

# Морфологический анализ границ экологических объектов на спутниковых изображениях при машинном обучении алгоритмов сегментации

**Воробьев В.Е. (а), Мурынин А.Б. (а, в, г), Рихтер А.А. (а, б, г)**

<sup>(а)</sup> Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", г. Москва

<sup>(б)</sup> Акционерное общество «Тазмар АйТи-солюшнз», г. Санкт-Петербург

<sup>(в)</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН

<sup>(г)</sup> Государственный университет по землеустройству, Москва, РФ

[urfin17@yandex.ru](mailto:urfin17@yandex.ru)

Докладчик – Рихтер Андрей

# Постановка задачи

- При космическом мониторинге экологических объектов первостепенной задачей является сегментация изображений для выделения объектов интереса. Для решения этой задачи с помощью машинного обучения важно выбрать способ подготовки обучающих данных с учетом огромной площади импактных районов и разнообразия экологических классов.
- Предлагается метод ускорения подготовки обучающей выборки на основе кластеризации областей на изображениях и векторизации границ.

# Методы кластеризации

Одним из наиболее популярных методов кластеризации является k-means.

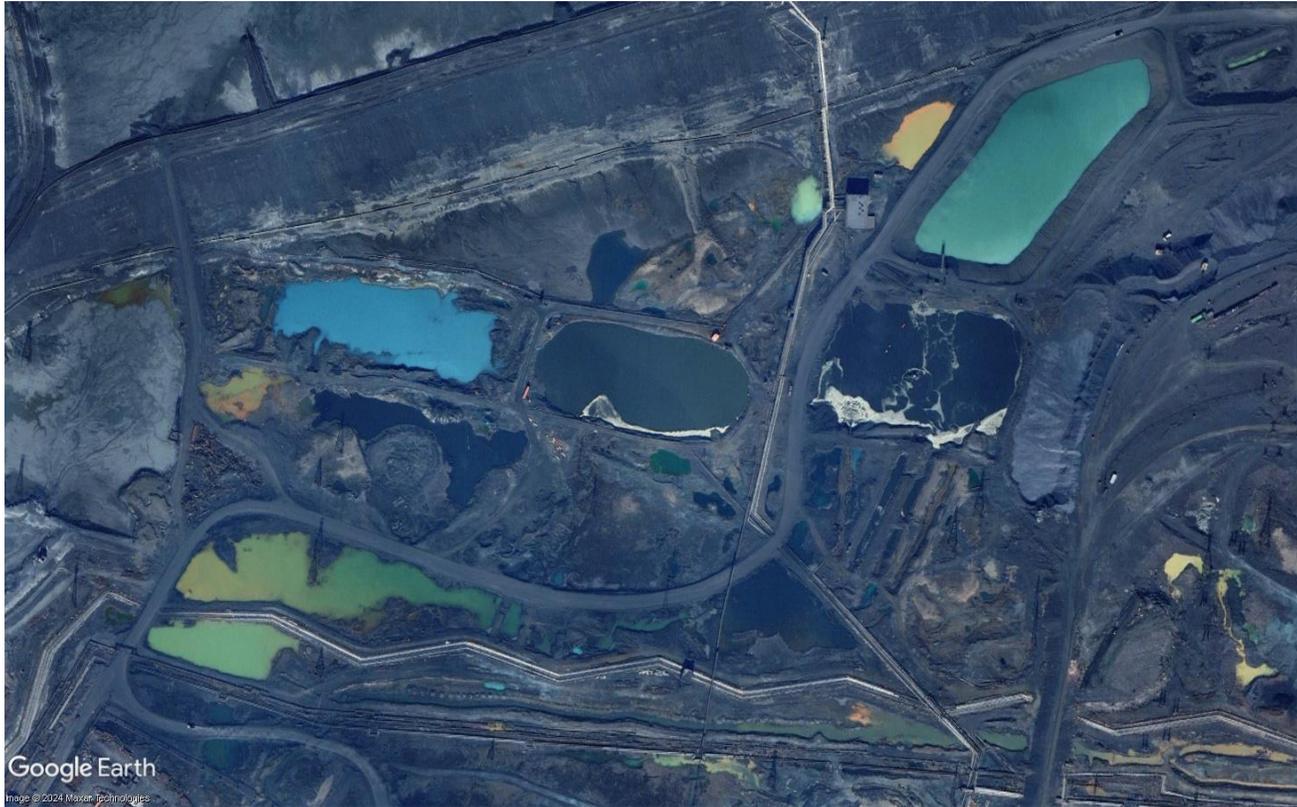
- Преимущества метода: 1) прост в реализации и понимании; 2) высокая скорость работы и точность на данных сферической формы; 3) наличие большого числа модификаций.
- Недостатки метода: 1) задание числа кластеров, начальных точек кластеров; 2) сходится к локальным максимумам, что даёт несколько разные результаты кластеризации каждый раз при постоянном числе кластеров; 3) кластеризуются сфероподобные области (области более сложных форм кластеризуются значительно хуже); 4) в целом не учитывает плотность данных и неоднородность кластера.

Разные методы кластеризации могут иметь иерархические расширения.

Методы, основанные на связности:

- Преимущества методов: 1) способность обнаружения кластеров произвольной формы; 2) работоспособность с различными паттернами данных; 3) возможность формирования информативной иерархии кластеров для лучшего понимания структуры данных; 4) возможность получения оптимальной кластеризации; 5) производит значительно меньше шума.
- Недостатки методов: 1) использование большого количества вычислительных ресурсов и памяти из-за работы со всей матрицей расстояний между объектами; 2) чувствительность к выбору критерия объединения кластеров и неустойчивость к шуму и выбросам, что может сильно исказить иерархию кластеров.

# Кластеризация экологических объектов



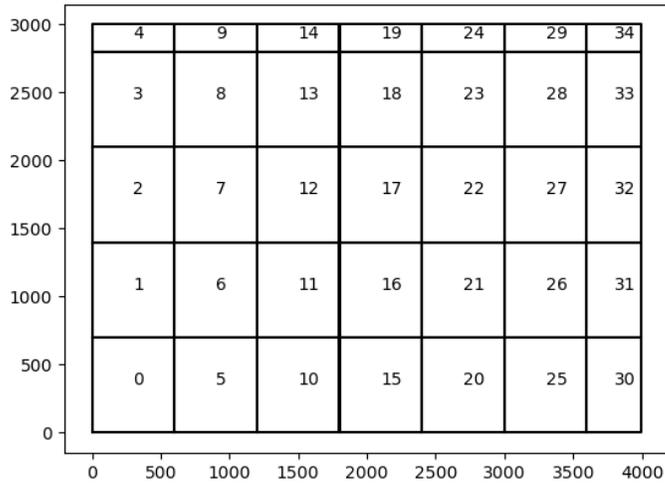
*г. Норильск, у подножья хвостохранилища Лебязье*

При кластеризации экологических объектов на аэрокосмических изображениях учёт их структуры является одним из наиболее важных условий выбора метода кластеризации. Большинство неиерархических методов либо ограничены в кластеризуемых структурных паттернах, либо имеют сложный алгоритм реализации. В частности, k-means работает лучше всего, когда кластеры: «круглые» или сферические; одинакового размера; одинаковой плотности; имеют самую высокую плотность в центре сферы; не загрязнены шумом/выбросами. Иерархические методы практически лишены данных недостатков. Однако с ростом размера кластеризуемых данных экспоненциально растёт размер кластерного дерева, что не позволяет «напрямую» использовать данные методы при обработке данных больших размеров. В этом случае целесообразно подобрать способы тайлирования данных для их параллельной обработки.

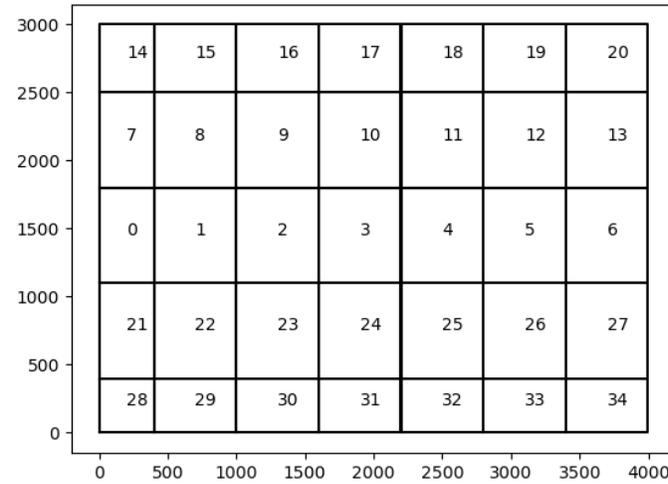
# Общая схема кластеризации изображений



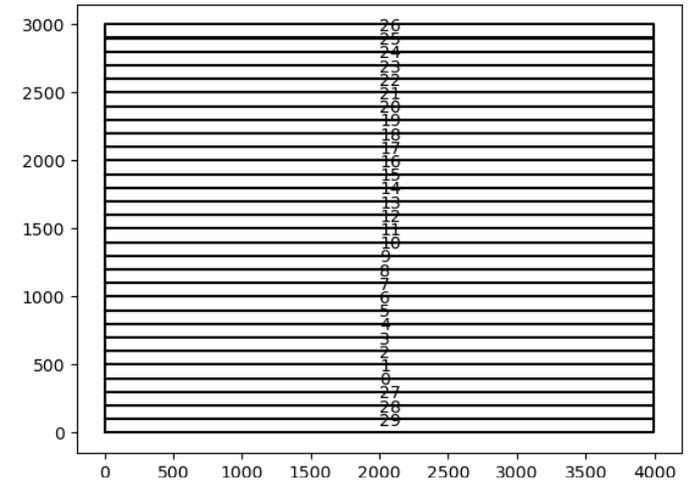
# Примеры схем тайлирования



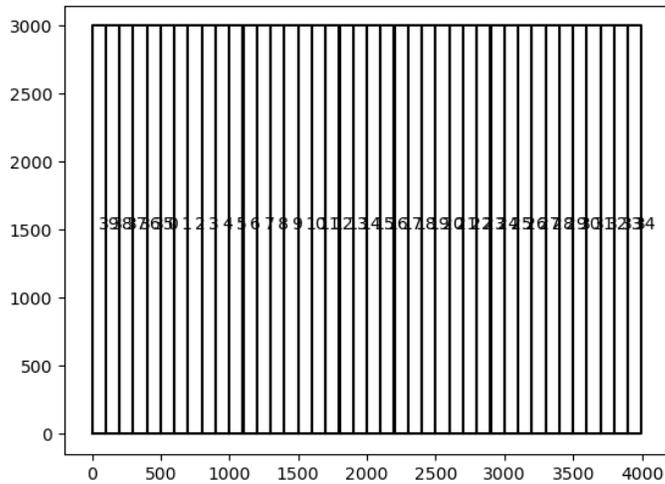
1. Прямоугольники по вертикали



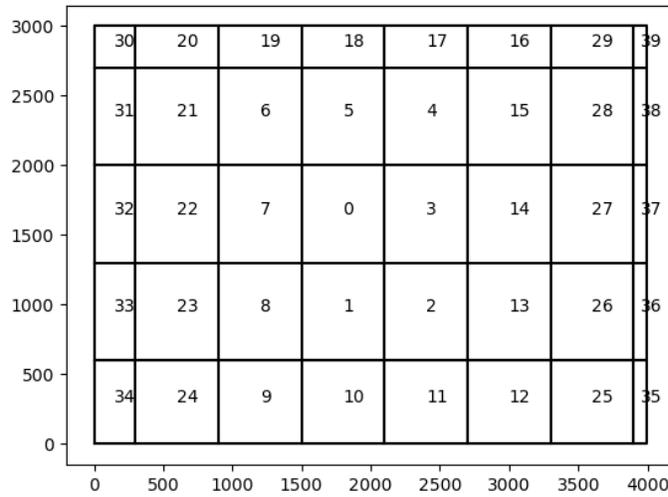
2. Прямоугольники по горизонтали



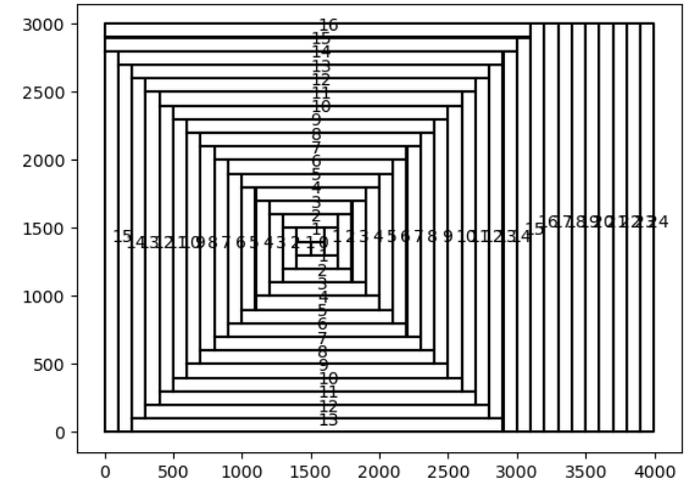
3. Полосы по горизонтали



4. Полосы по вертикали



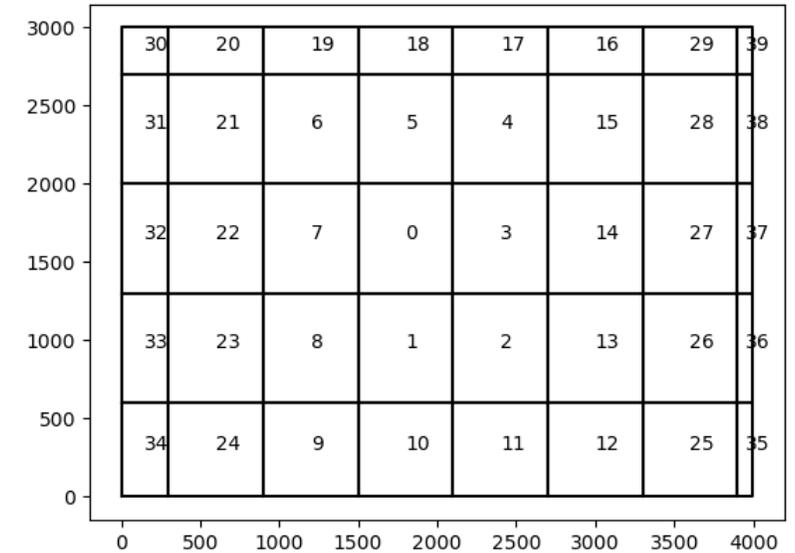
5. Спираль



6. Рамка

# Примеры схем тайлирования

№	sx	sy	tx	ty	x0	y0	h	type
1	4000	3000	600	700	0	0	-	row
2	4000	3000	600	700	1000	1100	-	column
3	4000	3000	-	-	500	300	100	row_
4	4000	3000	-	-	500	300	100	column_
5	4000	3000	600	700	1500	1300		spiral
6	4000	3000	-	-	1500	1300	h	frame_
...								



*Параметры модели тайлирования:*

*sx, sy* - размеры изображения

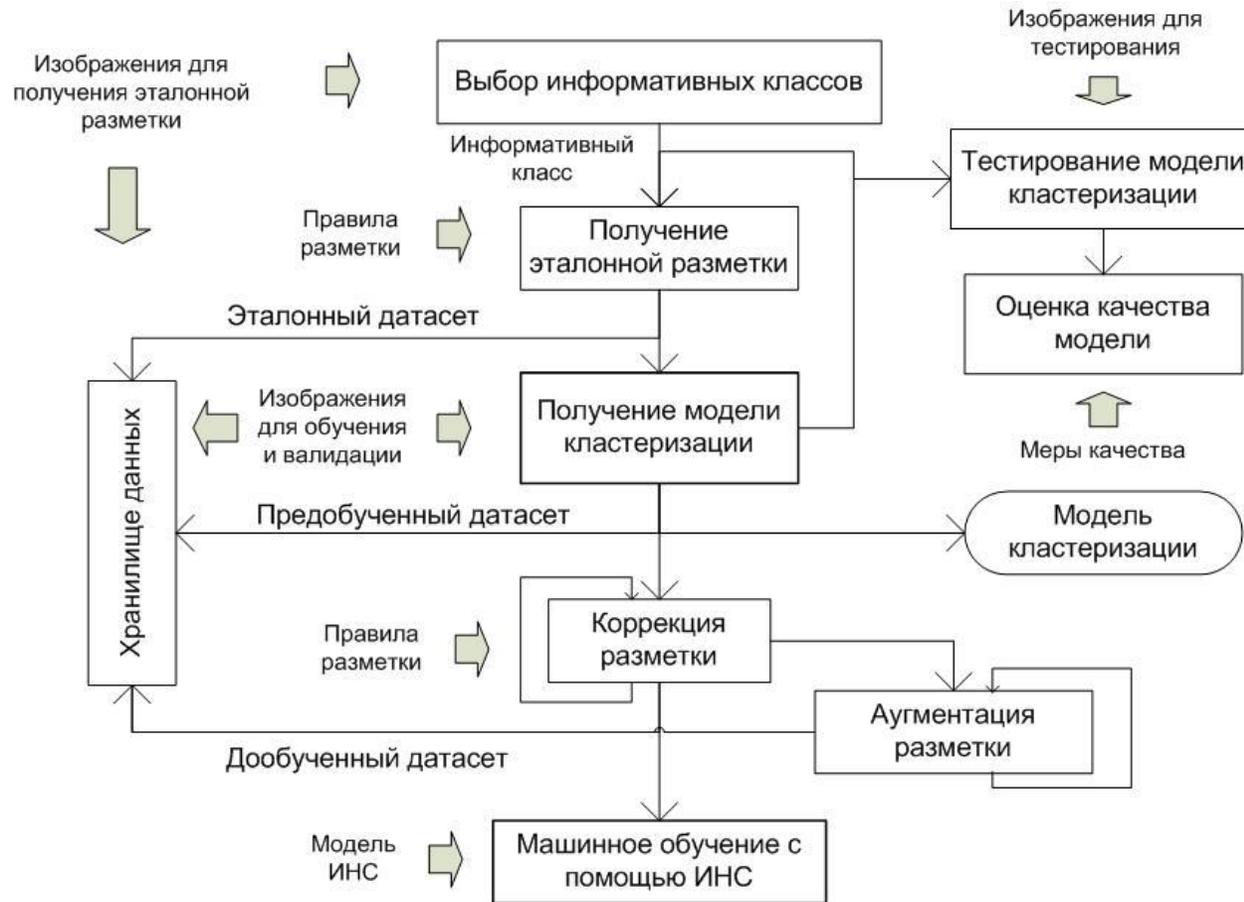
*tx, ty* - размеры тайла

*x0, y0* - координаты тайла-нуль

*h* - толщина тайла-полоски

*type* - тип тайлирования

# Схема подготовки данных для машинного обучения



Эталонный датасет – формируется для каждого информативного класса «ручным» и интерактивным способом

Предобученный датасет – формируется в результате расчёта модели кластеризации

Дообученный датасет – формируется по результатам коррекции и аугментации предобученной, выполняемые на кластеризованных областях.

# Номер и индекс точки пути

Область => Контур области => Путь контура => Линия пути

- Номер  $i$  точки – порядковый номер элемента упорядоченного набора  $L$ , от 1 до  $l$ .
- Индекс  $j$  точки – число, которым размечаются одинаковые точки пути с координатой  $(x_j, y_j)$ .

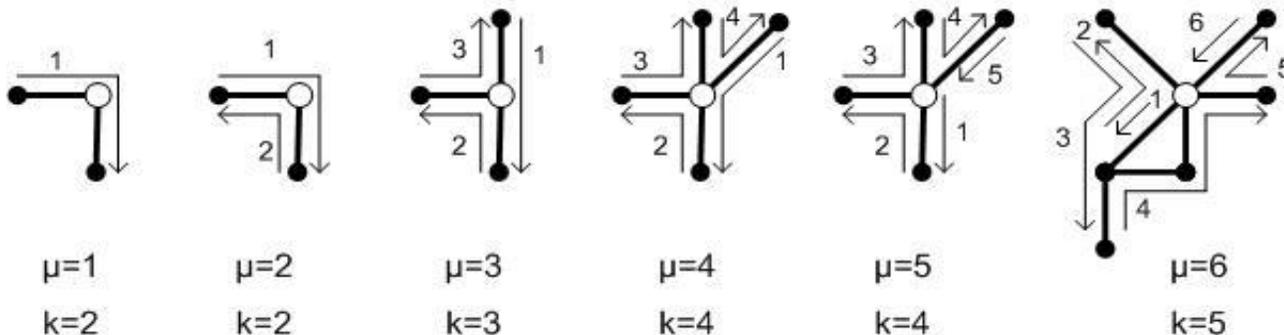
Нумерация и индексация пути даёт вектор  $F$ :

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

$F_j$  – 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).



Цифры – порядок прохождения

Стрелки – траектория пути через точку

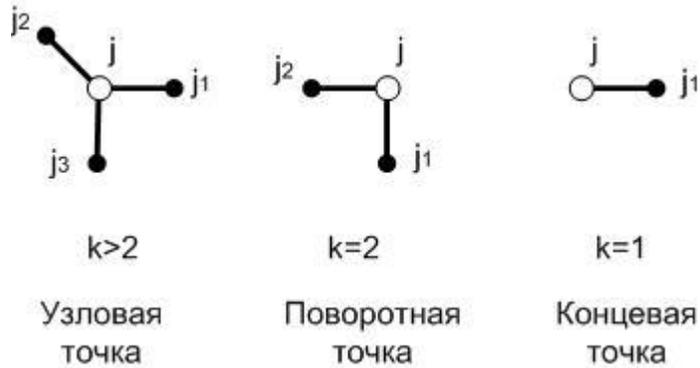
$\mu$  – число прохождений через точку пути в окрестности данной точки

$k$  – число разных точек (с разными индексами), соседних с данной точкой, в составе пути

*Примеры фрагментов пути в окрестности точки*

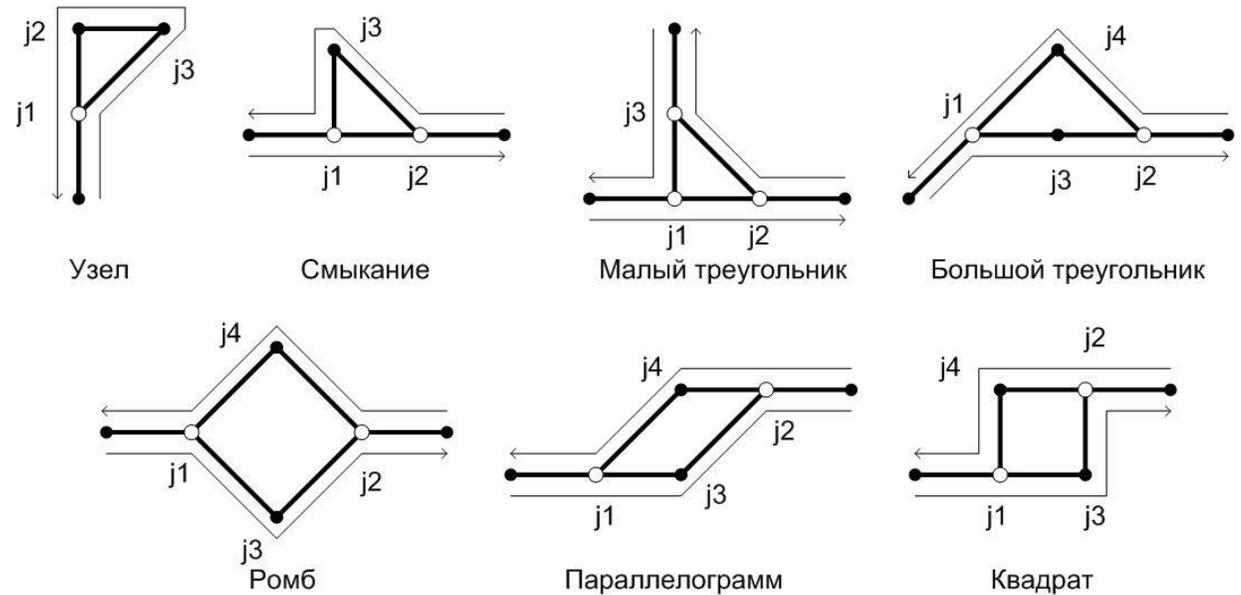
# Ключевые точки и их типы

Ключевые точки пути – точки пути, характеризующие структуру контура.



*Типы ключевых точек*

Узловые точки путей могут образовывать узловые связки – группы соседних узловых точек в составе одного пути.



*Основные типы узловых связок*

Стрелки – участки пути,  
 $j^*$  - индексы точек пути в окрестности узловых связок

# Путевые структуры

К путевым структурам относятся:

- ключевые точки
- связки
- внутренние точки
- повторные точки
- петли
- отростки
- ...

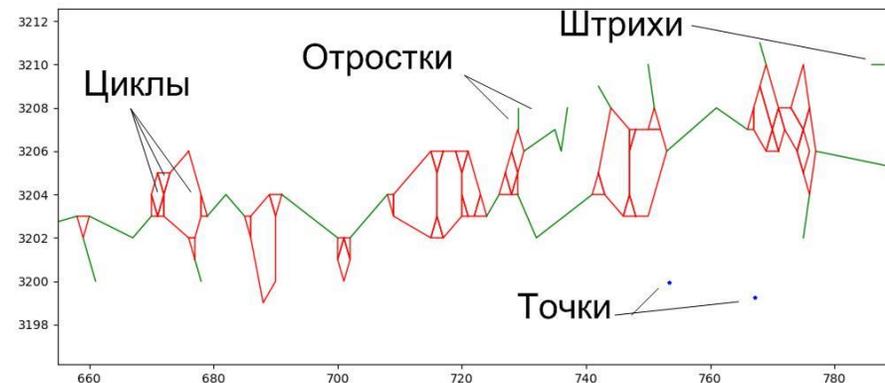
Каждая путевая структура имеет определённые дешифровочные признаки, по которым она дешифрируется на пути.

Внутренняя точка – точка пути, которая не является ключевой. Внутренняя точка имеет  $k = 2$  разные соседние точки, лежащие вместе с ней на одной прямой.

Повторная точка – точка пути, которая совпадает с точкой на один номер меньше или на один номер больше.

Отросток – участок пути длины, не больше пороговой, ограниченный с одной стороны узловой (основание отростка), с другой стороны – концевой точками (конец отростка).

Петля – незамкнутый участок пути с отсутствием узловых точек, на котором существует по крайней мере одна пара точек  $p$  и  $p'$ , которые имеют индексы  $j$  и  $j'$  и номера на этом участке соответственно  $\{i_1^j, i_2^j, \dots\}$  и  $\{i_1^{j'}, i_2^{j'}, \dots\}$ , для которых  $i_1^j + 1 = i_1^{j'}$ ,  $i_2^j + 1 = i_2^{j'}$ ,  $i_1^{j'} < i_2^j$ .



*Примеры видов путевых структур*

# Сегмент и сегментация пути

Сегмент пути – участок пути, начало и конец которого являются узловыми или концевыми точками, а другие точки участка ими не являются.

Сегментация пути – разложение пути на сегменты.

- Номер  $\hat{i}$  сегмента – порядковый номер сегмента в составе упорядоченного набора  $L$ , причём  $\hat{i} > 0$ , если сегмент идёт по направлению пути, и  $\hat{i} < 0$ , если сегмент идёт обратно направлению пути;  $i_{\text{Н}}^{\hat{i}}$  и  $i_{\text{К}}^{\hat{i}}$  – номер точки начала и конца сегмента  $\hat{i}$ .
- Индекс  $\hat{j}$  сегмента – число, которым размечаются одинаковые сегменты. Нумерация и индексация сегмента пути даёт вектор  $\hat{F}$ :

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

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

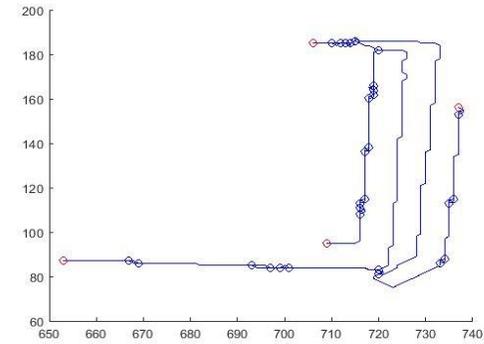
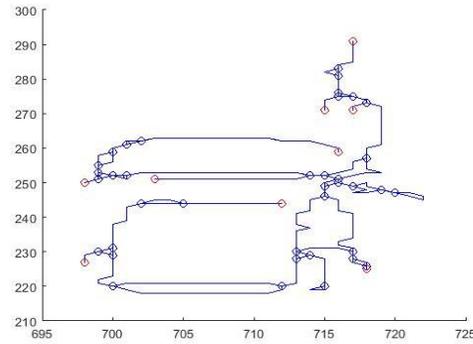
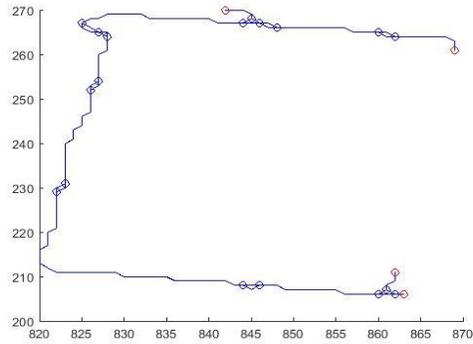
$\hat{l}_j$  – число сегментов пути, имеющих индекс  $\hat{j}$ ,

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

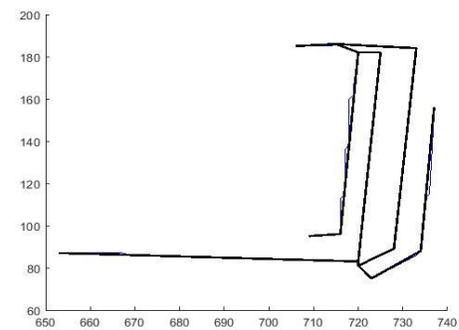
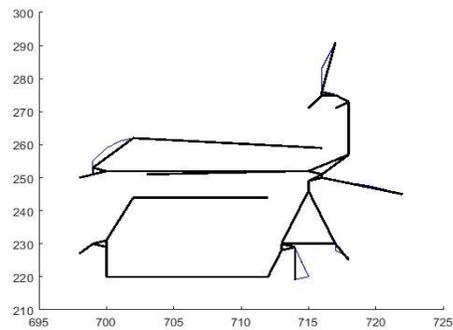
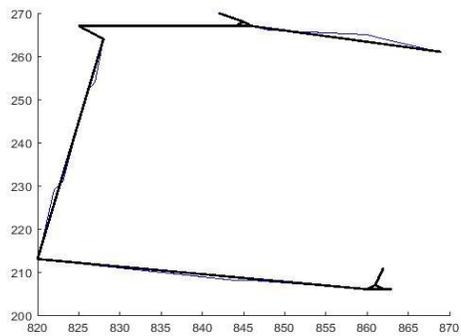
# Блоки и виды путевых операций

Блоки операций	Виды операций
Коррекция пути	Инверсия, ротация, замыкание, удлинение и др.; удаление путевых структур (повторных точек, петель, отростков, узловых связок и др.)
Дешифрирование путевых структур	Дешифрирование ключевых точек, повторных точек, петель, отростков, узловых связок и др.
Операции над участками пути	Сложение / вычитание (выделение среза), умножение / деление, сегментация
Изменение траектории пути	Преобразования движения (сдвиги, повороты), растяжения, подобия (симметрии), поляризации (ортогонализации)
Квазибинарные операции	Изменение связности, передискретизация, дилатация / эрозия, открытие / закрытие, скелетизация и др.
Деградация пути	Выпрямление (линеаризация), фигурация, нормализация
Групповые операции	Сегментация, паттернизация, агрегация (на разрывах, пересечений, слияний и др.), фильтрация, интерполяция / экстраполяция, конъюнктура и др.

# Примеры путей и их выпрямлений

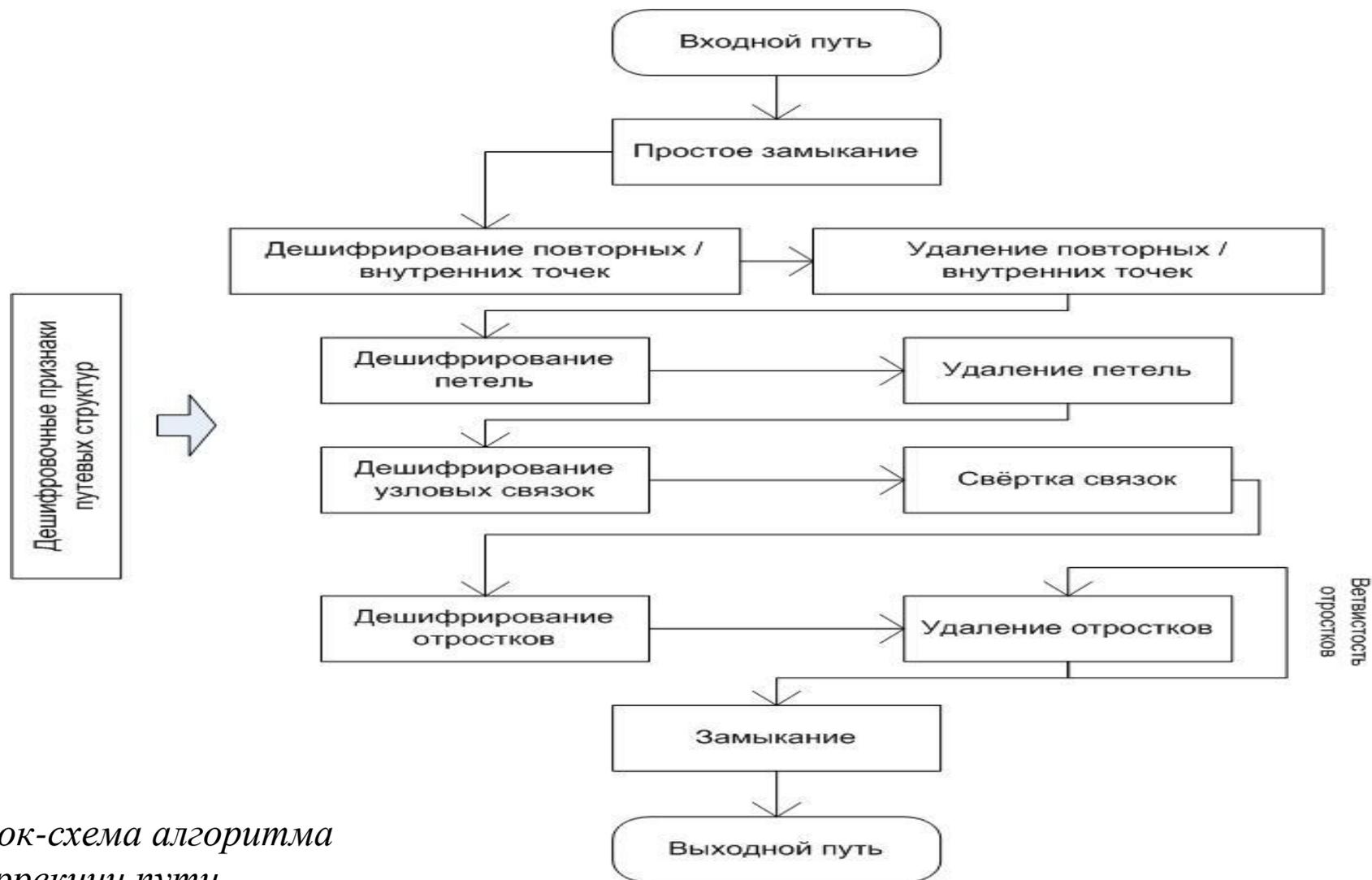


*Пути*



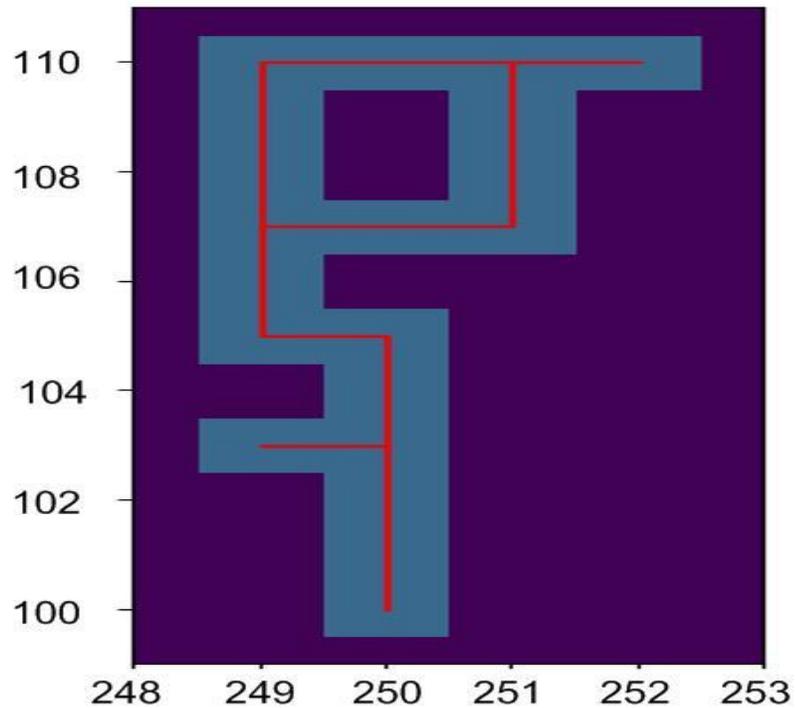
*Выпрямления путей*

# Коррекция пути

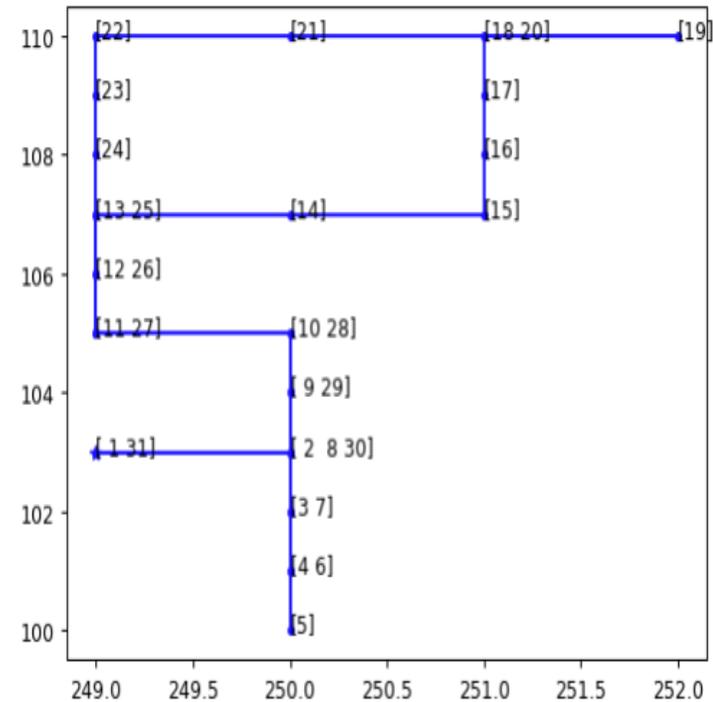
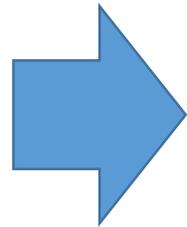


*Блок-схема алгоритма коррекции пути*

# Пример нумерации и индексации пути



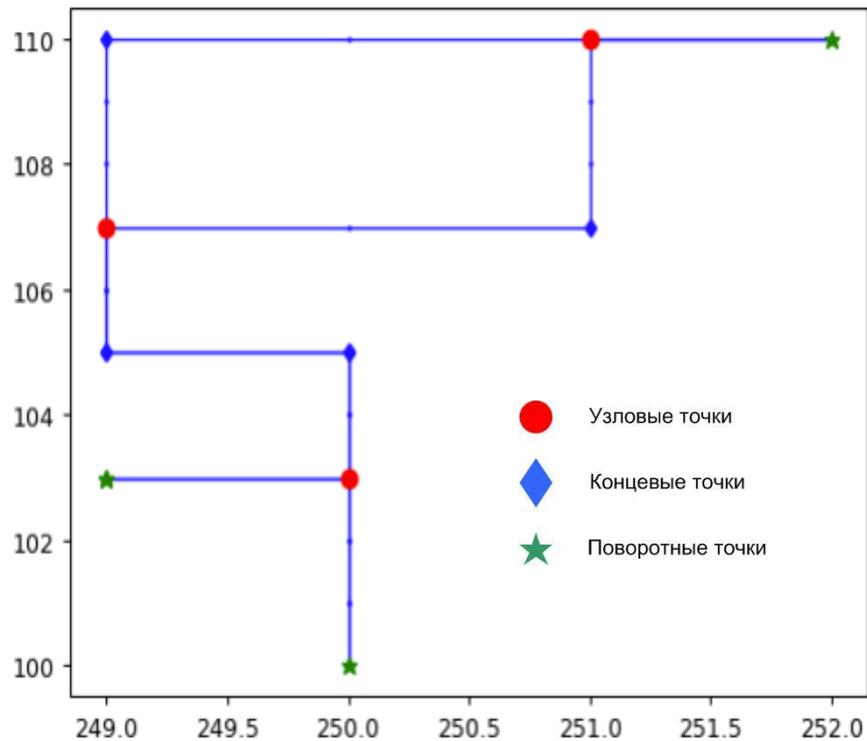
*Расчёт пути*



*Нумерация и  
индексация точек пути*

# Пример нумерации и индексации пути

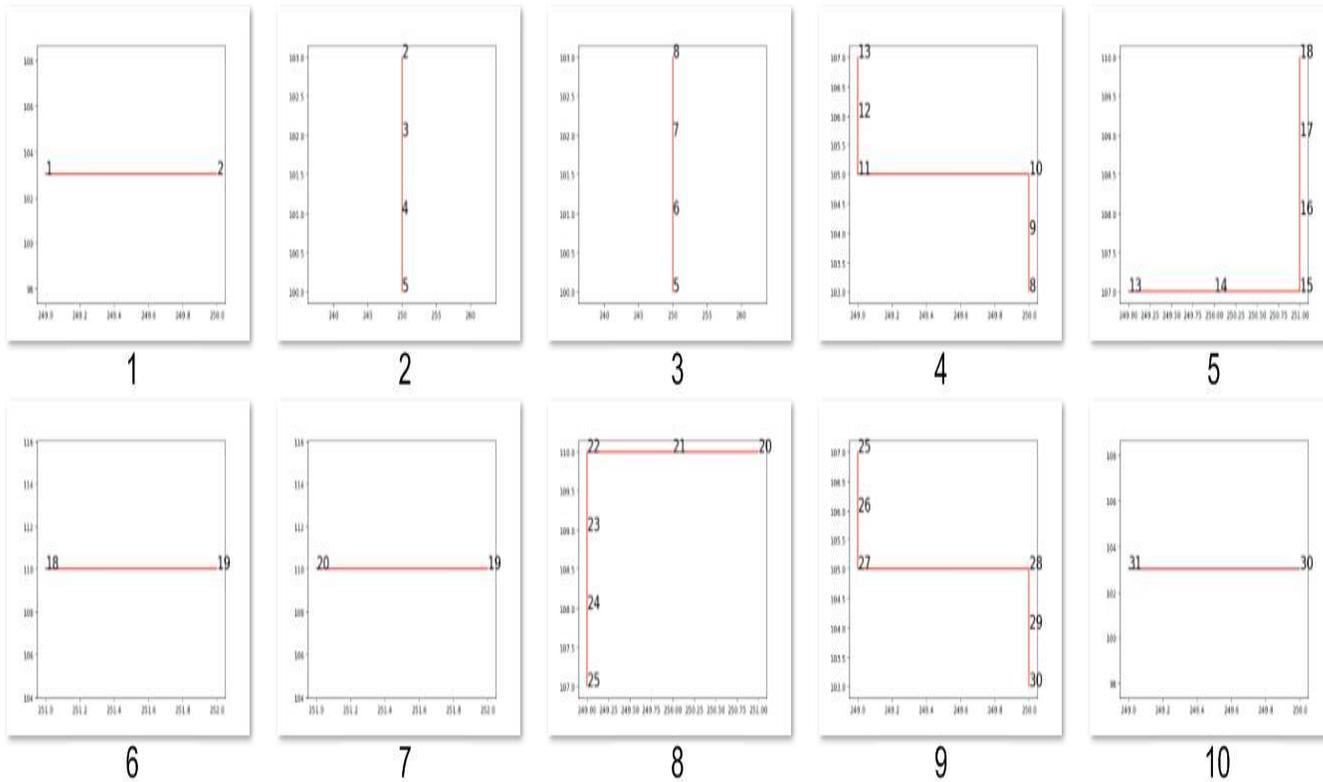
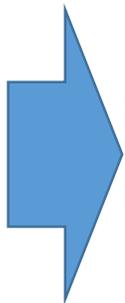
*Номера и индексы точек пути*



*Расчёт ключевых точек пути*

$j$	$x_j$	$y_j$	$F_j$	Тип ключевой точки
1	250	100	{5}	концевая
2	250	101	{4,6}	-
3	250	102	{3,7}	-
4	249	103	{1,31}	концевая
5	250	103	{2,8,30}	узловая
6	250	104	{9,29}	-
7	249	105	{11,27}	поворотная
8	250	105	{10,28}	поворотная
9	249	106	{12,26}	-
10	249	107	{13,25}	узловая
11	250	107	{14}	-
12	251	107	{15}	поворотная
13	249	108	{24}	-
14	251	108	{16}	-
15	249	109	{23}	-
16	251	109	{17}	-
17	249	110	{22}	поворотная
18	250	110	{21}	-
19	251	110	{18,20}	узловая
20	252	110	{19}	концевая

# Пример сегментации пути



*Разложение пути на сегменты*

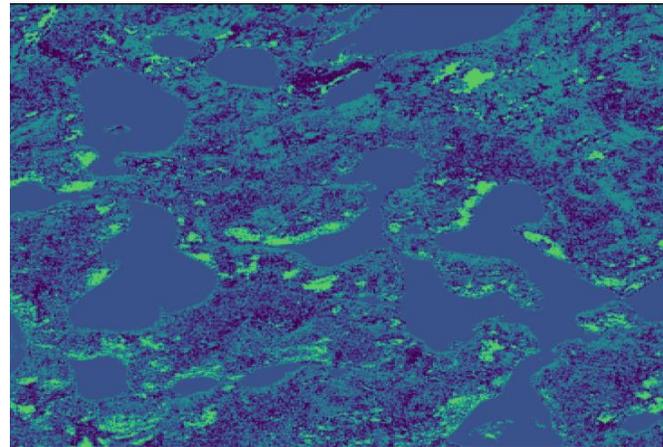
*Номера и индексы сегментов пути*

$\hat{j}$	$\hat{F}_j$	$\hat{i}$	$\hat{i}_H$	$\hat{i}_K$
1	{1, -10}	1	1	2
2	{2, -3}	2	2	5
3	{4}	3	5	8
4	{5, -9}	4	8	13
5	{6, -7}	5	13	18
6	{8}	6	18	19
		7	19	20
		8	20	25
		9	25	30
		10	30	31

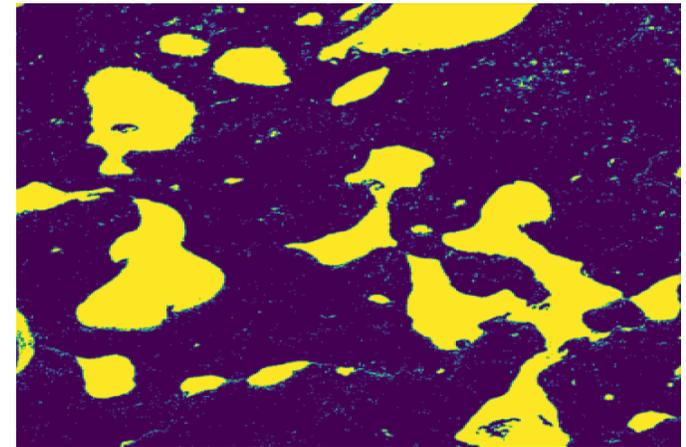
## Получение дообученной разметки с применением кластеризации



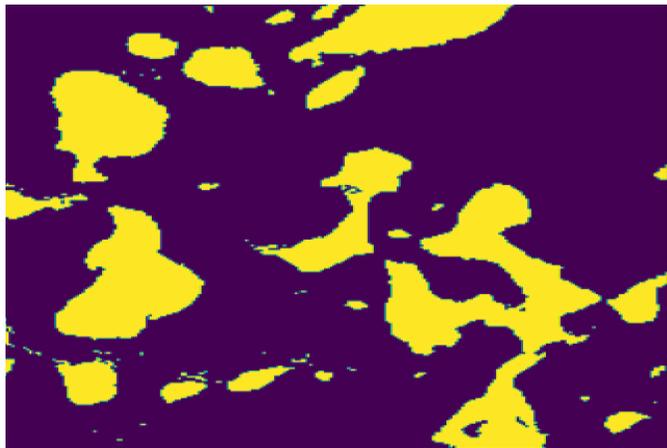
I. Входное изображение



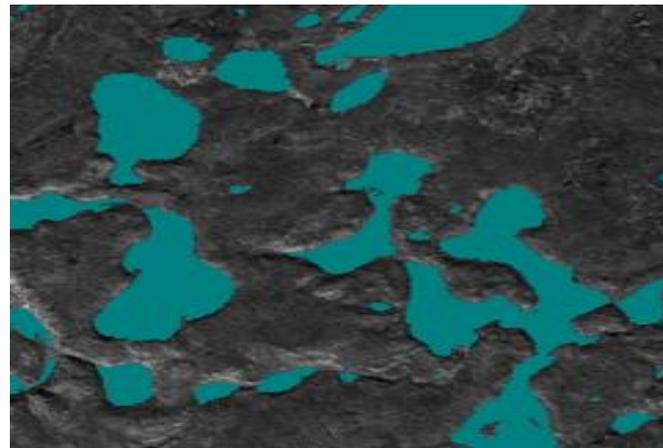
II. Пообъектная маска кластеров



III. Выделение кластера



IV. Коррекция



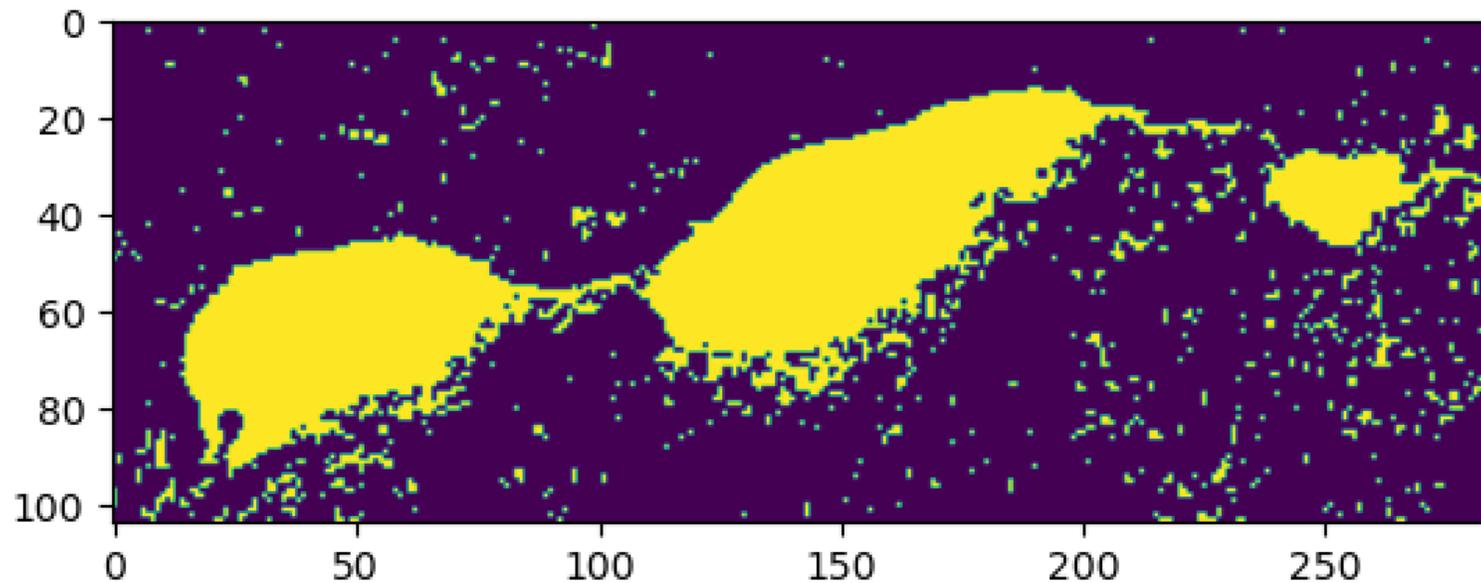
V. Наложение скорректированного кластера



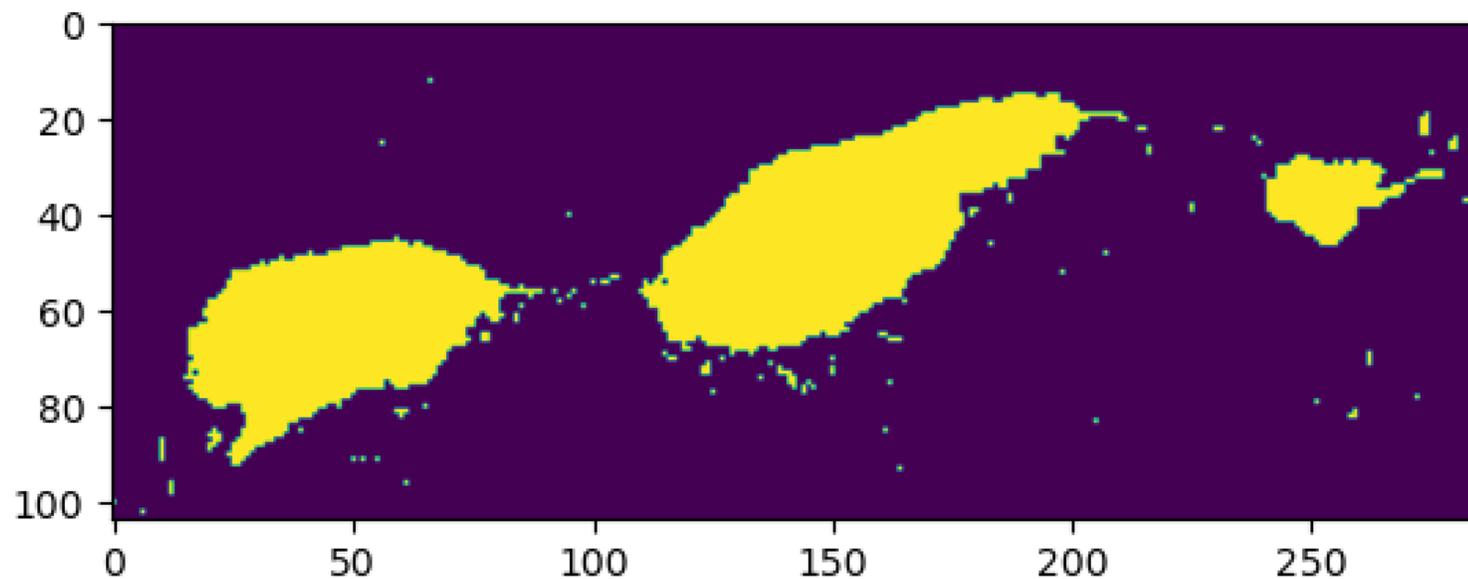
VI. Копирование областей на других изображениях

*К северо-западу от жилой части г. Норильск; класс объектов - водоёмы*

## Получение дообученной разметки с применением кластеризации



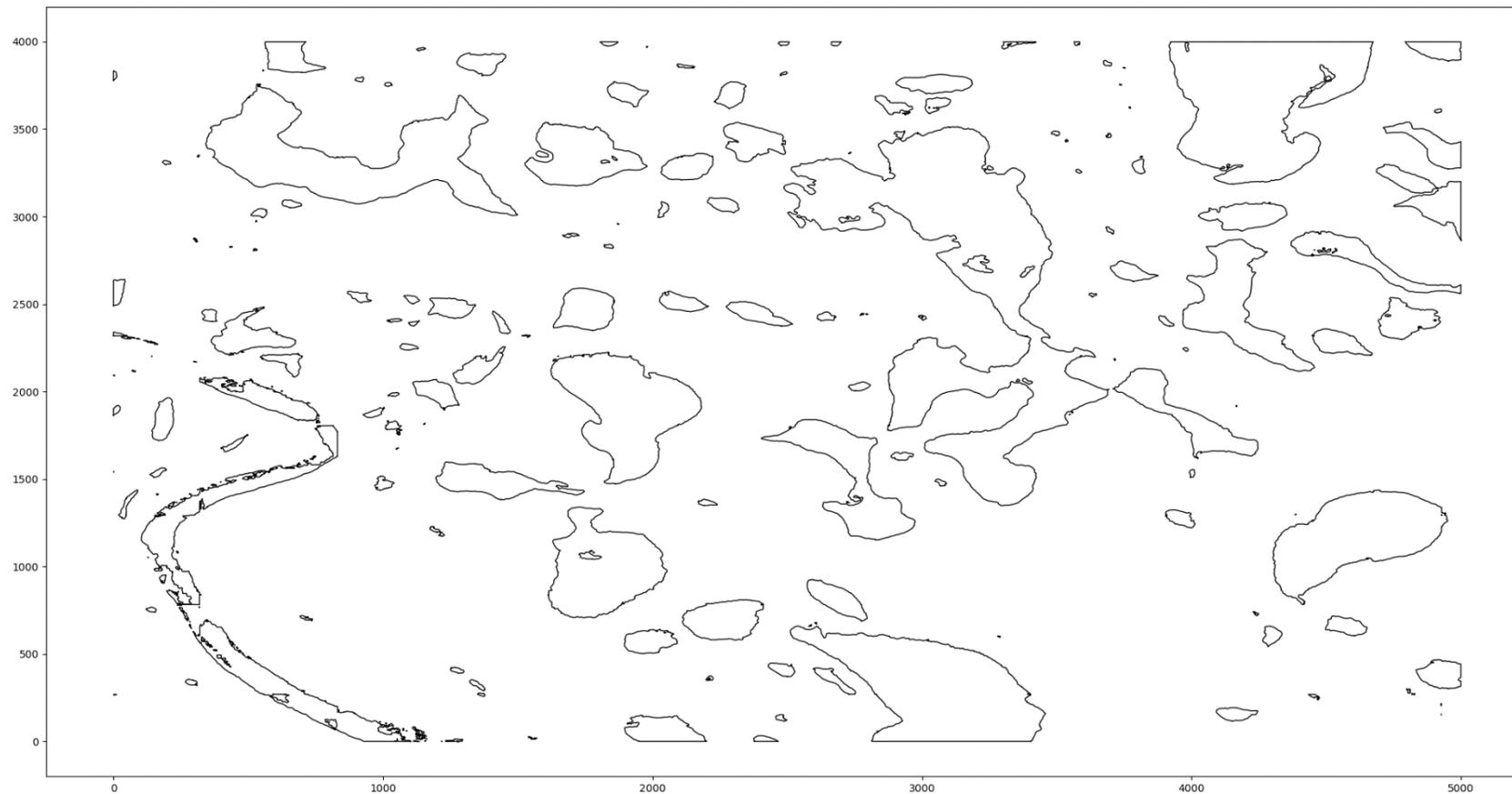
(a)



(б)

*Сопоставление методов  $k$ -means (а) и агломеративной кластеризации (б) для фрагмента входного изображения*

## Получение дообученной разметки с применением кластеризации



VII. Векторизация областей

# Выводы

- В работе предложен подход кластеризации для построения предобученной выборки, которая «доучивается» оператором-разметчиком. Строится модель кластеризации, включающая пообъектную регистрацию, маски кластеров, полученные по набору обучаемых изображений, оптимальные параметры кластеризации. Данная процедура является составной частью процедуры подготовки данных для машинного обучения. В хранилище содержатся изображения и их метаданные, модели кластеризации каждого информативного класса, маски эталонной и обучающей разметки.
- Достоинствами применения кластеризации для машинного обучения является автоматизация и ускорение построения разметки, а также допустимость ошибок первого и второго рода при наличии большого объёма данных для обучения.
- В работе предложен подход векторизации, основанный на применении векторных морфологических операций над путями (линиями прослеживания контуров). Данный подход применим в частности при векторизации обучающей выборки, а также в целях удобства её представления и хранения при машинном обучении, уменьшения памяти для хранения, удобства трансформации вектора (сдвига, поворота, масштабирования и др.).
- Разработано программное обеспечение по векторизации, позволяющее обрабатывать различные морфологические путевые операции, рассчитывать векторную информацию разного типа по растровым изображениям, а также производить близкую к автоматической векторизацию изображений.