

# 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](http://www.aerocosmos.info)

2/ Вычислительный центр РАН

Москва, ул. Вавилова, 40, 680021, Россия

E-mail: [www.ccas.ru](http://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)

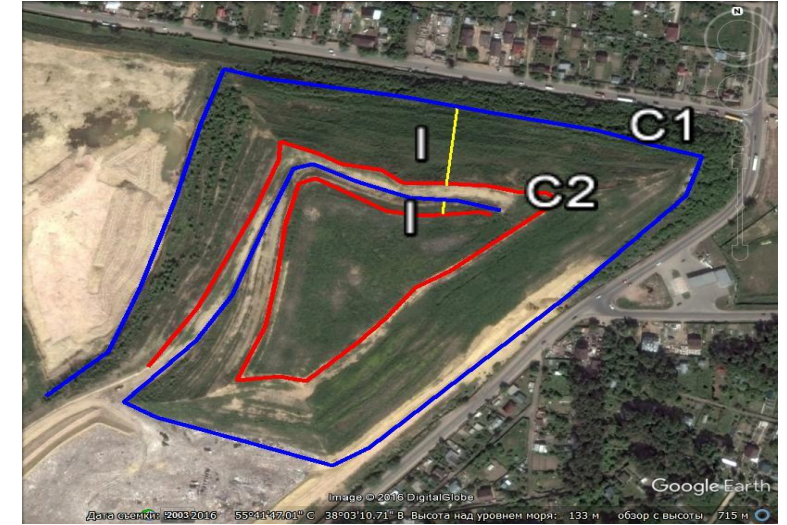


2002 г.



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)

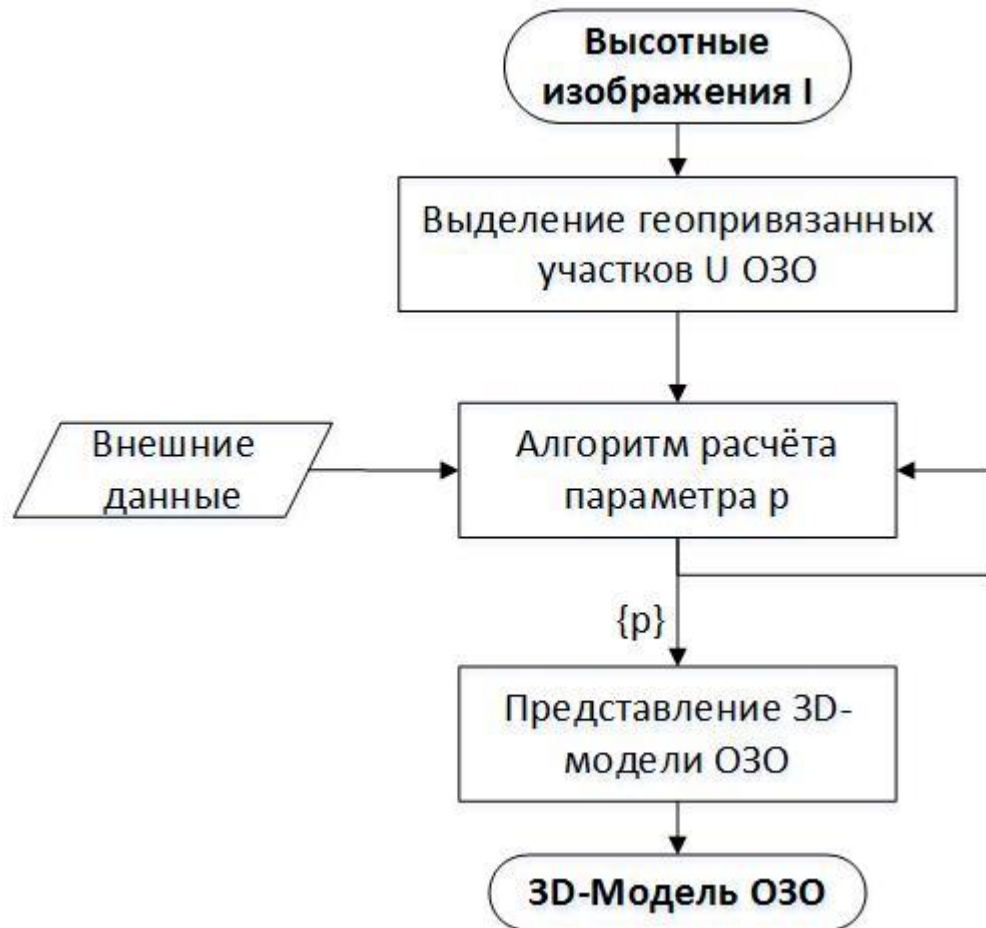
# Пространственные дешифровочные признаки свалки

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.
<b>Пространственные характеристики ОЗО</b>	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

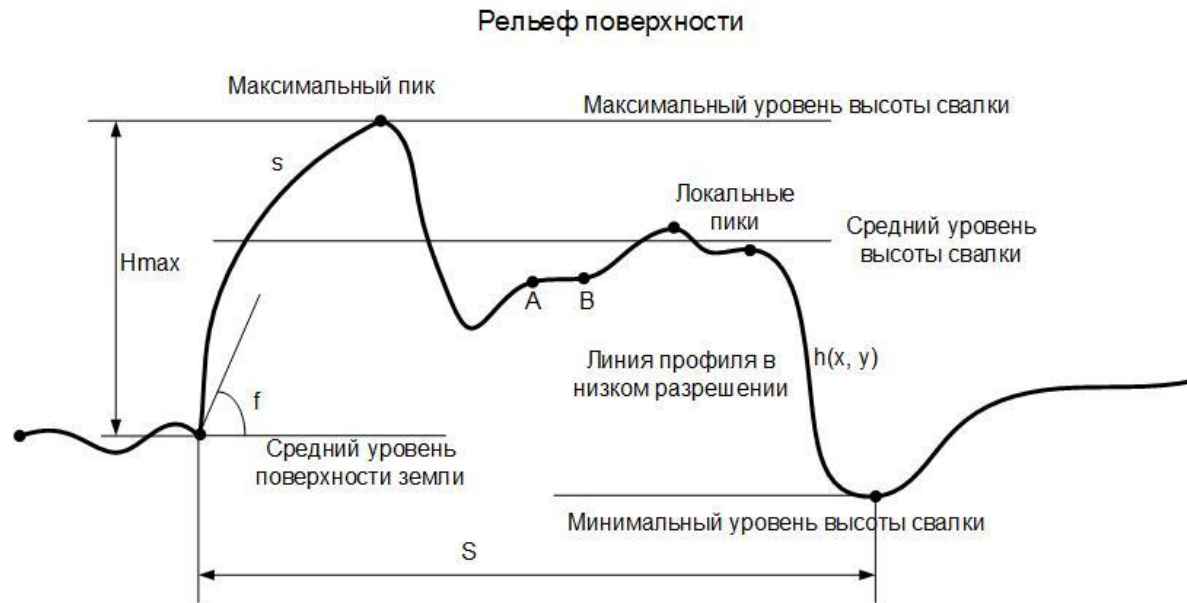
$i$  – номер высотного пика

$b$  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  $(i, j)$

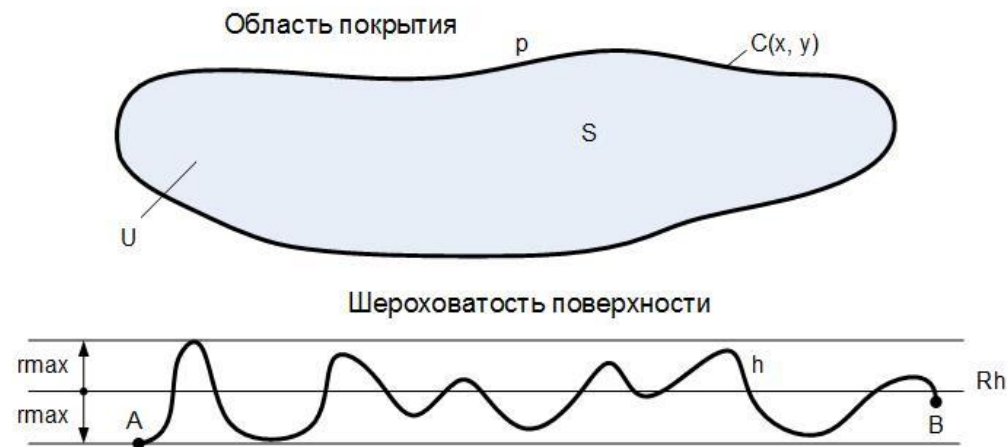
# Рельефность и шероховатость поверхности свалки



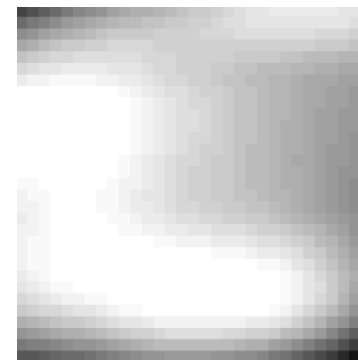
$$r_0 = E[r(x, y)], \quad r_{min} = \min r(x, y), \quad r_{max} = \max r(x, y)$$

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

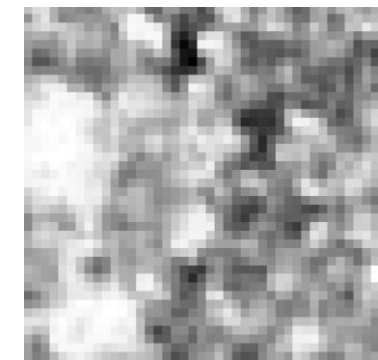
$E[]$  – математическое ожидание,  $h(x, y)$  – уравнение поверхности свалки,  $R_h(x, y)$  – гладкая поверхность регрессии реальной поверхности  $h(x, y)$ ,  $r(x, y)$  – отклонение реальной поверхности от ее регрессии (среднего значения в точке),  $r_{min}$ ,  $r_{max}$ ,  $r_0$  – минимальное, максимальное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



## Текстура замусоривания на высотном изображении



низкого разрешения



высокого разрешения



# Площадь поверхности свалки

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

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

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

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

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

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

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

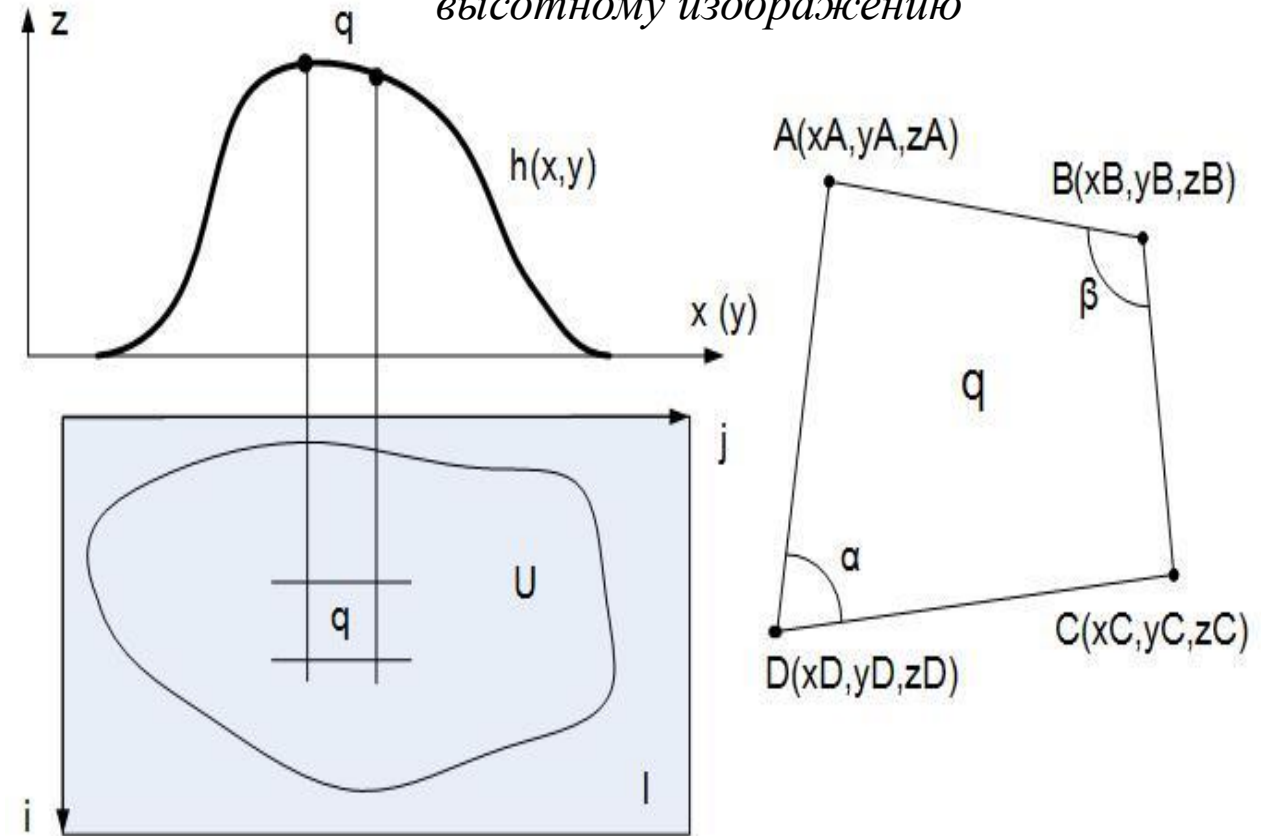
$s$  – площадь поверхности

$s(q)$  – площадь элементарных четырёхугольников  $q$

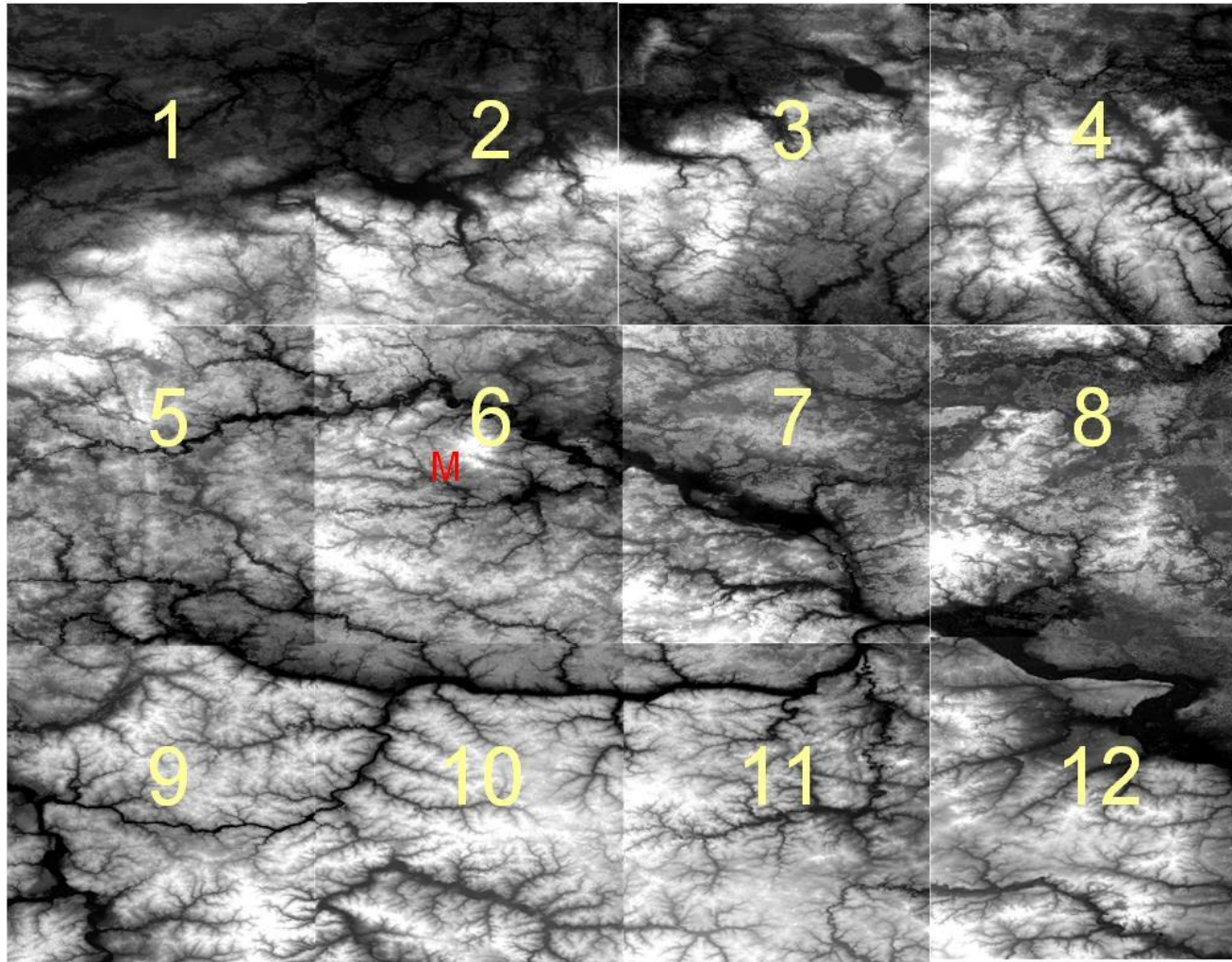
$U$  – область покрытия ОЗО

$x, y, z$  – пространственные координаты

Геометрические построения для оценки площади поверхности объекта по высотному изображению



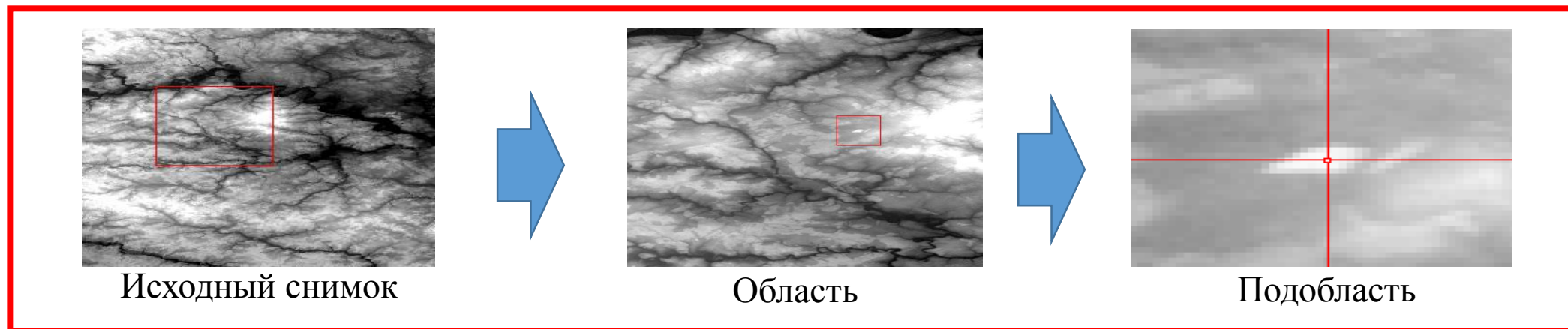
# Пример построения модели свалки (исходные данные)



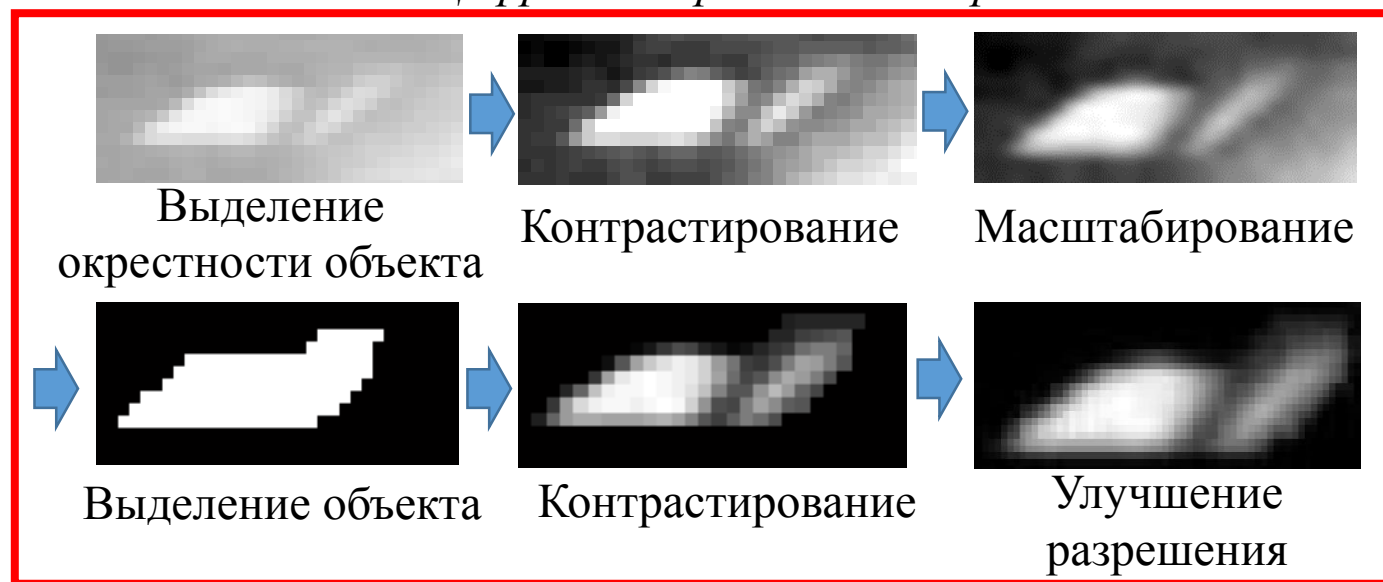
Исходные радарные снимки получены из архивов данных проекта SRTM: радарная топографическая съемка поверхности земного шара, дающая распределение высот для каждого пикселя большей части поверхности Земли (время съёмки – февраль 2000 г., длительность съёмки – 11 дней, пространственное разрешение – 60 м,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

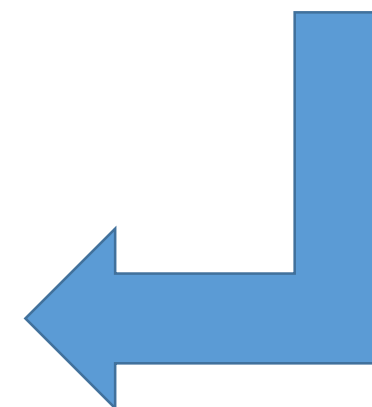
# Пример построения модели свалки (выделение окрестности свалки)



## Цифровая обработка изображений



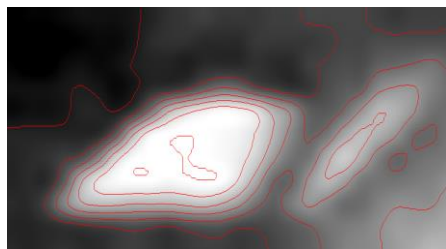
## Выделение ОЗО



Полигон ТБО  
Саларьево,  
Ленинский район  
Московского  
региона

# Пример построения модели свалки (результаты обработки)

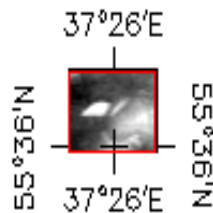
Изображения высотности



Изолинии высоты



Кластеры высоты

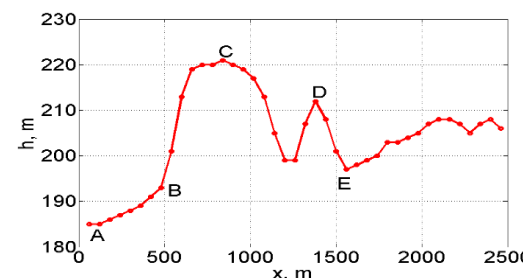


Нанесение географической сетки

Профиль ОЗО в сечении



выделение сечения



линия высоты в сечении и характерные точки профиля

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

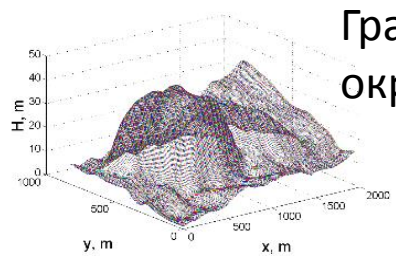


График поверхности в окрестности свалки

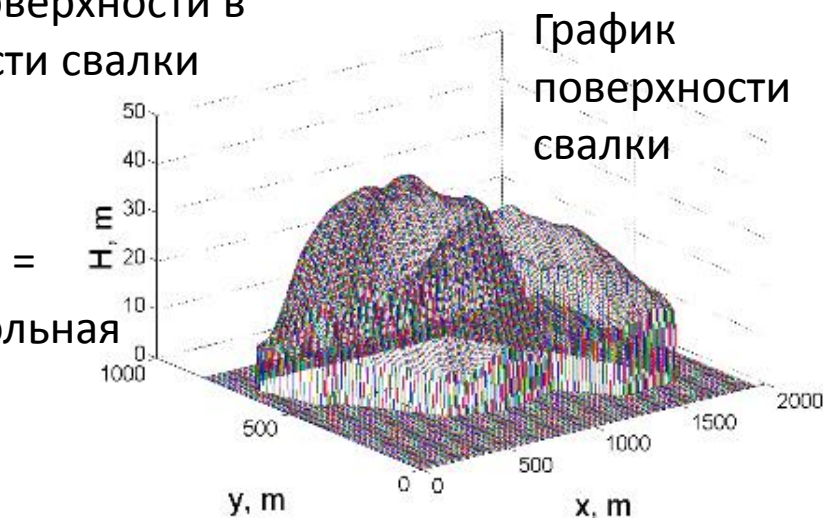
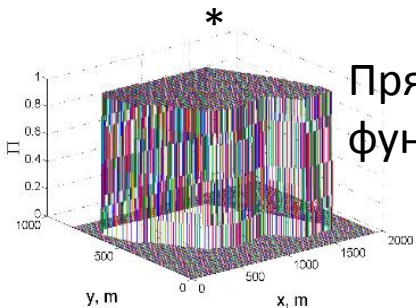
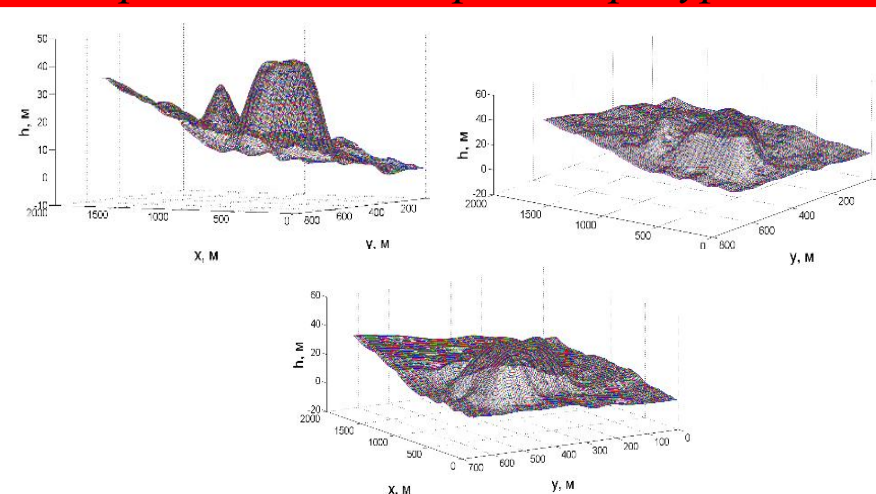


График поверхности свалки

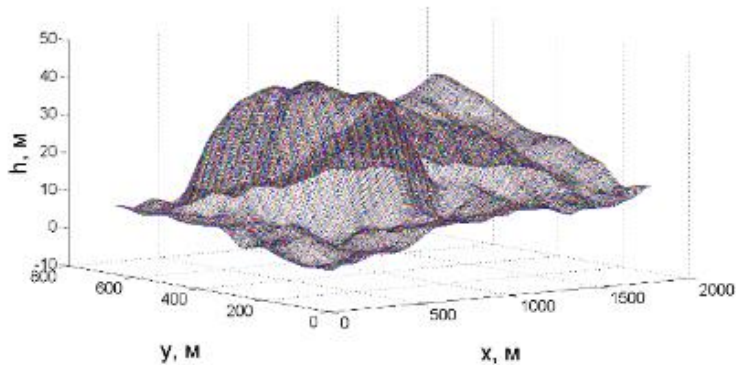


Прямоугольная функция

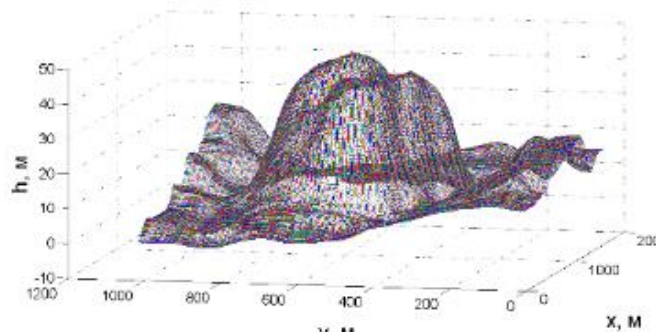
Изображения ОЗО с разных ракурсов



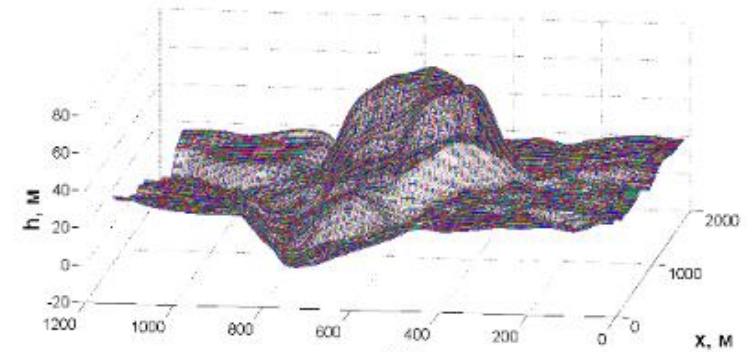
# Оценка пространственных параметров крупных свалок по результатам цифровой обработки



*Полигон ТБО Саларьево*



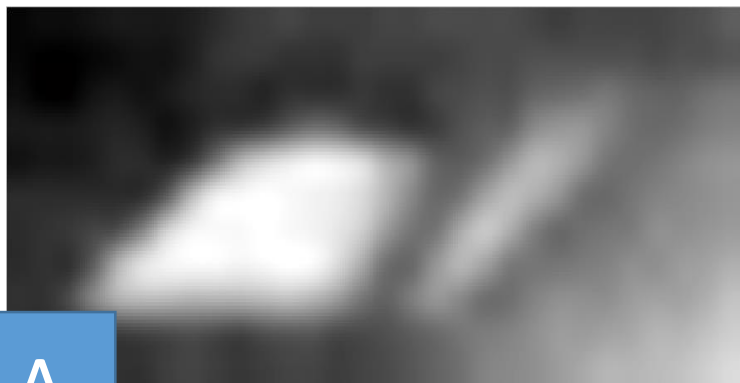
*Террикон фосфогипса Белая Гора*



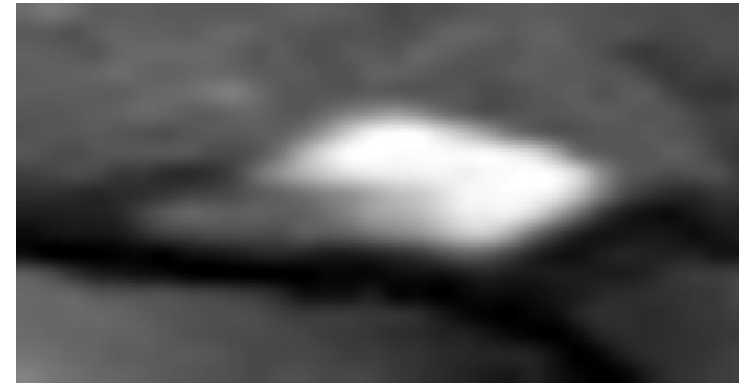
*Террикон фосфогипса Зелёная Гора*

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

# Светимость свалок на радарных снимках



А



Б



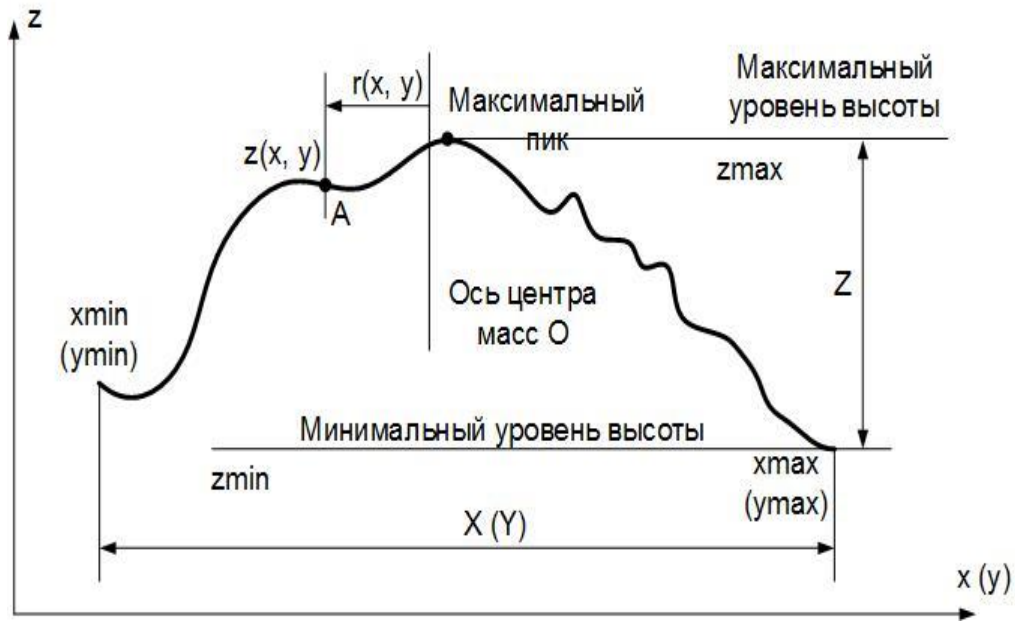
*Саларьево*

*Белая Гора*

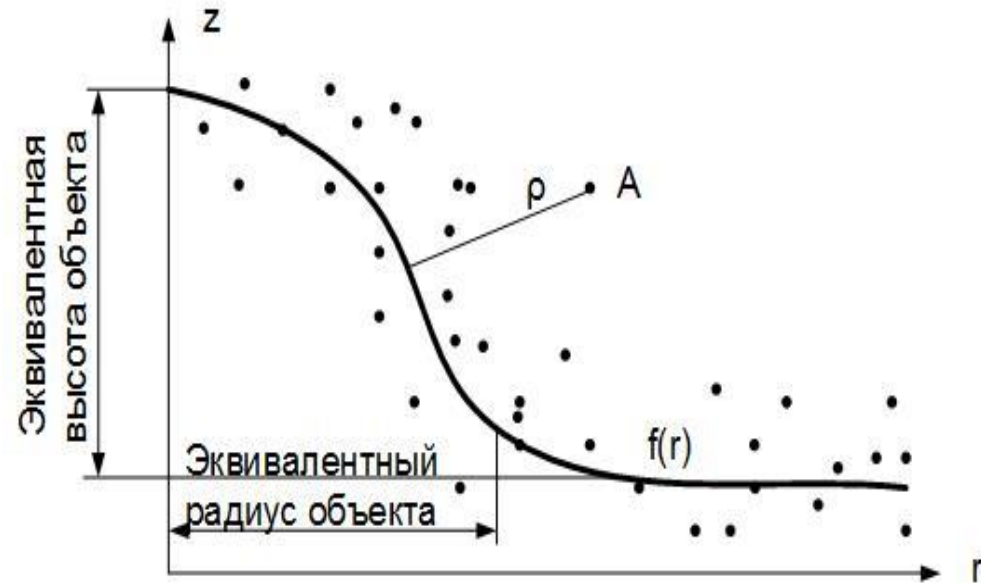
*Зелёная Гора*

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:

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

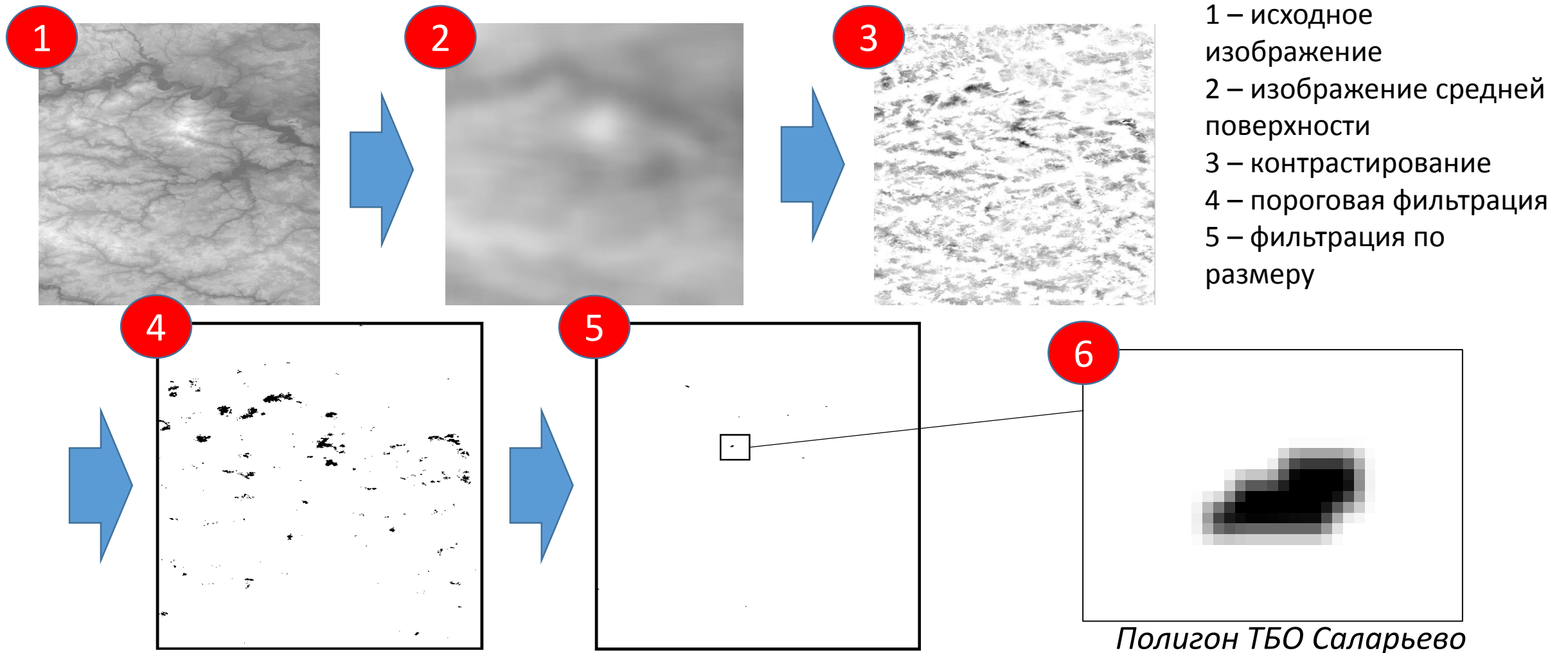
$$S \in [S_{\min}, S_{\max}]$$

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

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



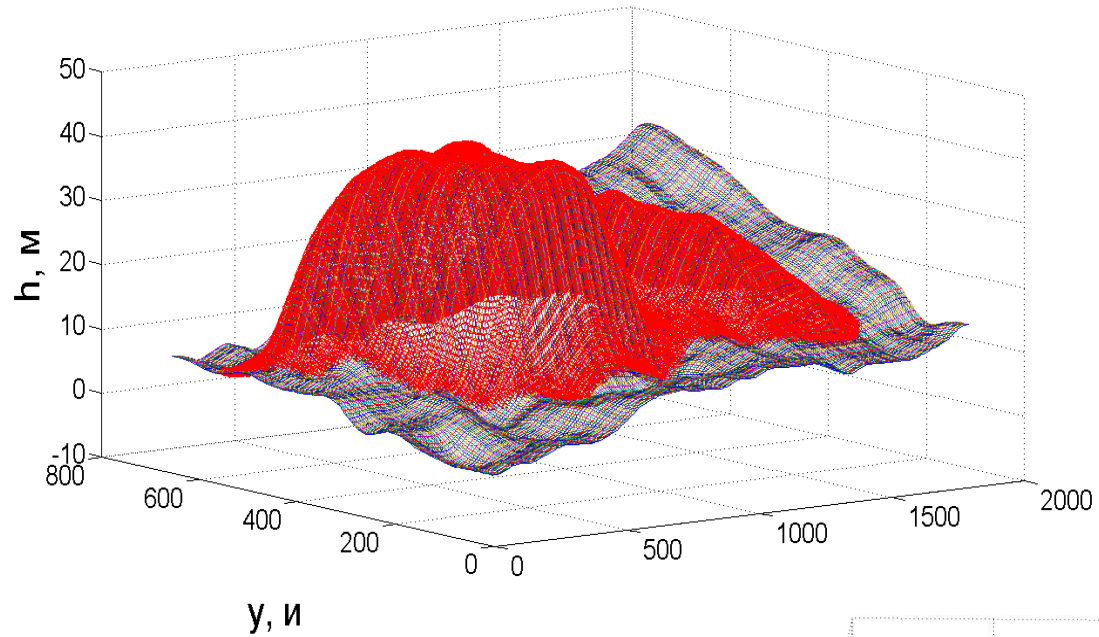
# Основные этапы обработки



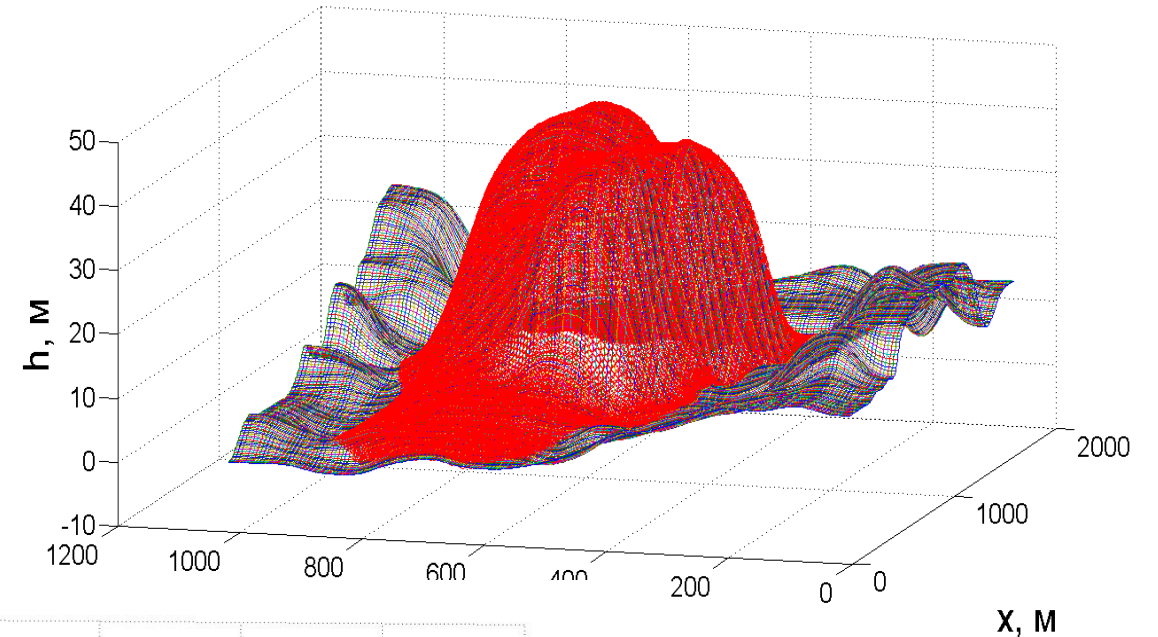
- 1 – исходное изображение
- 2 – изображение средней поверхности
- 3 – контрастирование
- 4 – пороговая фильтрация
- 5 – фильтрация по размеру

Полигон ТБО Саларьево

# Наложение областей детектирования на трёхмерную модель поверхности

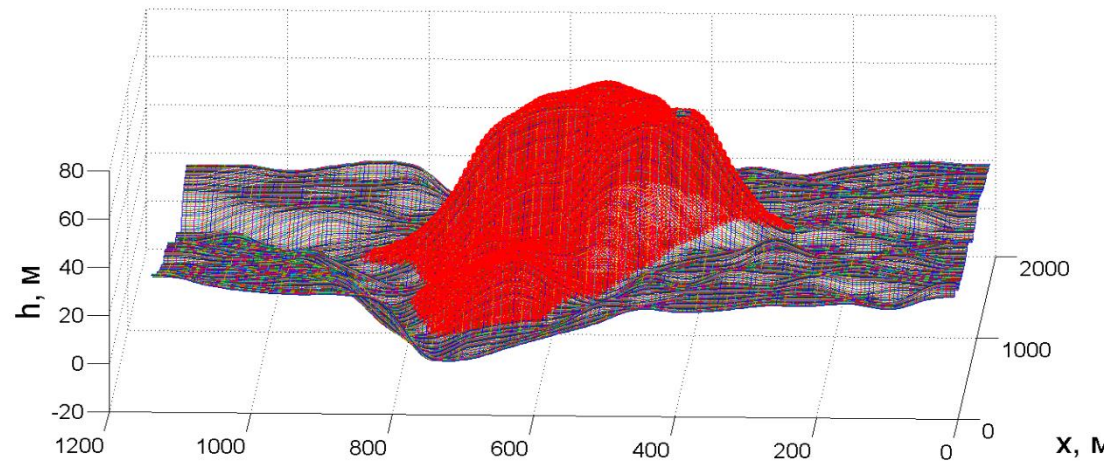


*Саларьево*



*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.