

Комплексный подход к зонированию дорог на основе морфологической обработки облаков точек, формируемых средствами дистанционного зондирования

Рихтер А.А., Мурынин А.Б.

urfin17@yandex.ru

Постановка задачи

Современные методы дистанционного зондирования, в частности воздушное и наземное лазерное сканирование, обеспечивают получение высокодетализированных трёхмерных данных о дорожной инфраструктуре. Однако практическое использование облаков точек, содержащих миллионы и миллиарды точек, сопряжено с трудностями: большие объёмы информации, наличие шумов, сложность выделения смысловых структур.

Одной из ключевых задач обработки является зонирование – разделение протяжённого объекта на функционально однородные участки, что необходимо для паспортизации дорог, оценки состояния покрытия, планирования ремонтных работ и построения цифровых двойников.

Предлагается комплексный подход к автоматизированному зонированию автомобильных дорог на основе классических методов цифровой обработки, включающий четыре основных этапа:

- растривание облака точек – преобразование облака точек в изображение с малым шагом ячейки для сохранения мелких деталей;
- тайлирование раstra – разбиение больших растровых полотен на фрагменты, приемлемые для вычислительных ресурсов;
- расчёт векторных компонент – для каждого тайла вычисляются осевые линии, границы полотна и обочин с использованием алгоритмов растровой и векторной морфологии, трассировки контуров и вычислительной геометрии;
- слияние векторных компонент — восстановление непрерывных линий дороги (ось, границы обочин) по швам между тайлами с последующим упрощением и сглаживанием геометрии.

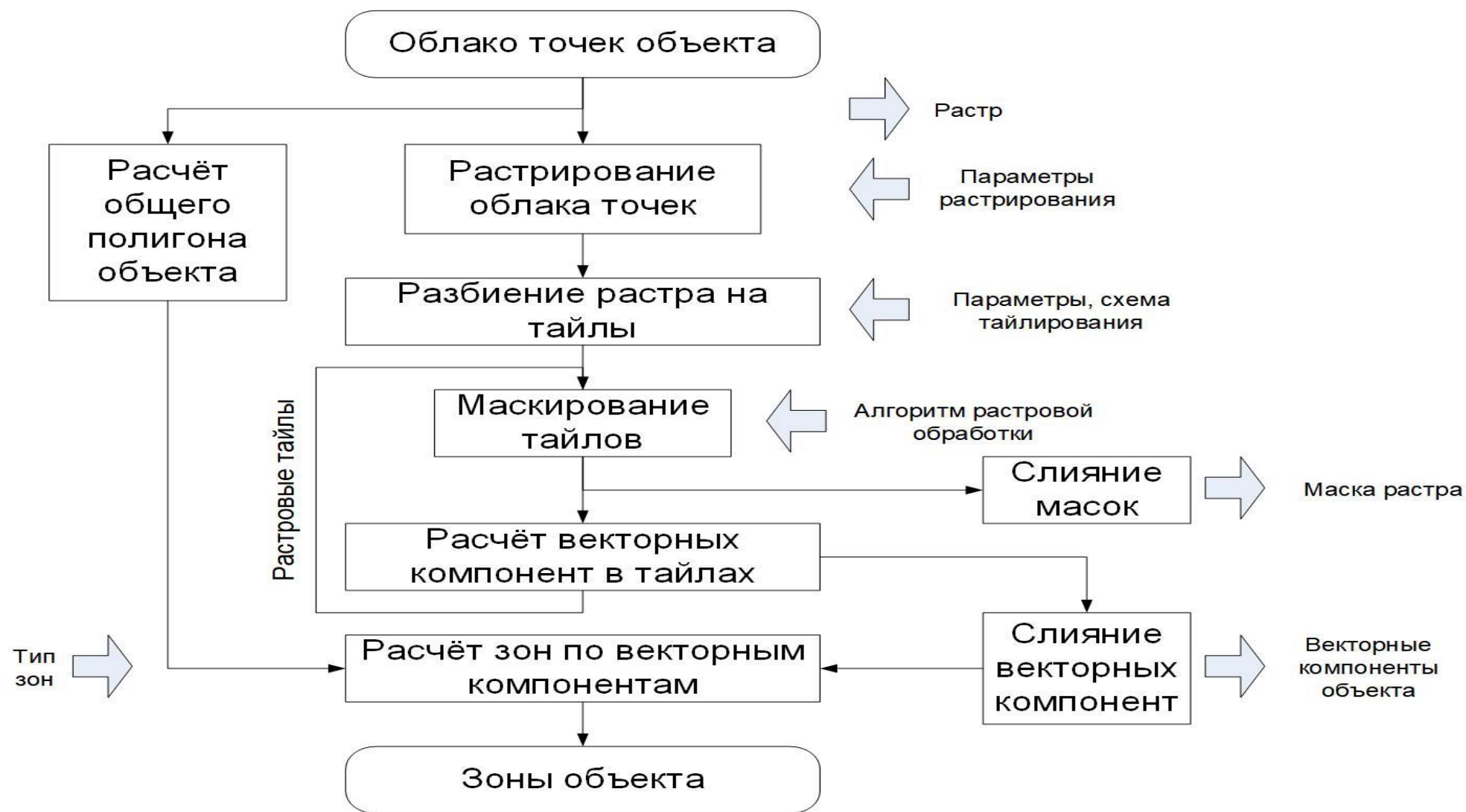
Зонирование объекта

Зонирование – представление пространства исследуемого структурно сложного объекта по данным лазерного сканирования в виде функциональных участков (зон) для последующего анализа.

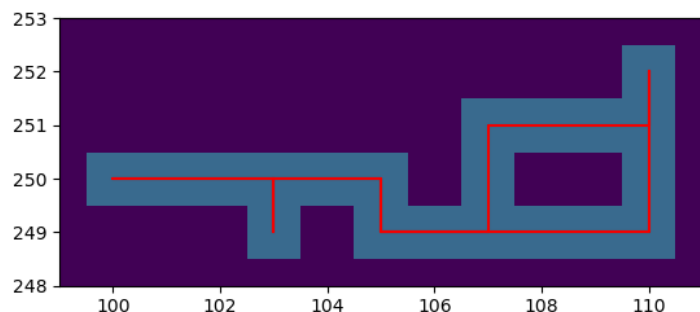
В зависимости от структуры объекта различаются типы его зон. В частности:

- здания имеют объёмно-планировочную структуру, для них характерны горизонтально и вертикально ориентированные зоны (горизонтальное и вертикальное зонирование);
- дороги имеют линейно-протяжённую структуру, для них характерны поперечно и продольно ориентированные зоны (поперечное и продольное зонирование).

Общая предлагаемая схема зонирования объекта по облаку точек



Векторная морфологическая обработка путей



- Связная компонента
- Путь (линия прослеживания контура связной компоненты)

Индексация точек пути:

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_n], F_j = \{i_1^j, i_2^j, \dots, i_{l_j}^j\}$$

F_j – множество номеров i_*^j точек пути с индексом j

l_j – число точек пути, имеющих индекс j

n – число разных точек пути, с разными индексами (размер контура)

Индексация сегментов пути:

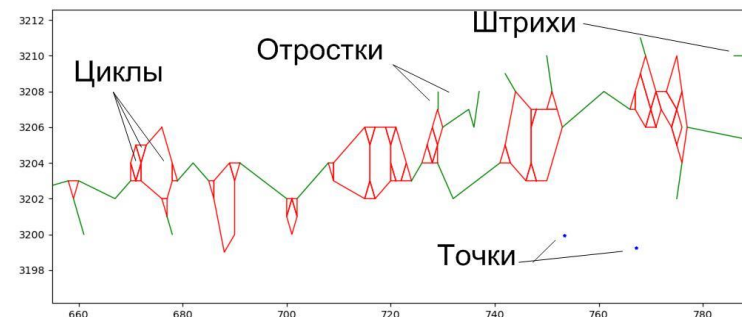
$$\hat{F} = [\hat{F}_1, \hat{F}_2, \dots, \hat{F}_{\hat{n}}], \hat{F}_{\hat{j}} = \{\hat{i}_1^{\hat{j}}, \hat{i}_2^{\hat{j}}, \dots, \hat{i}_{\hat{l}_{\hat{j}}}^{\hat{j}}\},$$

$\hat{F}_{\hat{j}}$ – множество номеров $\hat{i}_*^{\hat{j}}$ сегментов пути с индексом $\hat{j}$

$\hat{l}_{\hat{j}}$ – число сегментов пути, имеющих индекс $\hat{j}$

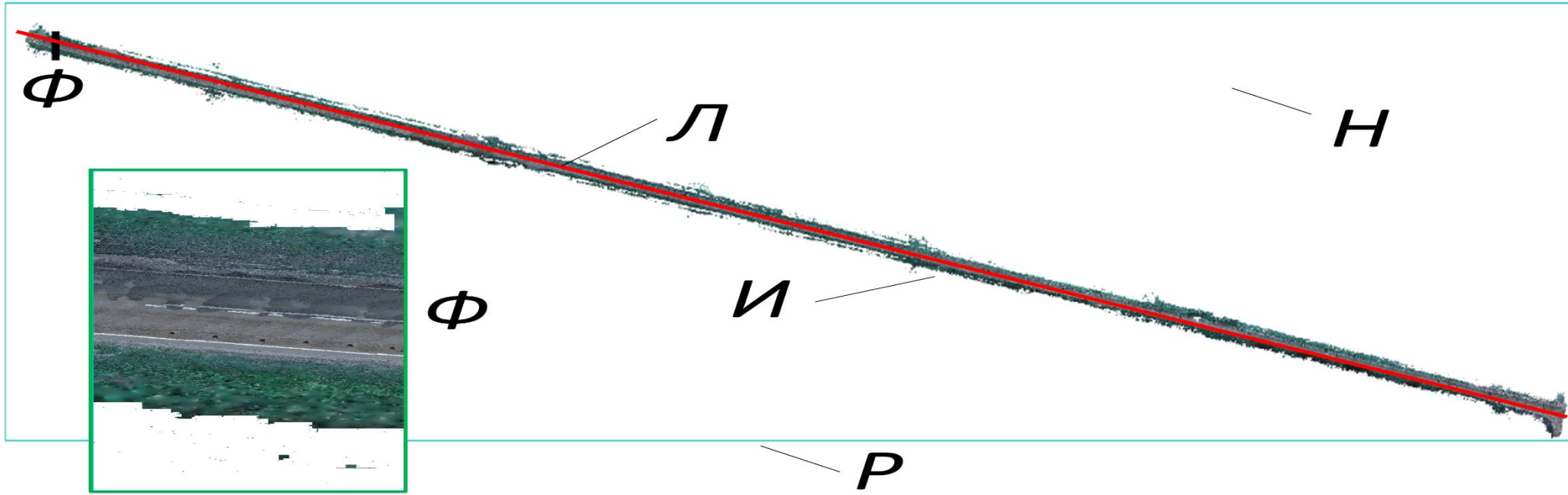
$\hat{n}$ – число разных сегментов пути, с разными индексами

Ключевые точки пути – точки пути, характеризующие структуру контура.



Основные виды векторного шума

Растрирование облака точек



Пример растривания облака точек автомобильной дороги

Р – растр, полученный из облака точек

И – информативная часть растра, ориентированная вдоль воображаемой линии *Л*

Н – неинформативная часть растра

Φ – фрагмент растра (в информативной части)

Представление тайлирования

$$I' = \bar{f} \circ F \circ f(I, e) \approx F(I)$$

« $\circ$ » – операция суперпозиции;

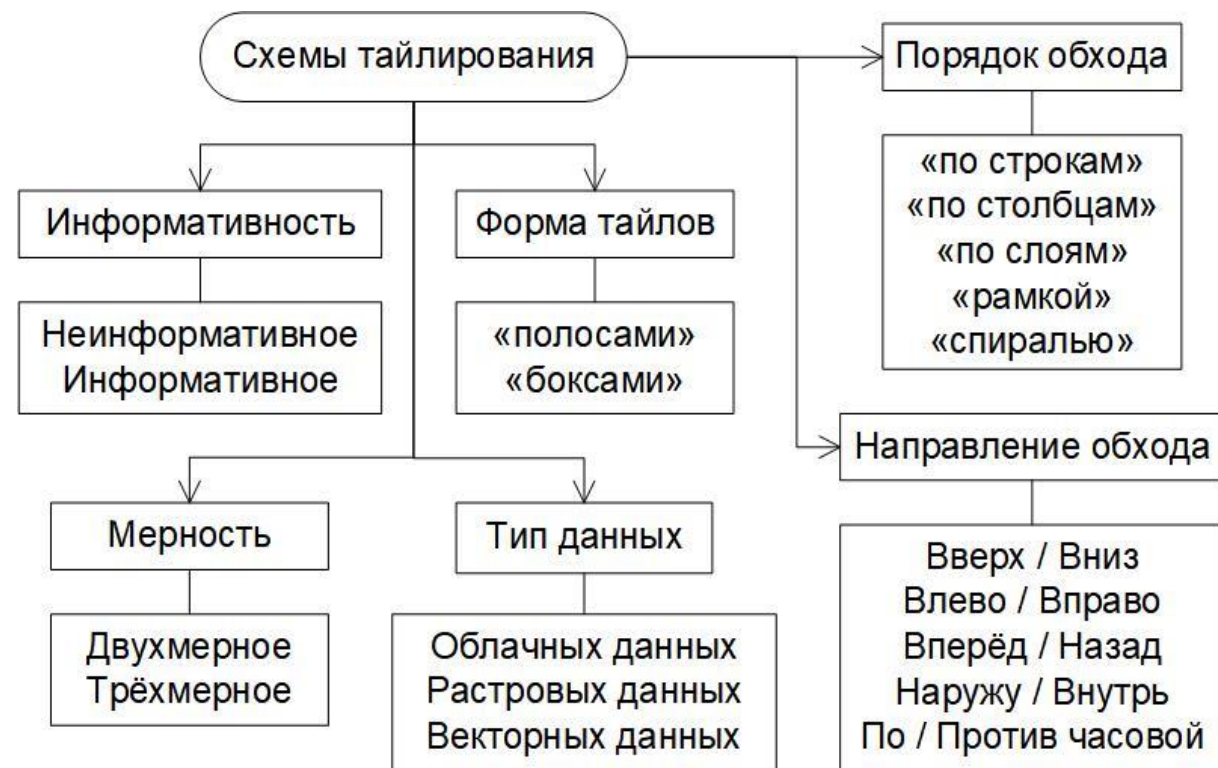
I и I' – исходные и результирующие данные целиком;

e – параметры тайлирования (s_1, s_2 – размеры данных, t_1, t_2 – размеры основных тайлов, x_{01}, x_{02} – координаты нулевого тайла, r – траектория движения по тайлам).

f – алгоритм разбиения I на упорядоченное множество $[I_i]$ тайлов I_i : $[I_i] = f(I, e)$;

F – алгоритм обработки (растровой, векторной или облачной), например, алгоритмы кластеризации с определёнными значениями гиперпараметров. Выполняется над каждым тайлом I_i : $T_i = F(I_i)$, где T_i – результат обработки тайла I_i алгоритмом F (T_i – обработанные тайлы);

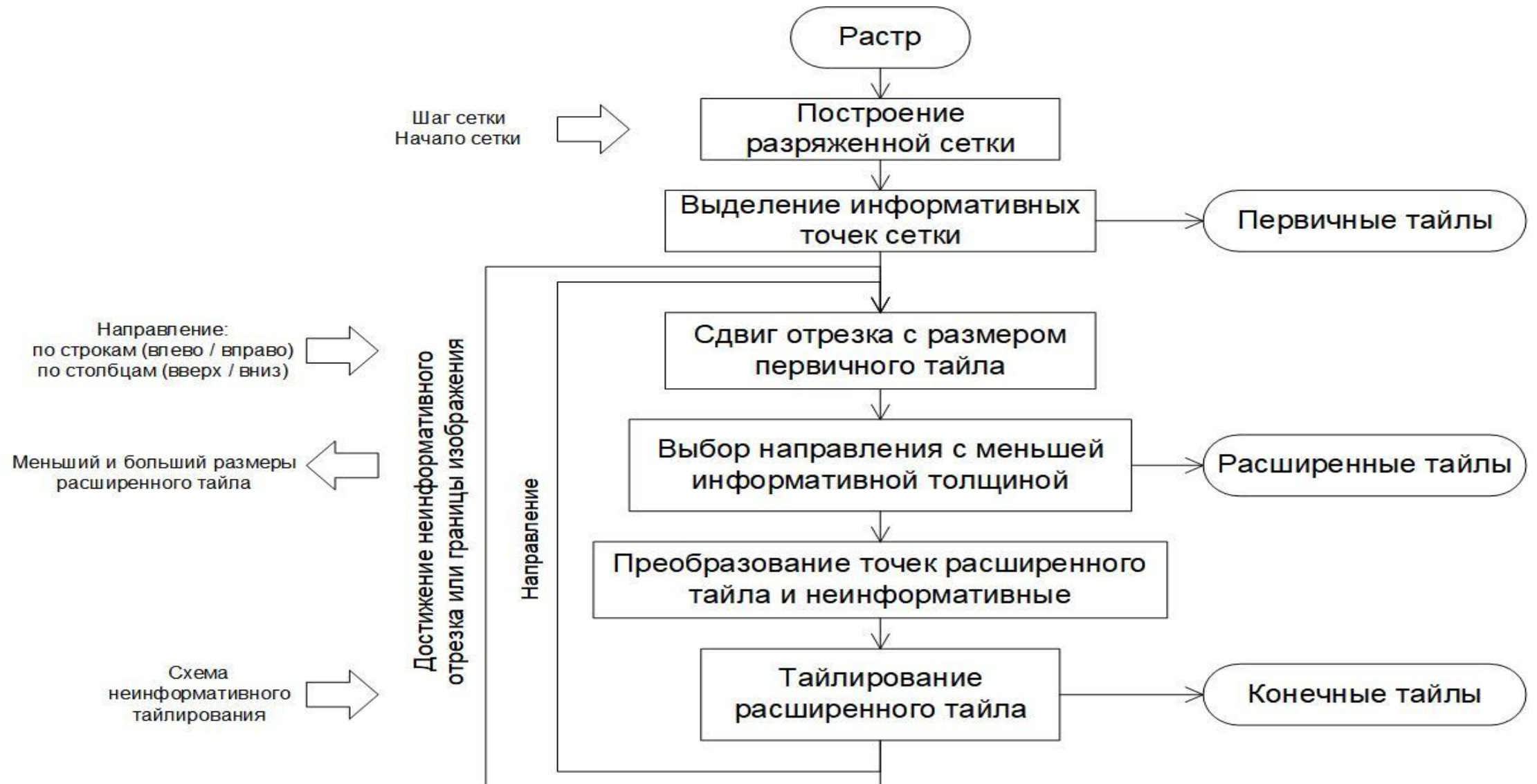
$\bar{f}$ – алгоритм слияния упорядоченного множества $[T_i]$ обработанных тайлов T_i для получения I' : $I' = \bar{f}([T_i])$.



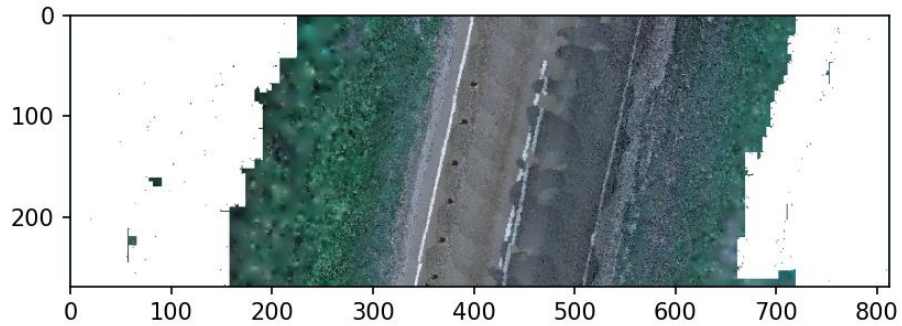
Свойства движения по тайлам:

- непрерывность – для обеспечения пространственного соседства соседних по расчётам тайлов;
- возвратность – для возможности восстановления предыдущих тайлов по последующим и их слияниям.

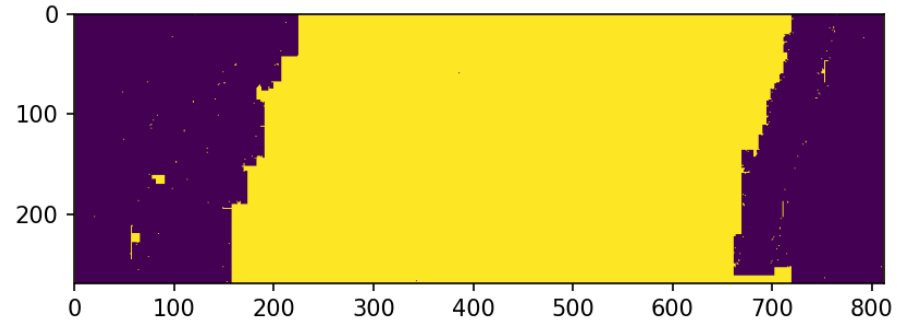
Схема информативного тайлирования



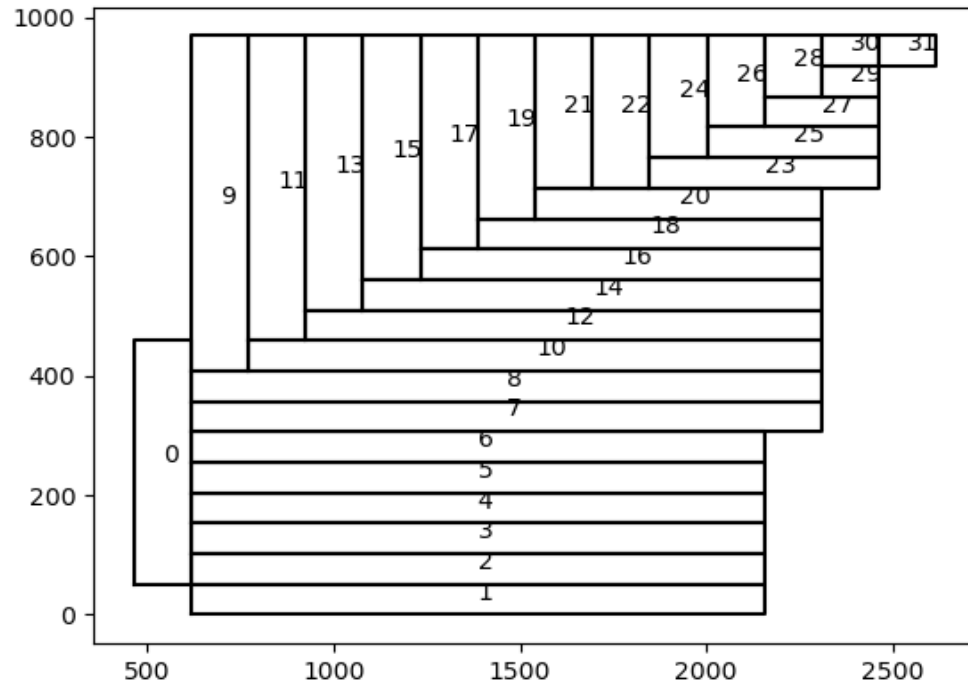
Пример информативного тайлирования



Исходное изображение тайла



Информативная часть изображения



Расширенные тайлы



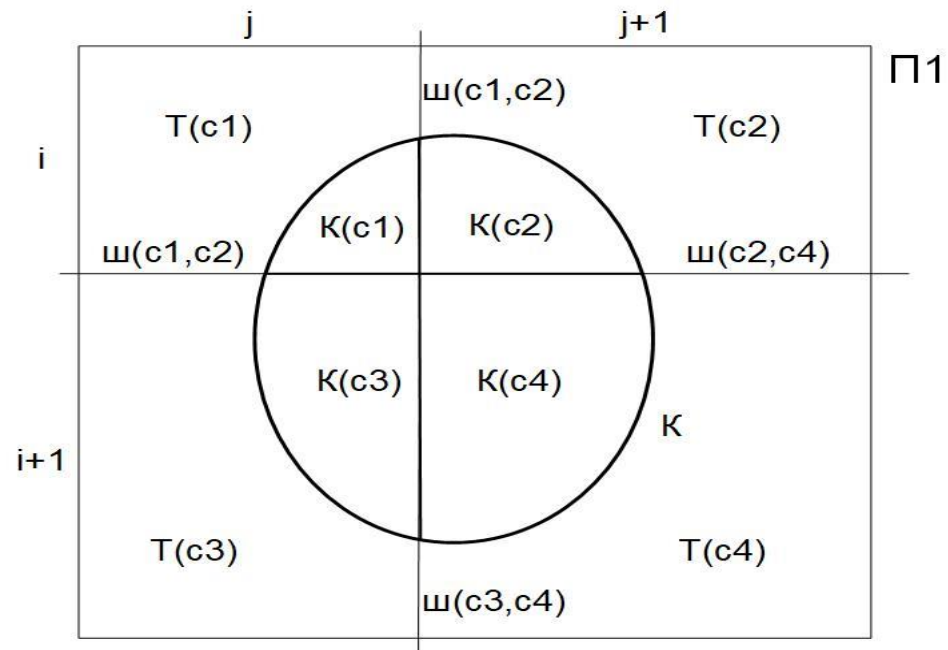
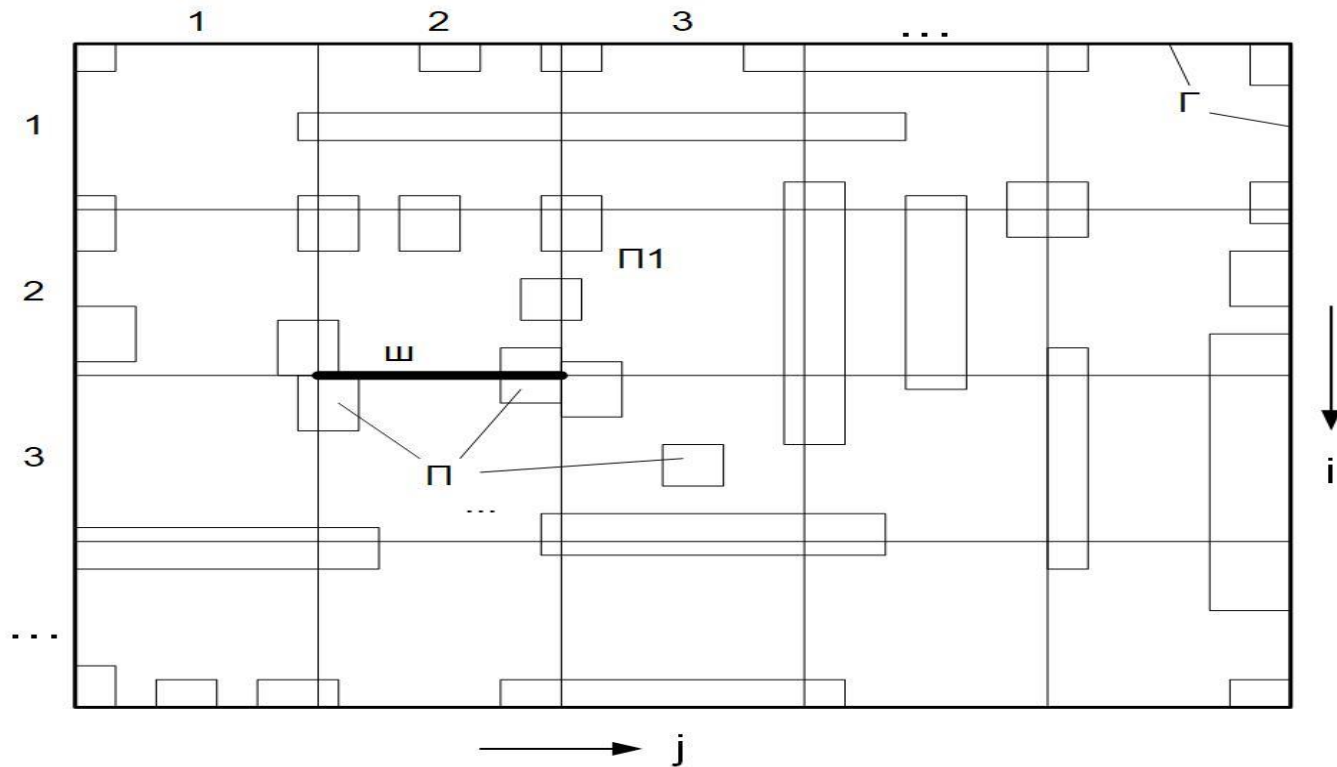
8	9
6	7
4	5
2	3
0	1

Конечные тайлы для
расширенного тайла 0



Конечные тайлы

Слияние тайлов



Пример положения (Π_1)

Π - типовые межтайловые положения связных компонент

Γ – границы изображения

ш – швы

$c_k \in C(\Pi)$ – координаты тайлов

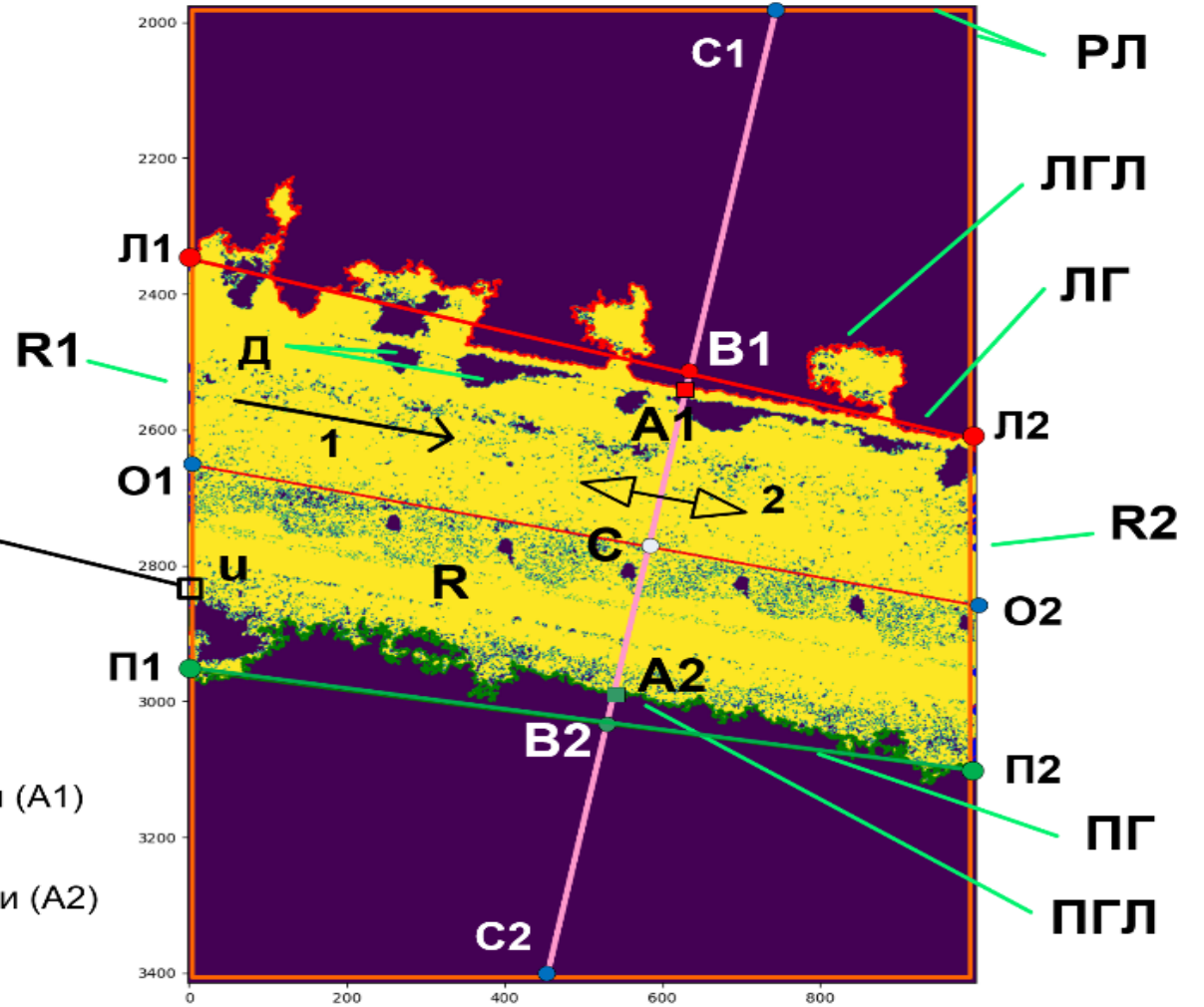
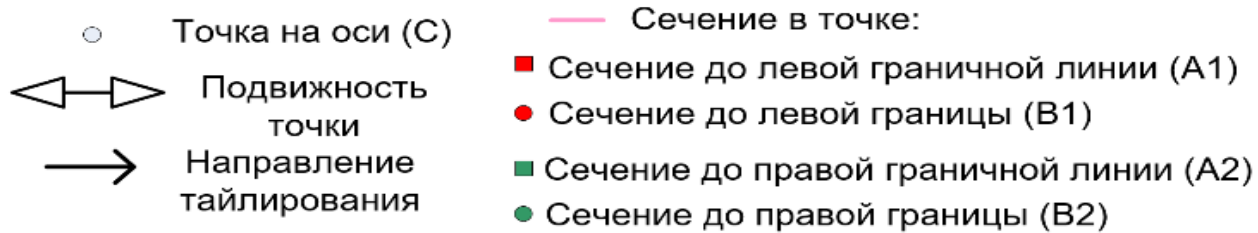
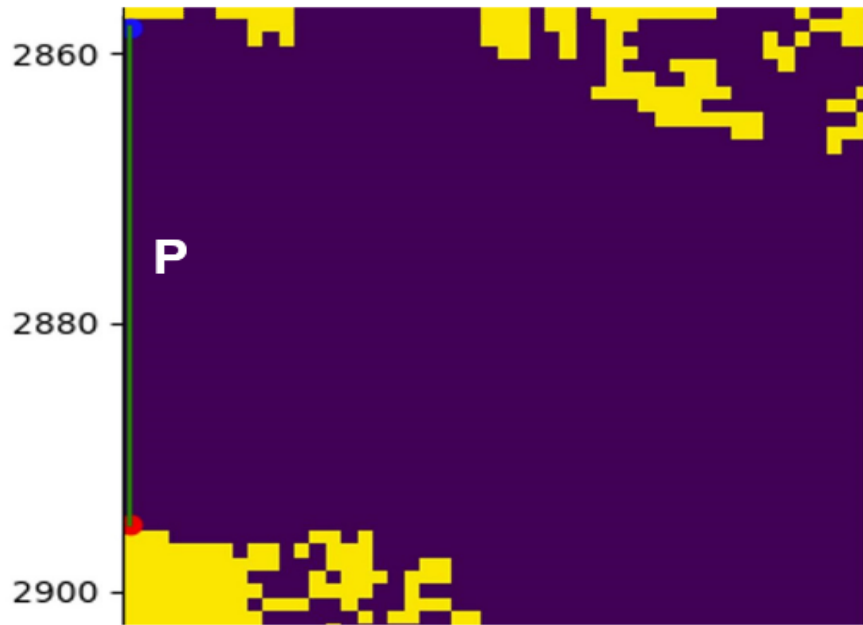
i, j – координаты тайлов

$K(c_k)$ - части связной компоненты K

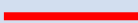
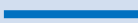
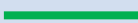
В положениях $\Pi_1(i, j)$: $C(\Pi) = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$

Часть	Координаты	Пересекает швы
$K(c_1)$	$c_1 = (i, j)$	$\text{ш}(c_1, c_2), \text{ш}(c_1, c_3)$
$K(c_2)$	$c_2 = (i, j + 1)$	$\text{ш}(c_2, c_1), \text{ш}(c_2, c_4)$
$K(c_3)$	$c_3 = (i + 1, j)$	швы $\text{ш}(c_3, c_1), \text{ш}(c_3, c_4)$
$K(c_4)$	$c_4 = (i + 1, j + 1)$	швы $\text{ш}(c_4, c_1), \text{ш}(c_4, c_3)$

Виды векторных компонент дороги на растровых тайлах



Слияние векторных компонент

Граничная линия дороги	Обозначение	Слияние линий
Левый край обочины	l_1	ЛГЛ 
Левая граница полотна дороги	l_2	ЛГ
Осевая линия дороги	l_3	ОЛ 
Правая граница полотна дороги	l_4	ПГ
Правый край обочины	l_5	ПГЛ 

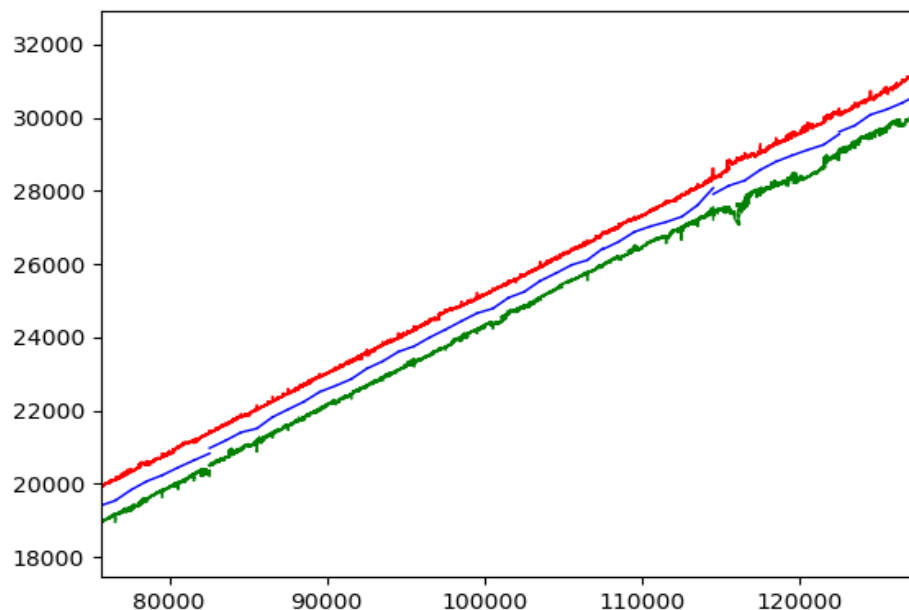
ЛГЛ – левая граничная линия: отрезок, проходящий через точки Л1 и Л2

ЛГ – левая граница: меньшая часть пути контура R растровой области тайла, соединяющая точки Л1 и Л2

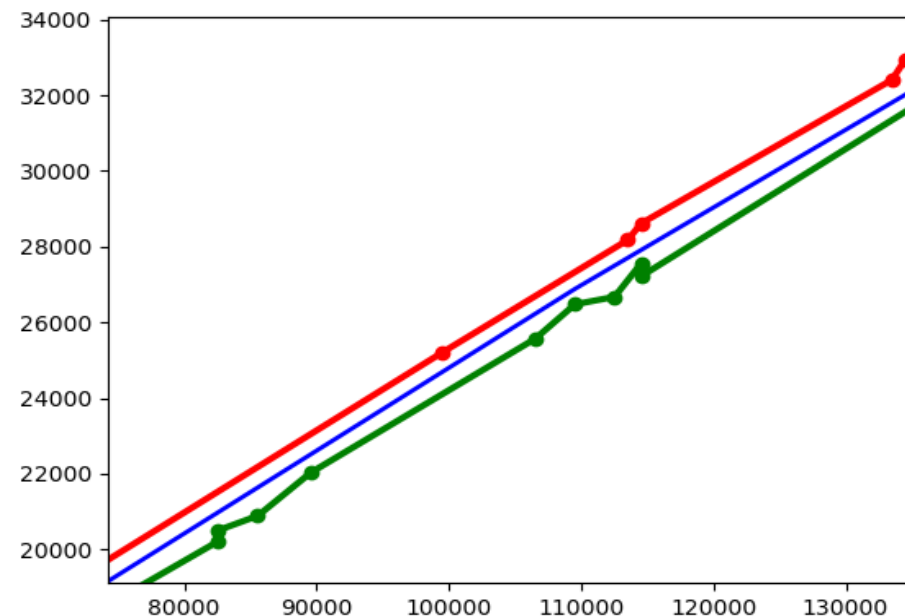
ОЛ = $[O1, O2]$ – осевая линия: отрезок, проходящий через точки О1 и О2 (составляет осевую линию дороги);

ПГ – левая граница: меньшая часть пути контура R растровой области тайла, соединяющая точки П1 и П2

ПГЛ – правая граничная линия: отрезок, проходящий через точки П1 и П2

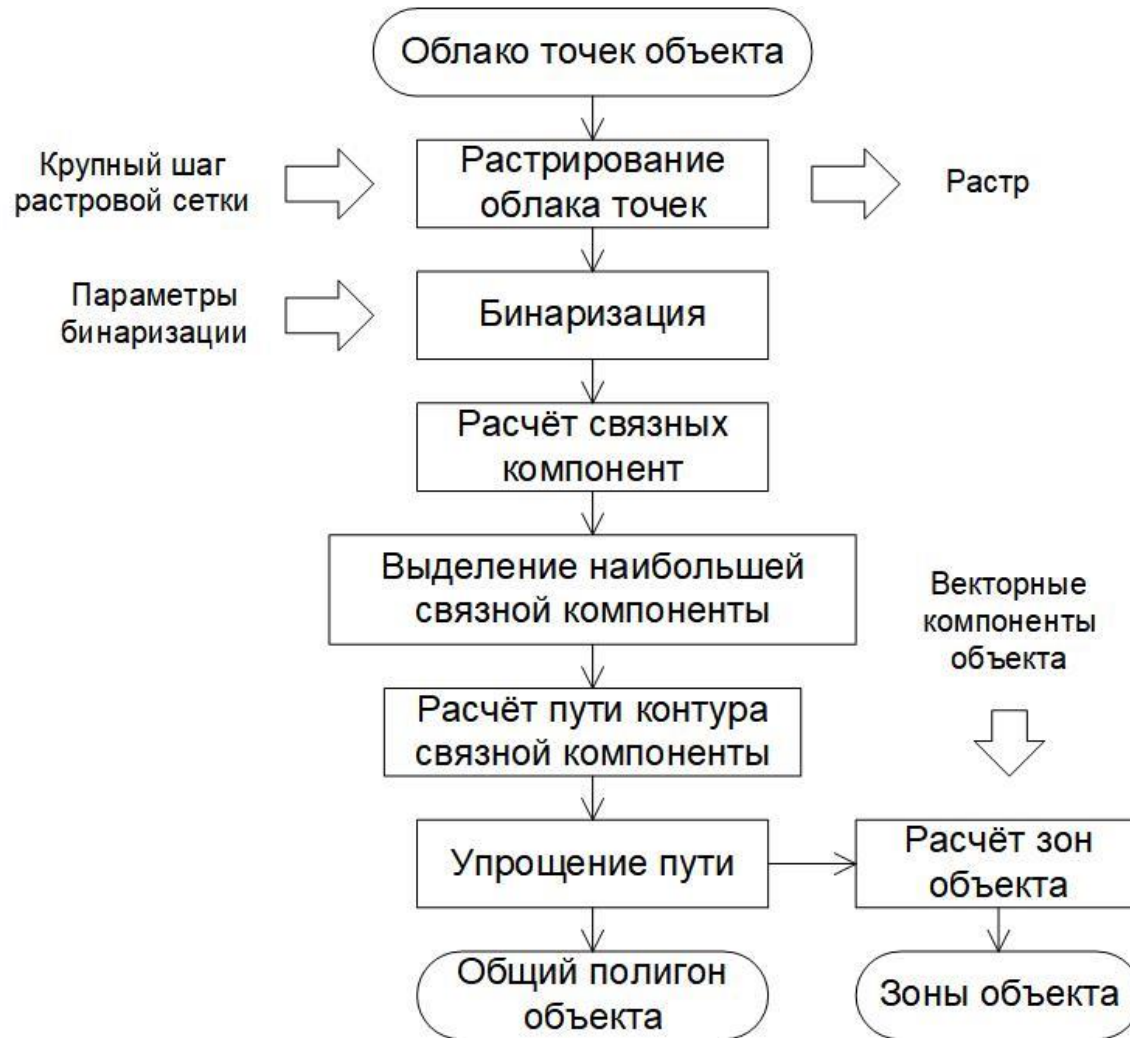


До упрощения

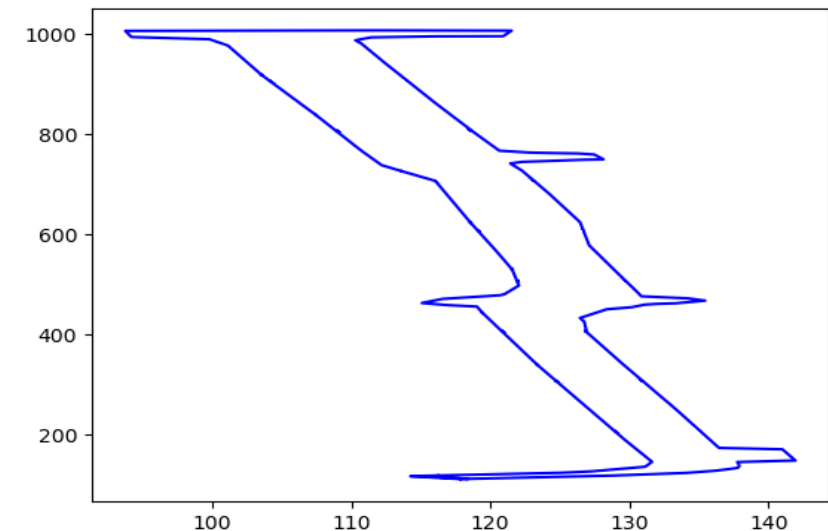


После упрощения

Расчёт общего полигона объекта по облаку точек

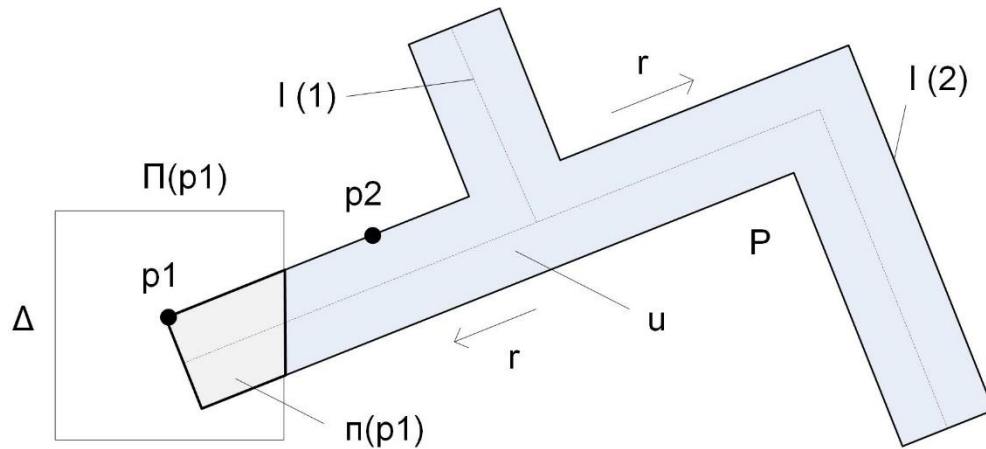


Исходное облако точек



Общий полигон дороги

Поперечное зонирование



Линейно-протяжённый объект

$$u := u - \Pi(p), p(p) = \max(u * \Pi(p))$$

u – область общего полигона P

$\Pi(p)$ – окно обрезки со стороной Δ

p – текущая точка (центр окна)

l и r – линия перемещения точки

«-» – операция вычитания множеств,

«*» – операция пересечения множеств

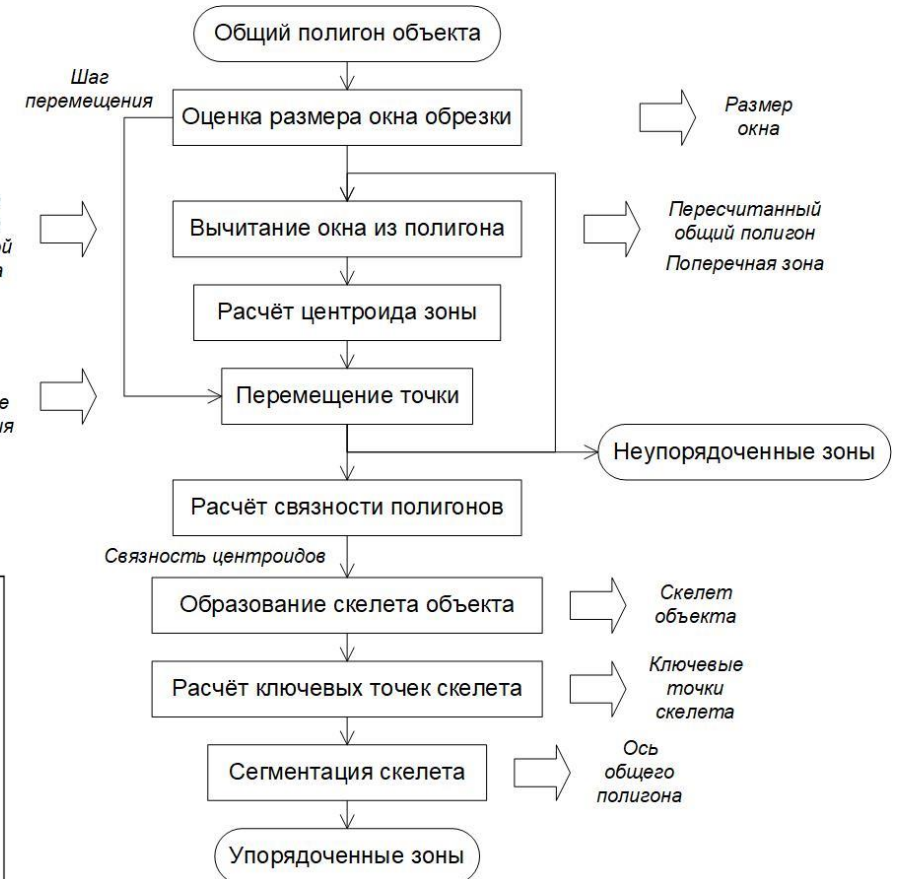
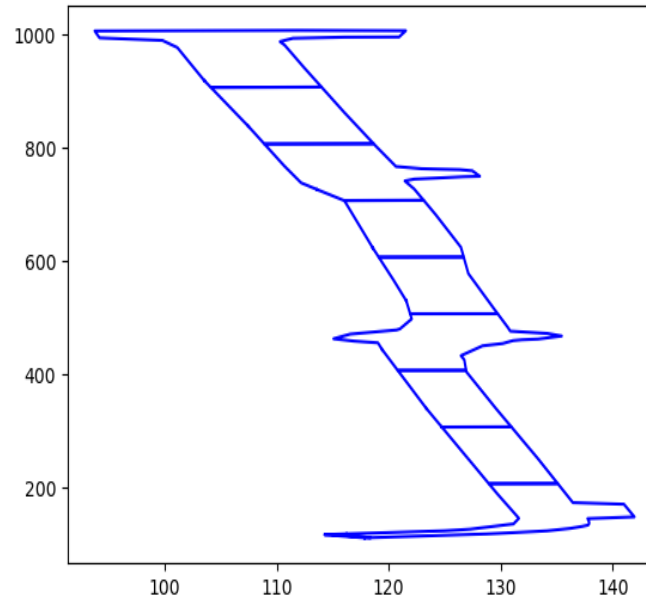
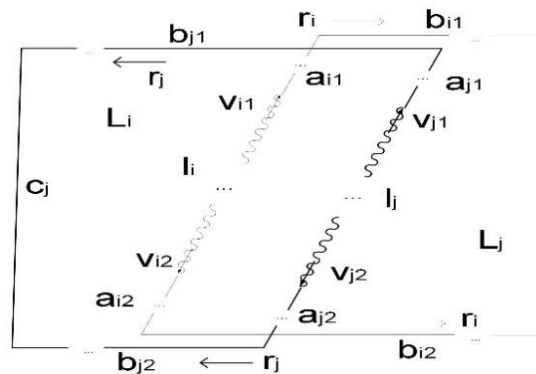


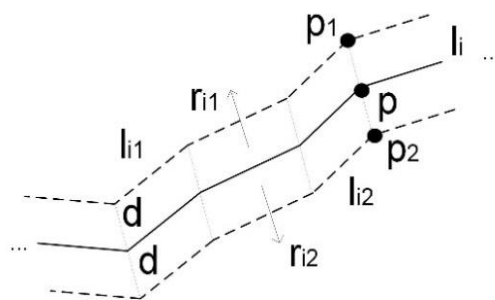
Схема расчёта поперечных зон

Поперечные зоны общего полигона дороги

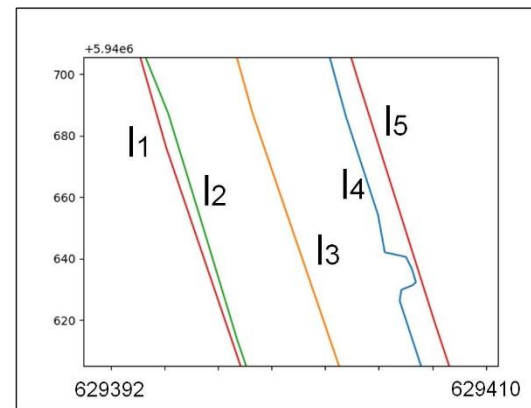
Продольное зонирование



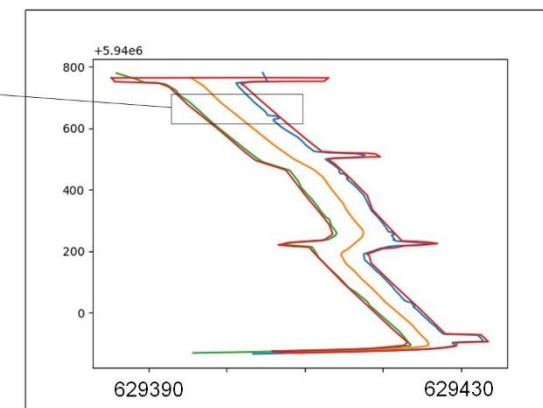
Построение
полигональных дополнений



Построение
офсетных линий



Граничные линии дороги



$$U_{i,j} = L_i * L_j * P, L_i, L_j = E(l_i, l_j), l_{i1}, l_{i2} = O(l_i),$$

$U_{i,j}$ – полигональная область дороги между граничными линиями l_i и l_j

E – операция расчёта полигональных дополнений L_i и L_j линий l_i и l_j

O – операция расчёта офсетных линий l_{i1} и l_{i2} линии l_i .

Продольно ориентированные зоны:

$U_{1,2}$ – зона левой обочины

$U_{2,3}$ – зона левой полосы движения

$U_{3,4}$ – зона правой полосы движения

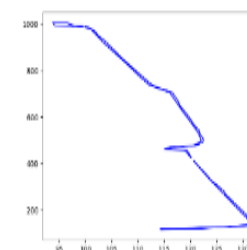
$U_{4,5}$ – зона правой обочины

$U_{31,32}$ – центральная зона

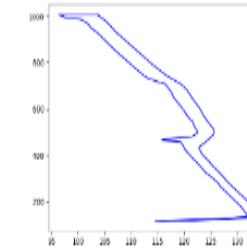
$$l_{31}, l_{32} = O(l_3)$$

$$U_{2,3} := U_{2,3} - U_{31,32}$$

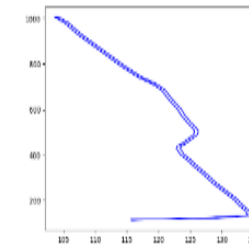
$$U_{3,4} := U_{3,4} - U_{31,32}$$



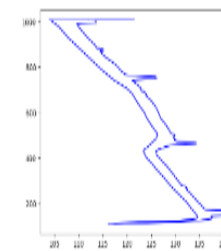
$U_{1,2}$



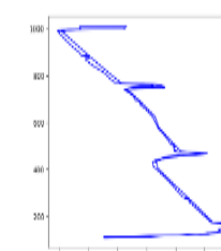
$U_{2,3}$



$U_{31,32}$



$U_{3,4}$



$U_{4,5}$

Продольные
зоны общего
полигона дороги

Выводы

В работе предложен комплексный метод автоматизированного зонирования автомобильных дорог по данным лазерного сканирования.

1. Создана схема зонирования, которая объединяет несколько этапов: преобразование облака точек в растр, разбиение на фрагменты для работы с большими объёмами данных, вычисление векторных компонент (осевых линий, границ полотна и обочин) и формирование поперечных и продольных зон.
2. Предложены схемы тайлирования, включая информативный подход, при котором обработке подвергаются только участки, несущие значимую информацию.
3. Для расчёта граничных линий дороги проводится расчёт и слияние участков данных линий и других векторных компонент в тайлах, на базе методов растровой и векторной морфологической обработки
4. Описаны методы поперечного и продольного зонирования. Поперечное зонирование разбивает дорогу на пикеты (участки) вдоль направления движения, что необходимо для привязки измерений и событий. Продольное зонирование выделяет функциональные полосы (левая и правая полосы, обочины, разделительная зона), что критически важно для анализа состояния покрытия в разрезе отдельных полос.