет большую шероховатость, чем наклонная (откос);
4. ОЗО имеет пики высоты, которая уменьшается с ростом расстояния от пиков до среднего уровня высоты поверхности земли, а средняя фигура поверхности ОЗО подчиняется экспоненциальному закону распределения;
5. На плоскости ОЗО обычно имеет «случайную» полигональную форму;
6. Если на плоскости ОЗО имеет форму линии либо одни «стороны» фигуры прерываются «правильными» линиями, то, вероятно, расширение ОЗО в пространстве ограничивается естественными или искусственными объектами (река, утес, здание, дорога и др.);
7. ОЗО имеет нижние и верхние пределы площади, высоты, угла откоса, вытянутости и др. плоскостных и пространственных геометрических параметров, что отличает их от других подобных высотных объектов (сопок, холмов, гор, карьеров и др.).

Классификация пространственных геометрических параметров свалки

Категория параметров	Виды параметров
Общие параметры	Объём, площадь поверхности, площадь основания, пространственный периметр, высота, угол откоса и др.
Параметры статистического распределения	Центр масс, моменты инерции (осевые, центральные и др.) ориентация в пространстве и др. параметры эквивалентного эллипсоида
Параметры пространственного распределения	Концентрация, вытянутость, объём, площадь и др. параметры по пространственным направлениям
Динамические параметры	Перемещение, скорость перемещения свалки, фазы перемещения в пространстве и др.
Технологические параметры	Вместимость, шероховатость поверхности, рельефность поверхности, ярусность и др.
Пространственные характеристики ОЗО	Пространственный образ, поверхность замусоривания, высотный профиль, динамика пространственных (линейных и угловых), временных изменений, эквивалентный эллипсоид, уровни высот, изображение высот, пространственный контур, изолинии высоты, фазовая траектория, компоненты 3D-модели, гистограммы высот (распределения яркостей, кумулятивная)

Блок-схема оценки пространственных параметров свалки по радарным снимкам



Высота H свалки в точке (x, y) :

$$H(x, y) = h(x, y) - h_{\min}, \quad x = b \cdot i, \quad y = b \cdot j, \quad h(x, y) = k \cdot I(x, y)$$

I – радарный (высотный, радиометрический) снимок

$h_{\max i}$ – локальный максимальный уровень высоты свалки

h_{\min} – уровень высоты свалки у основания

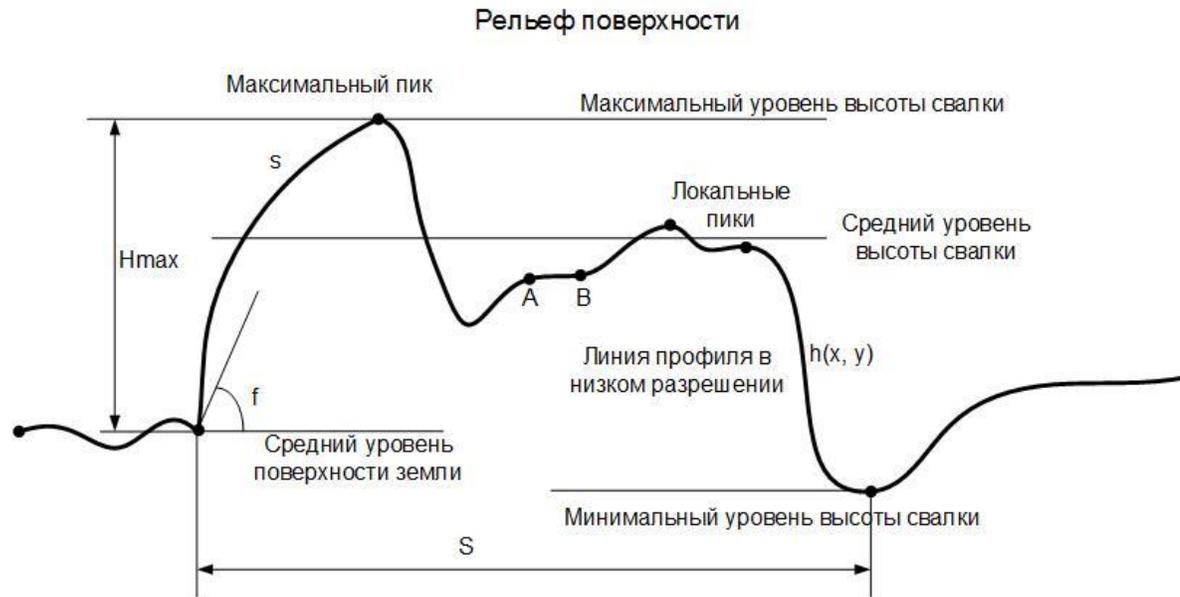
i – номер высотного пика

b и k – пространственное и высотное разрешения изображения I

(x, y) и (i, j) – линейные и матричные координаты пикселя на высотном изображении

$I(x, y)$ – коэффициент спектральной яркости в точке с линейными координатами (x, y) и матричными (i, j)

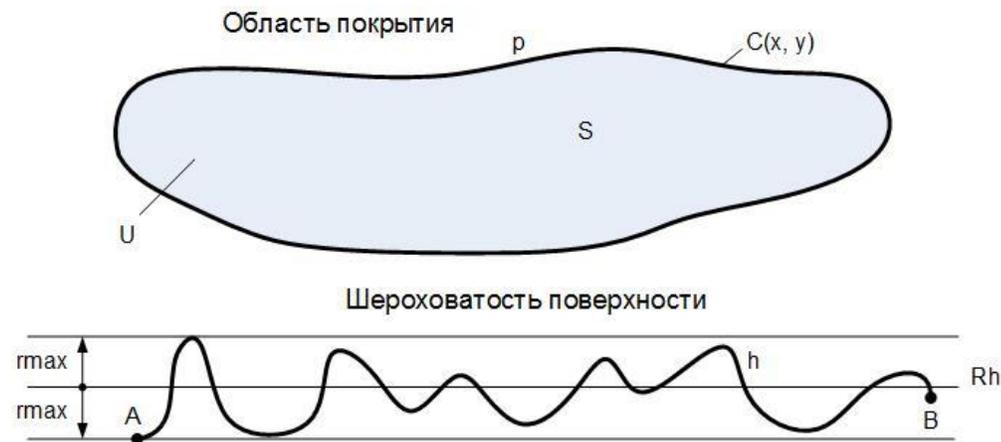
Рельефность и шероховатость поверхности свалки



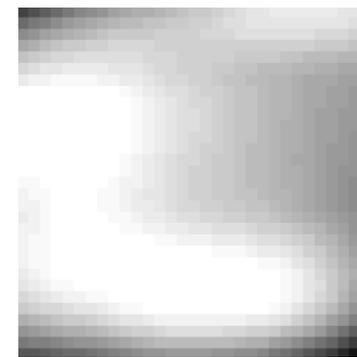
$$r_0 = E[r(x, y)], \quad r_{min} = \min r(x, y), \quad r_{max} = \max r(x, y)$$

$$r(x, y) = |h(x, y) - R_h(x, y)|$$

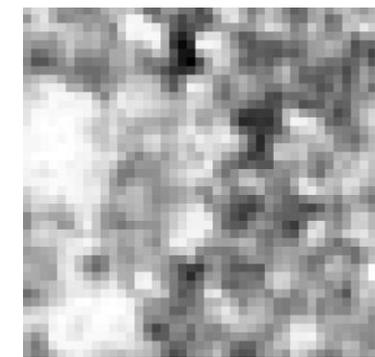
$E[]$ – математическое ожидание, $h(x, y)$ – уравнение поверхности свалки, $R_h(x, y)$ – гладкая поверхность регрессии реальной поверхности $h(x, y)$, $r(x, y)$ – отклонение реальной поверхности от ее регрессии (среднего значения в точке), r_{min} , r_{max} , r_0 – минимальное, максимальное и среднее значение шероховатости.



Текстура замусоривания на высотном изображении



низкого разрешения



высокого разрешения

Площадь поверхности свалки

$$s = \sum_{q \in U} s(q), \quad q = ABCD, \quad s(q) = \sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)(p-d) - abcd \cdot \cos^2 \theta}$$

$$p = \frac{a+b+c+d}{2}, \quad a = AB, b = BC, c = CD, d = DA, \quad \theta = \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$x_A = b \cdot i, \quad y_A = b \cdot j, \quad z_A = k \cdot I(i, j)$$

$$x_B = b \cdot (i+1), \quad y_B = y_A, \quad z_B = k \cdot I(i+1, j)$$

$$x_C = x_B, \quad y_C = b \cdot (j+1), \quad z_C = k \cdot I(i+1, j+1)$$

$$x_D = x_A, \quad y_D = b \cdot (j+1), \quad z_D = k \cdot I(i, j+1)$$

$$x_A, x_B, x_C, x_D; y_A, y_B, y_C, y_D \Rightarrow a, b, c, d; \alpha, \beta$$

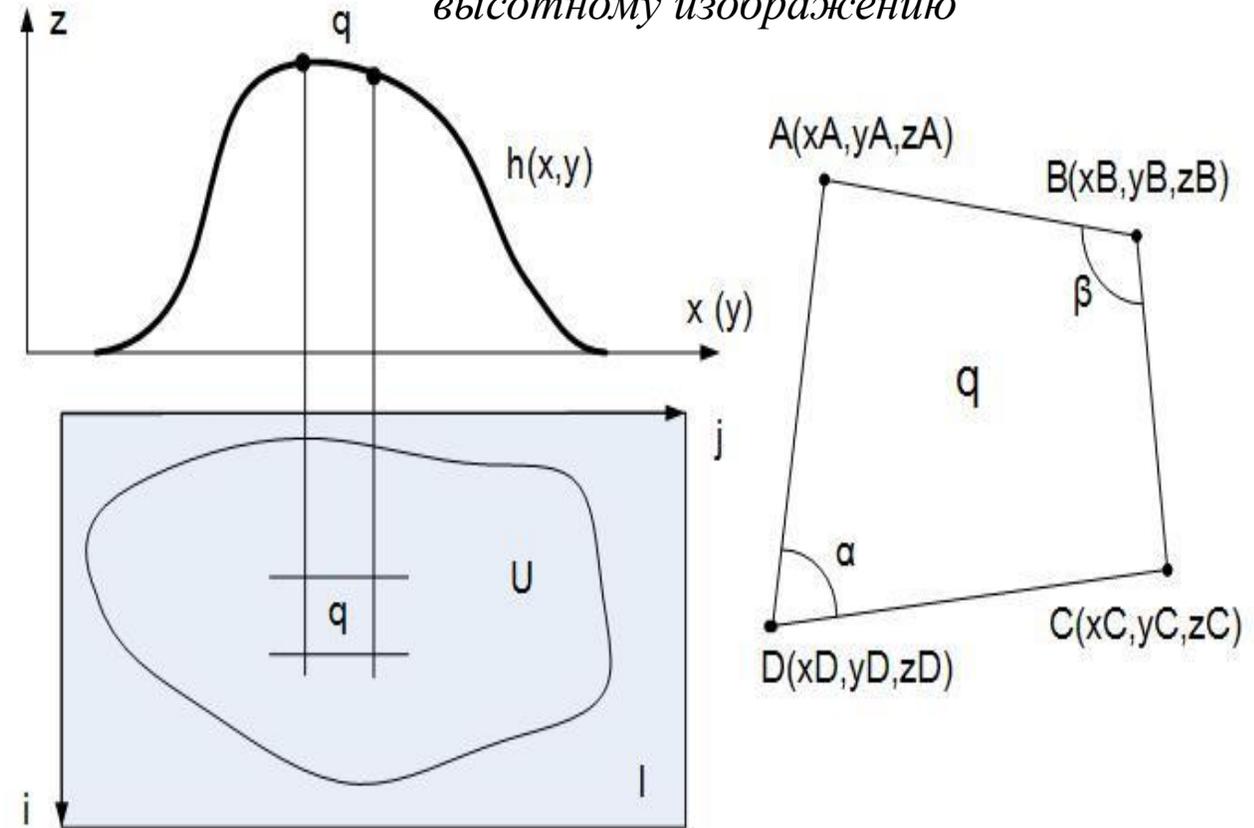
s – площадь поверхности

$s(q)$ – площадь элементарных четырёхугольников q

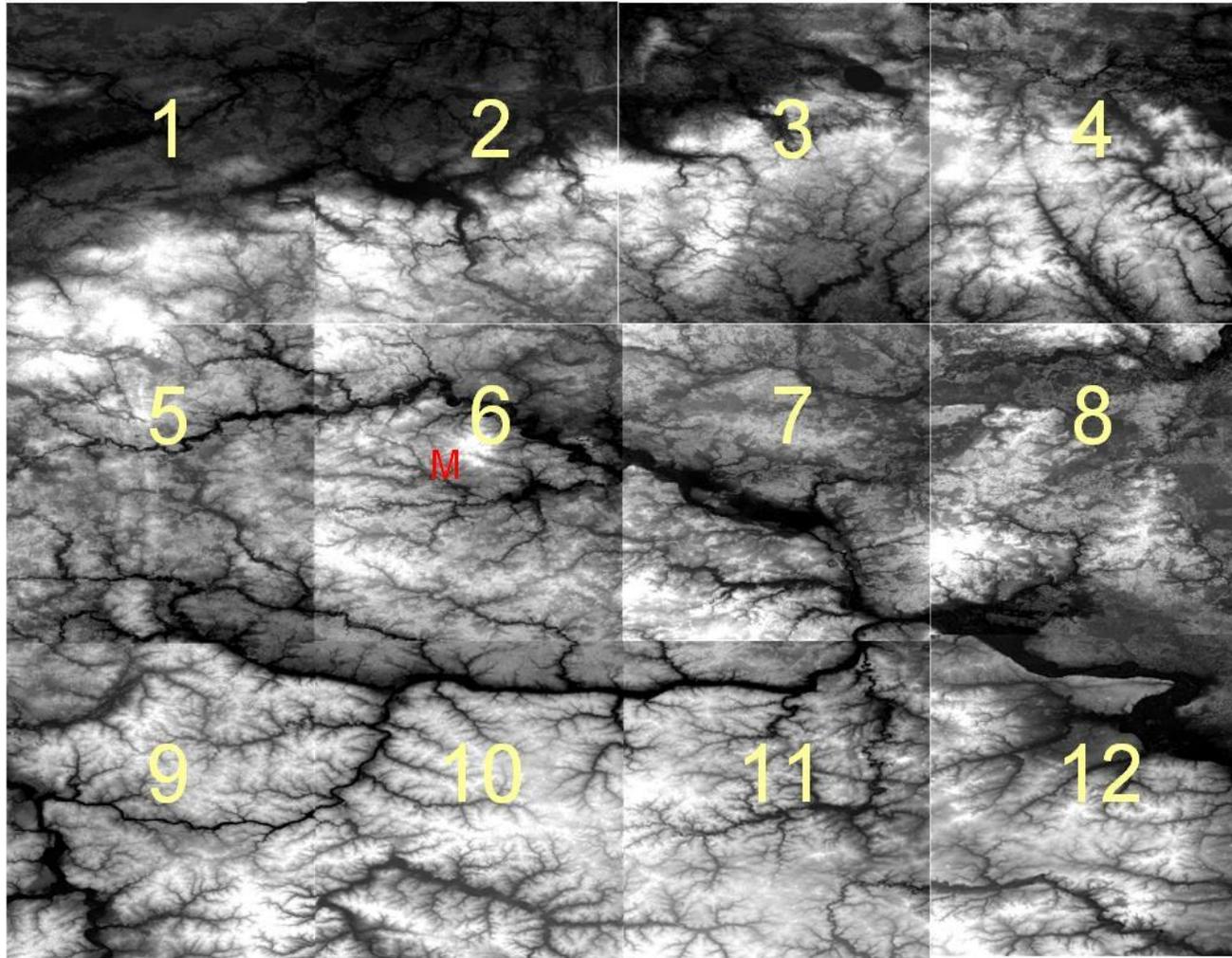
U – область покрытия ОЗО

x, y, z – пространственные координаты

Геометрические построения для оценки площади поверхности объекта по высотному изображению



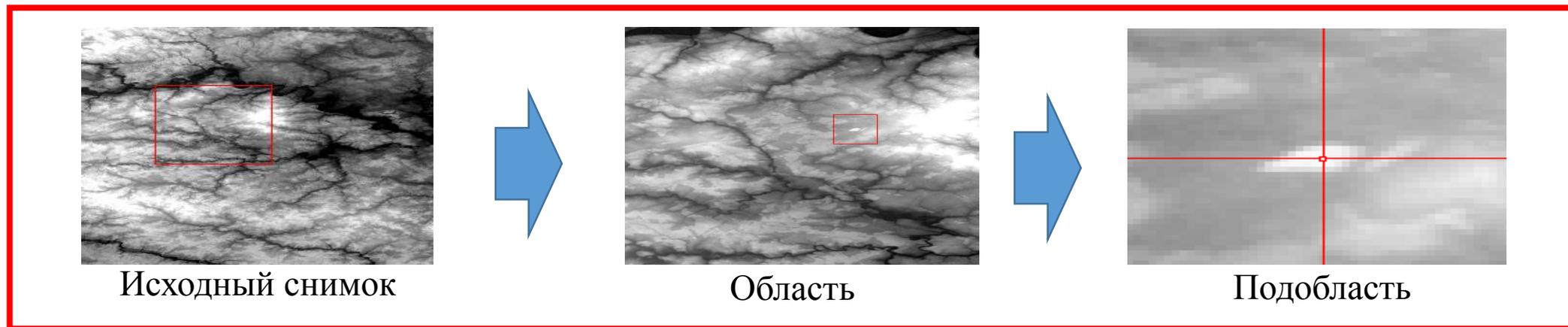
Пример построения модели свалки (исходные данные)



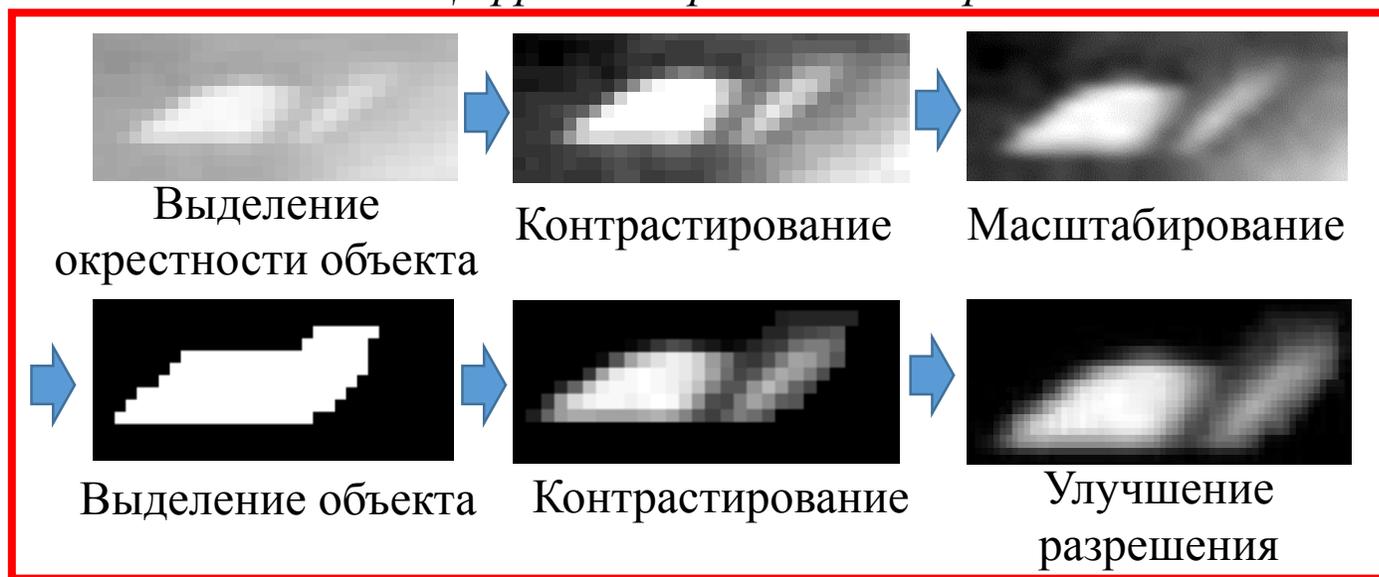
Исходные радарные снимки получены из архивов данных проекта SRTM: радарная топографическая съемка поверхности земного шара, дающая распределение высот для каждого пикселя большей части поверхности Земли (время съёмки – февраль 2000 г., длительность съёмки – 11 дней, пространственное разрешение – 60 м, высотное разрешение – 1 м).

*Мозаика радарных снимков,
Московская область
M – точка-ориентир (г. Москва)
1-12 – снимки в обработке
Исходные снимки – SIR-C и X-SAR
Архив геоданных –
<https://earthexplorer.usgs.gov>*

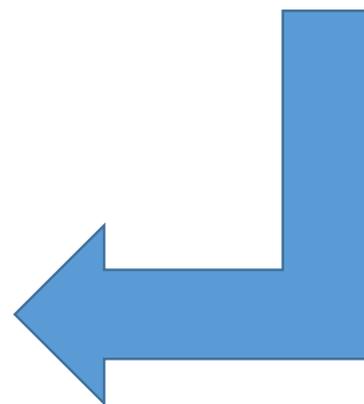
Пример построения модели свалки (выделение окрестности свалки)



Цифровая обработка изображений



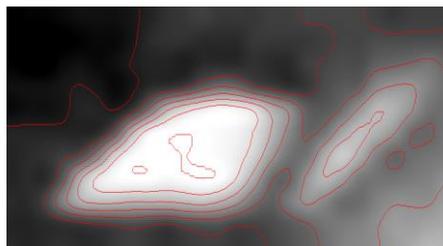
Выделение ОЗО



Полигон ТБО
Саларьево,
Ленинский район
Московского
региона

Пример построения модели свалки (результаты обработки)

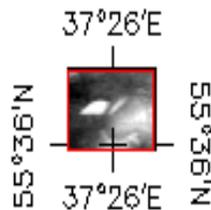
Изображения высотности



Изолинии высоты

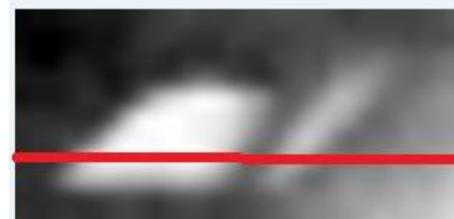


Кластеры высоты

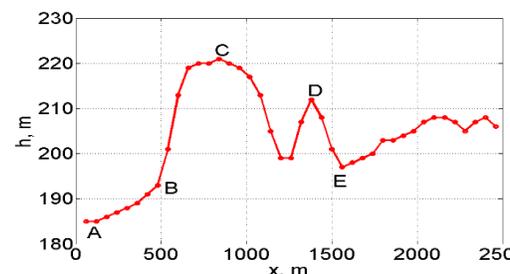


Нанесение географической сетки

Профиль ОЗО в сечении



выделение сечения



линия высоты в сечении и характерные точки профиля

Рельеф ОЗО (полигон ТБО Саларьево, февраль 2000 г.)

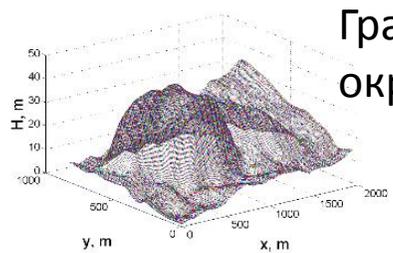


График поверхности в окрестности свалки

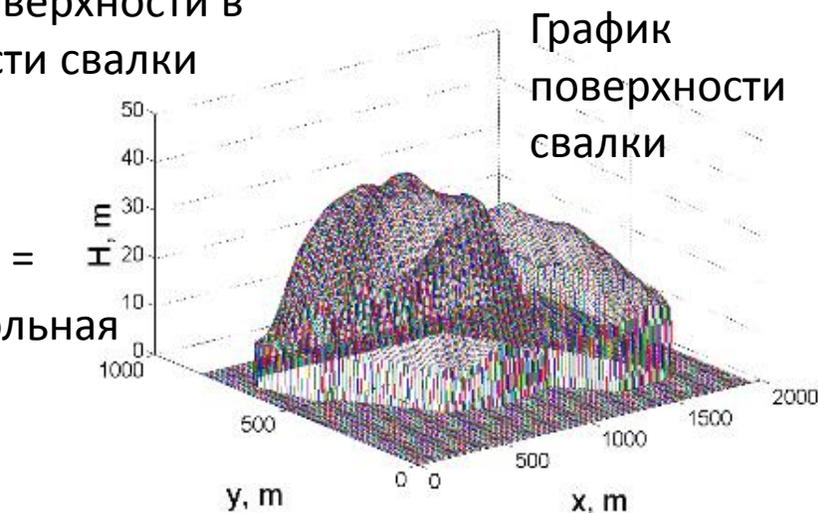
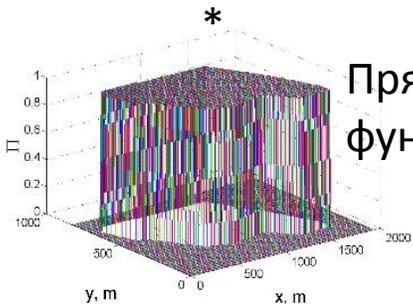
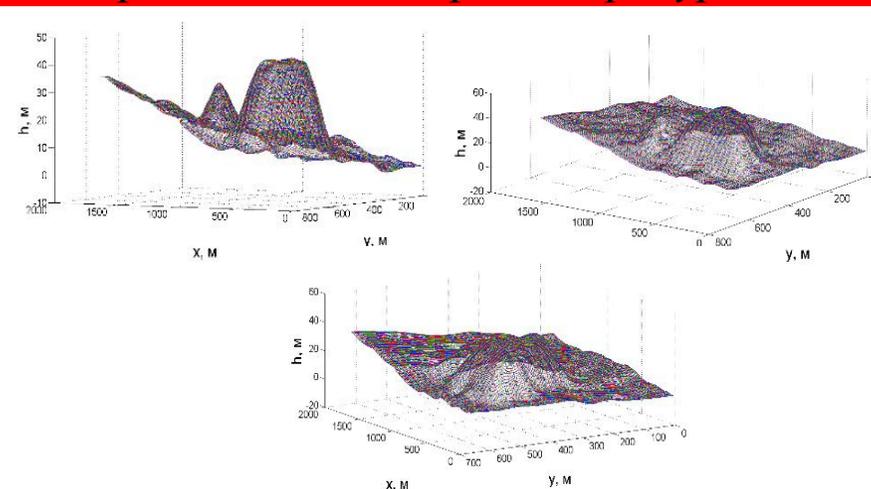


График поверхности свалки

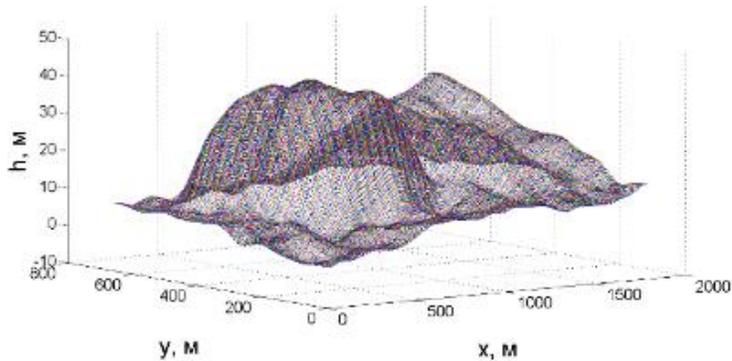


Прямоугольная функция

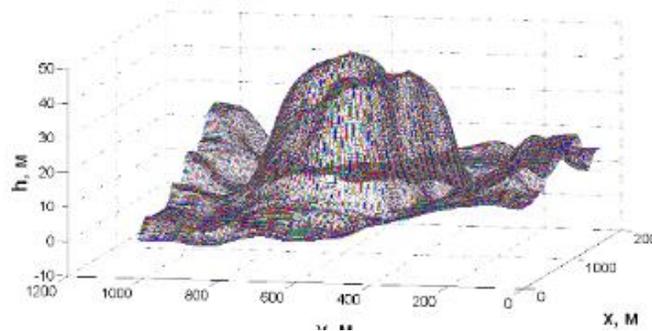
Изображения ОЗО с разных ракурсов



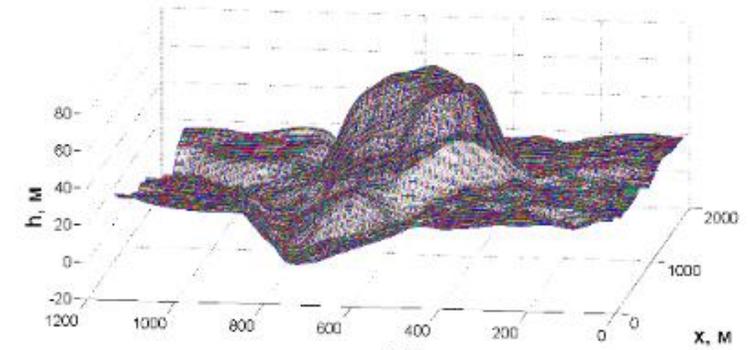
Оценка пространственных параметров крупных свалок по результатам цифровой обработки



Полигон ТБО Саларьево



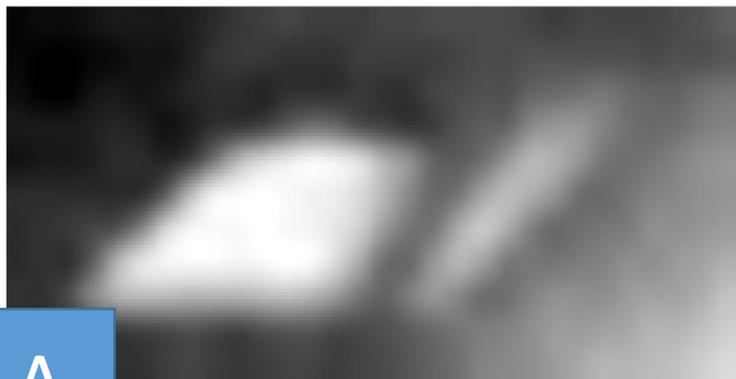
Террикон фосфогипса Белая Гора



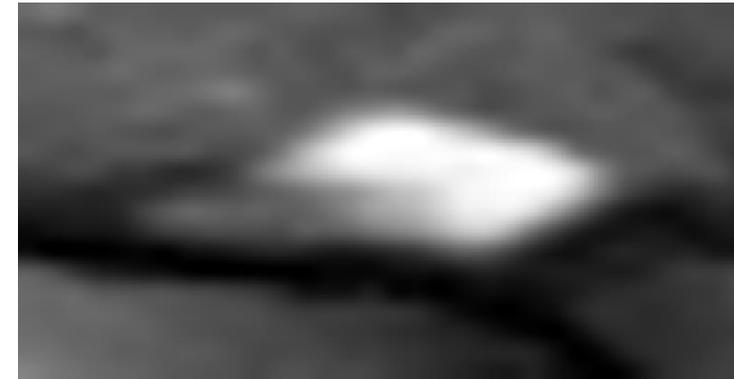
Террикон фосфогипса Зелёная Гора

Параметр	Саларьево	Белая Гора	Зелёная Гора
Площадь, га	62	64	61
Максимальная высота, м	42	43	45
Средняя высота, м	30	35	31
Объём, 10^7 м^3	1.12	1.4	1.67

Светимость свалок на радарных снимках



А



Б



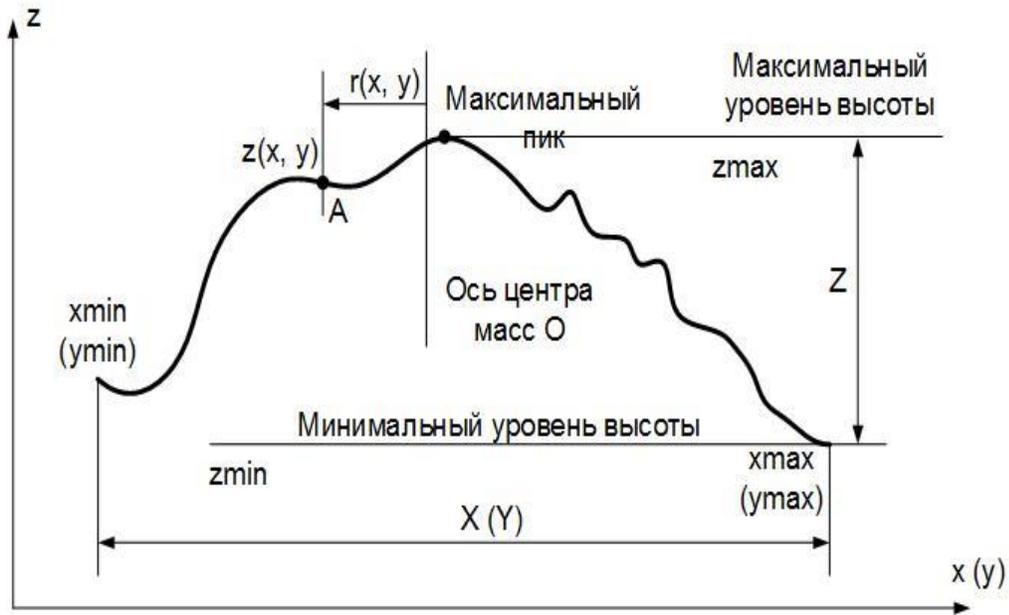
Саларьево

Белая Гора

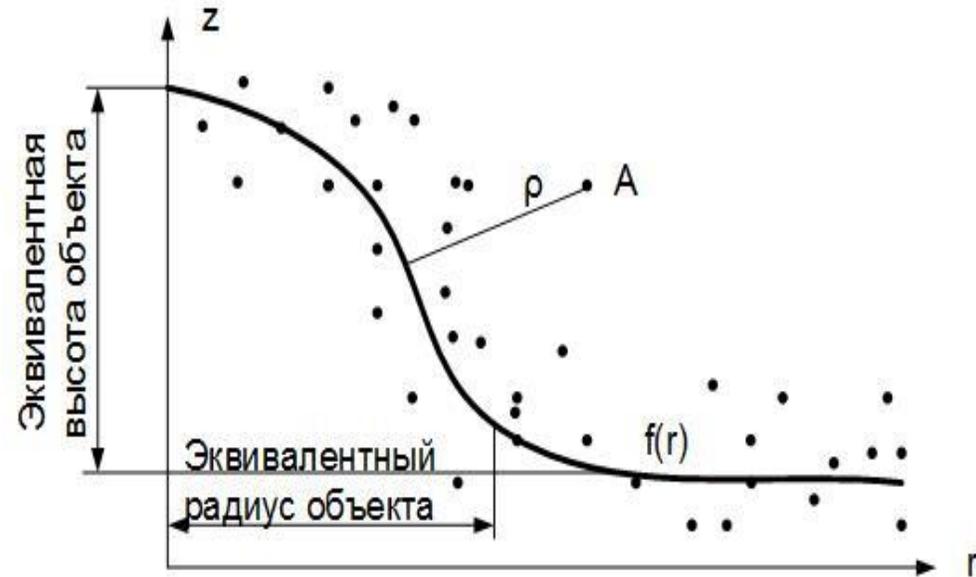
Зелёная Гора

Радарные (А) и видимые (Б) изображения крупных свалок Московской области

Высотные характеристики свалок



Линейная характеристика



Радиальная характеристика

$$r = \sqrt{(x_A - x_O)^2 + (y_A - y_O)^2}, z = I(x, y)$$

Блок-схема алгоритма детектирования свалок по радарным снимкам



Критерий отличия ОЗО от других высотных объектов:

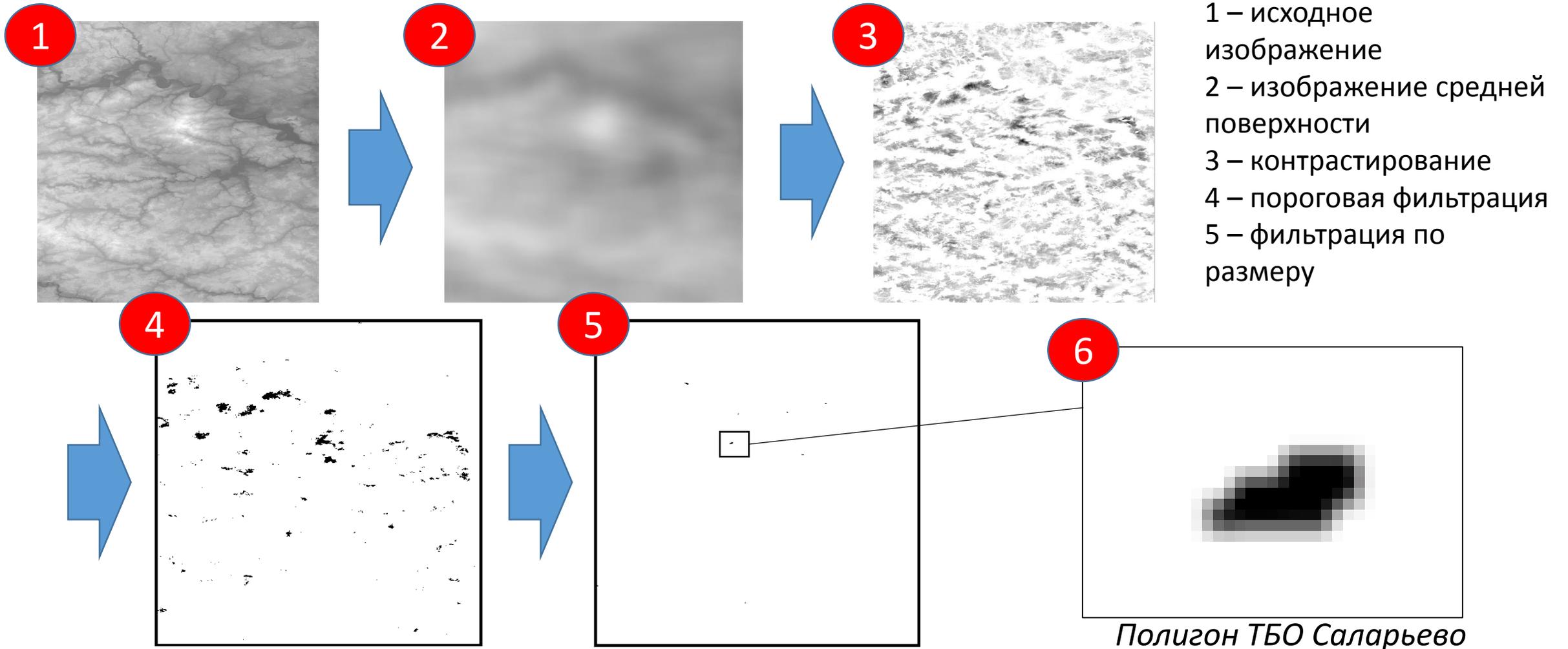
$$H \in [H_{\min}, H_{\max}]$$

$$S \in [S_{\min}, S_{\max}]$$

$$F \in [F_{\min}, F_{\max}]$$

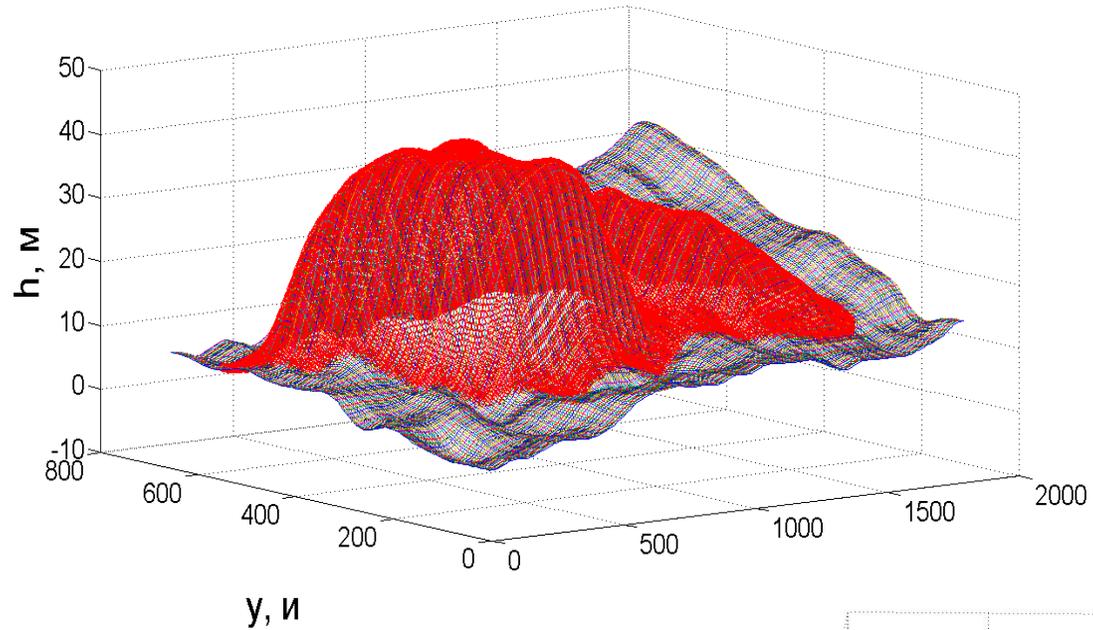
H – высота объекта
 S – площадь объекта
 F – наклон объекта

Основные этапы обработки

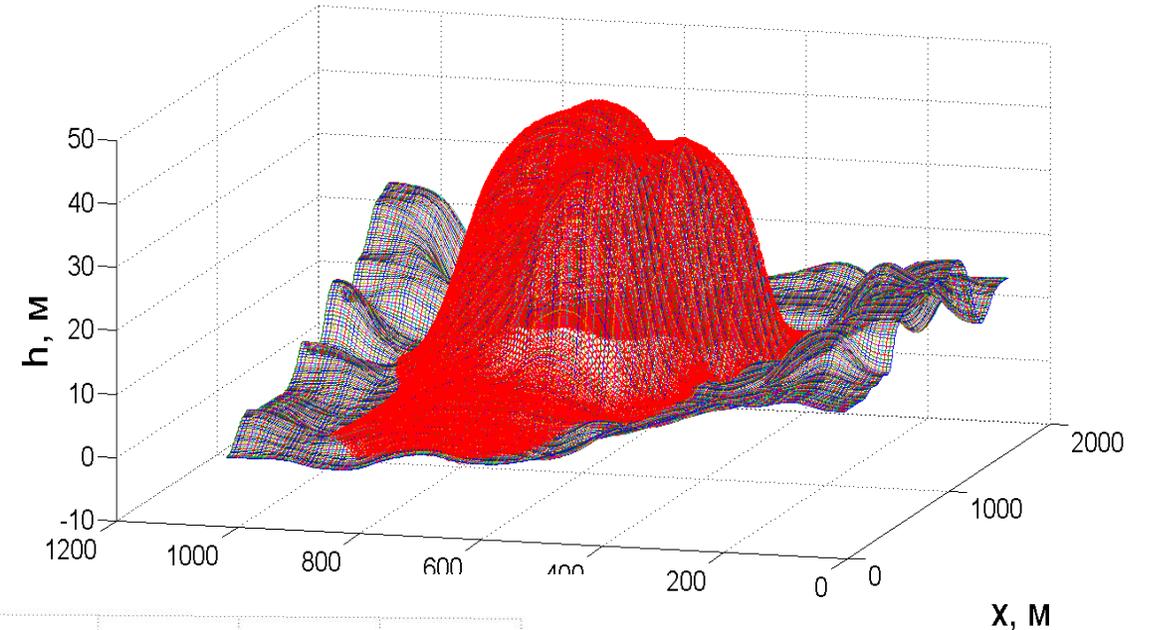


Полигон ТБО Саларьево

Наложение областей детектирования на трёхмерную модель поверхности

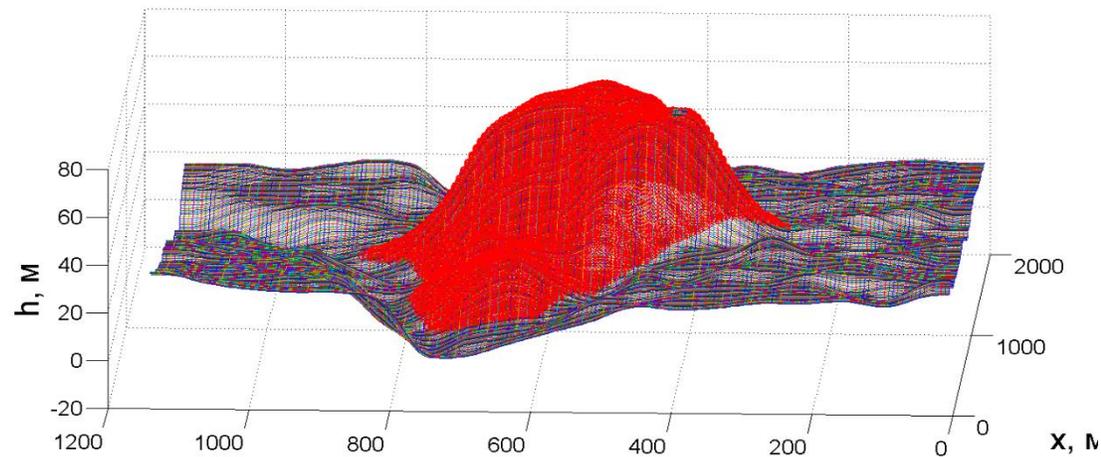


Саларьево



Белая Гора

Шиферная



Выводы

Предлагаемая методика расчета пространственных геометрических параметров и характеристик по космическим изображениям, в частности, объема и площади поверхности свалок, позволяет не только строить ее трехмерные образы, но и вообще проводить более полную оценку структуры, состава ОЗО и других классов параметров, таких как тепловые, компонентные, влияния на окружающую среду, проводя построение соответствующих моделей в пространстве.