

# Автоматизация проектирования микрорайонов

Тигина Мария Михайловна

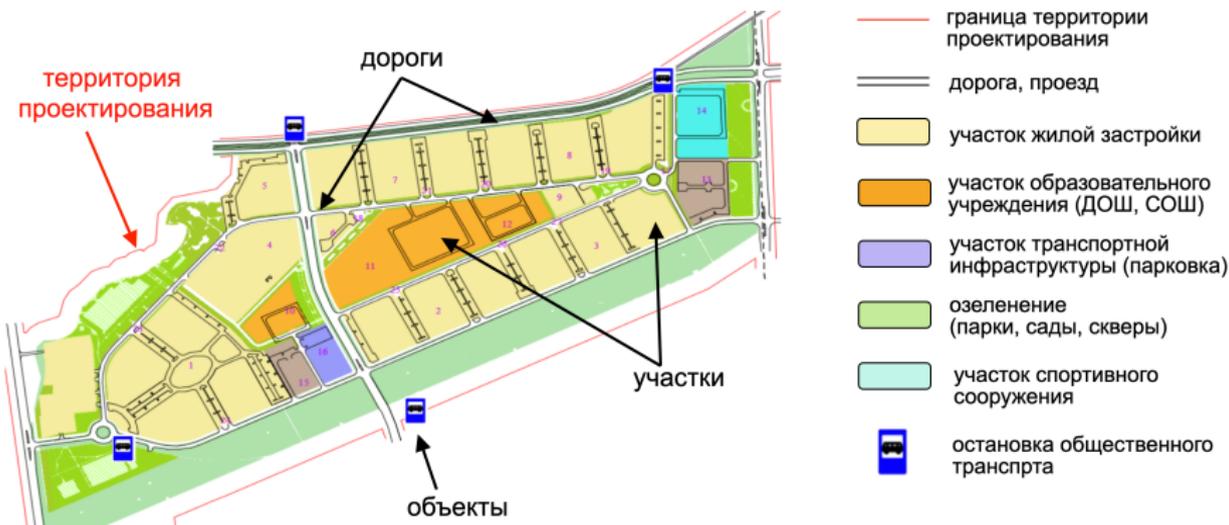
научный руководитель: Амосов Федор Альбертович

консультант по градостроительству: Краевский Александр Анатольевич

НИУ ВШЭ школа физико-математических и  
компьютерных наук

11 июня 2021 г.

По данной территории проектирования создать проект планировки:



## 1 Оптимальный по **целевым показателям**:

- Площадь жилой застройки
- Длина улично-дорожной сети
- ...

$$\sum S(\text{living zone}) \rightarrow \max$$

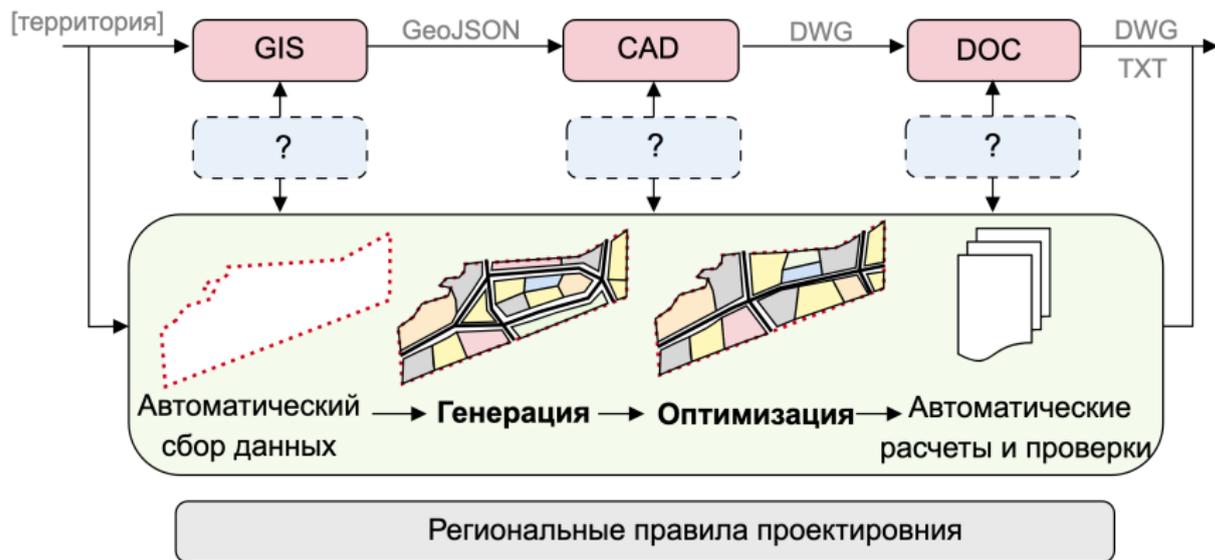
$$\sum L(\text{road}) \rightarrow \min$$

## 2 Удовлетворяет региональным **ограничениям**:

- Доступность
- Плотность улично-дорожной сети
- ...

$$D(\text{living zone, object}) \leq R$$

$$\frac{\text{road length}}{\text{block area}} \geq P$$



## Требования к **автоматизации проектирования**:

- 1 Интеграция с ручным процессом
- 2 Полная генерация и оптимизация проектов с учетом всех ограничений
- 3 Региональная независимость

Сервис	Интеграция с			Дороги		Зоны		Региональная независимость	Расширяемость	Визуализация
	GIS	CAD	DOC	ген.	опт.	ген.	опт.			
ArcGIS	+/-	+	-	+	-	-	-	+	+	JS + карта
KPF	-	-	-	+/-	+/-	+	+	-	-	JS + карта
Delve	-	-	-	-	-	+	+	-	-	JS
Grasshooper	-	+	-	+	+	-	-	+/-	+	CAD/Windows/GPU
Pencilr	-	-	+	-	-	-	-	-	-	JS + карта

- Нет интеграции с CAD и GIS
- Автоматизируют отдельные этапы проектирования
- Не универсальные, не настраиваемые, не расширяемые

ArcGIS, <https://www.arcgis.com/>

KPF, <https://ui.kpf.com/>

Delve, <https://hello.delve.sidewalklabs.com/>

Grasshooper, <https://www.grasshopper3d.com/>

Pencilr, <https://www.pencilr.org/>

## Генерация:

- 1 Подходы компьютерной графики на основе:
  - Паттерна <sup>1</sup> [*Grasshooper, ArcGIS*]
  - Грамматики
  - Примера

## Оптимизация:

- 1 Растровый подход:
  - Генетические алгоритмы (GA) <sup>2</sup> [*KPF, Delve*]
  - Алгоритм имитации отжига (SA) <sup>3</sup>
- 2 Векторный подход:
  - GA + дерево подразделения <sup>4</sup> [*Grasshooper*]
  - GA + диаграмма Вороного <sup>5</sup>
  - GA, SA для расположения объектов и выбора типов

---

<sup>1</sup> Vanegas et al., "Procedural Generation of Parcels in Urban Modeling", 2012

<sup>2</sup> Koenig et al., "Optimization System for Urban Planning Tasks", 2013

<sup>3</sup> Santé, I., Rivera et al., "A Simulated Annealing Algorithm for Zoning", 2016

<sup>4</sup> Wilson et al., "How to Generate a Thousand Master Plans", 2019

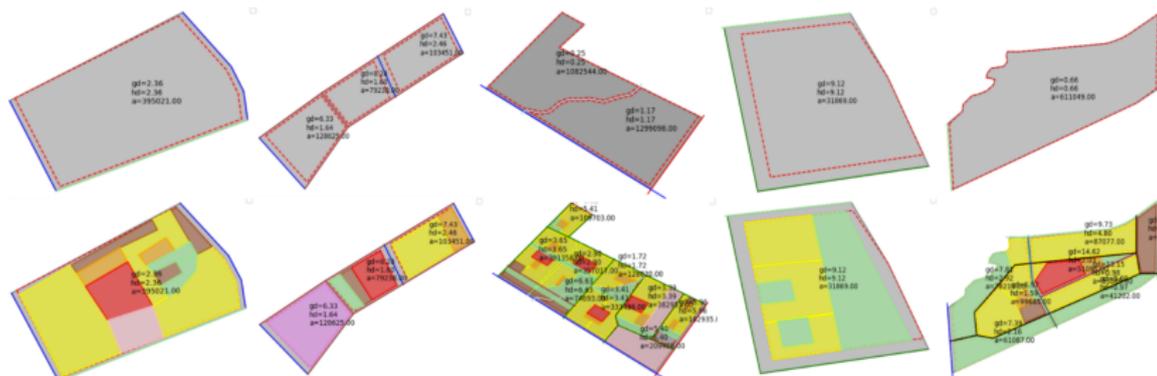
<sup>5</sup> Touriño et al., "A GIS-embedded System to Support Land Consolidation Plans", 2010

**Цель:** Разработать универсальный инструмент для автоматизации процесса создания оптимального проекта планировки территории

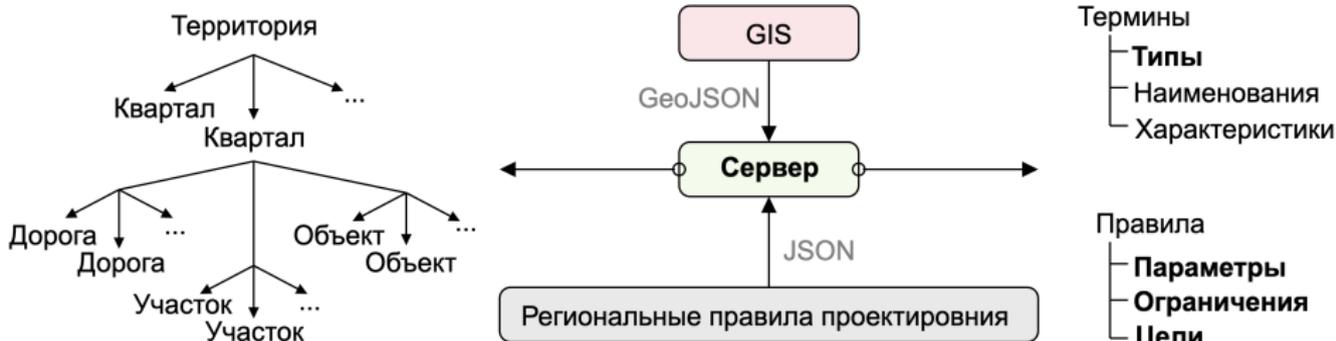
## **Задачи:**

- 1 Собрать датасет из разработанных вручную проектов
- 2 Разработать гибкую, расширяемую архитектуру
- 3 Реализовать расчет параметров, проверку ограничений и вычисление целевых функций
- 4 Адаптировать и доработать существующие алгоритмы для совместной генерации и оптимизации всех объектов планирования
- 5 Протестировать и сравнить различные комбинации алгоритмов на проектах из датасета
- 6 Разработать интегрированный с GIS и CAD инструмент автоматического планирования

<u>Санкт-Петербург:</u>	30 проектов,	2+ целей,	20+ ограничений
<u>Москва:</u>	20 проектов,	3+ целей,	25+ ограничений
<u>Хельсинки:</u>	6 проектов,	1+ целей,	10+ ограничений
<u>Дубай:</u>	3 проекта,	2+ целей,	40+ ограничений



КГА в Санкт-Петербурге, <https://kgainfo.spb.ru/>  
КГА города Москвы, <https://www.mos.ru/mka/>  
Helsinki Ministry, <https://www.hel.fi/helsinki/en>  
Dubai Development Authority, <https://dda.gov.ae>

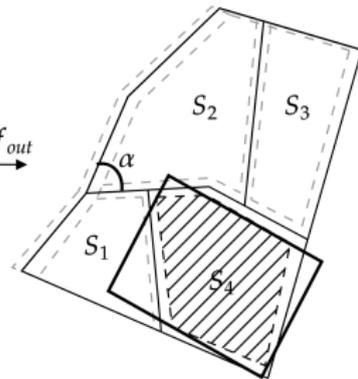
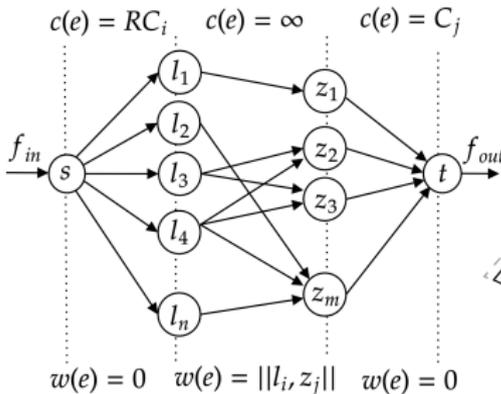


## Входные параметры:

- Конфигурационный файл региона *JSON*
  - + Региональная независимость
- Чертеж *GeoJSON*
  - + Типизация через атрибуты

## Объектная модель:

- Иерархичное представление чертежа
  - + Быстрая навигация
- Регионально зависимые части скрыты под интерфейсами
  - + Расширяемость
  - + Общий подход к обработке



Проверка ограничения на вместимость.  
Алгоритм поиска **максимального**  
**потока минимальной** стоимости.

Проверка визуальных  
ограничений.  
**Граф дорожной сети.**

## Расчет параметров:

(4 города, 40+ параметров)

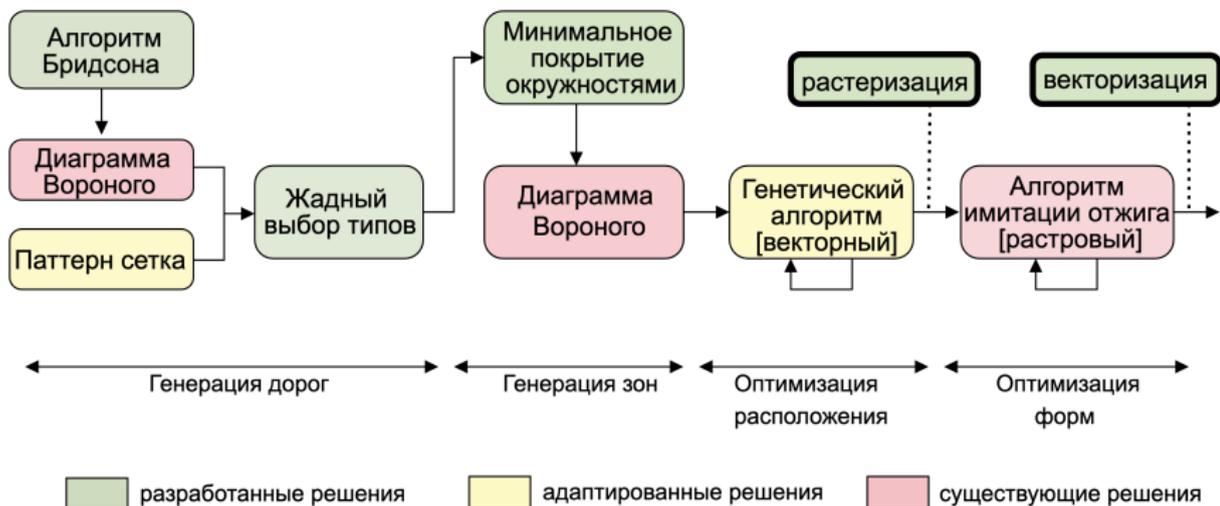
## Проверка ограничений:

(4 города, 30+ ограничений)

## Целевые функции:

(4 города, 5+ целей)

- Методы вычислительной геометрии
- Кеширование
- Линейное программирование
- Графовые алгоритмы
- Приоритеты регулирует пользователь



## – Проблема склейки векторных и растровых алгоритмов

текущее решение: rasterio + сглаживание алгоритмом Дугласа-Пекера

## + Протестированы различные комбинации

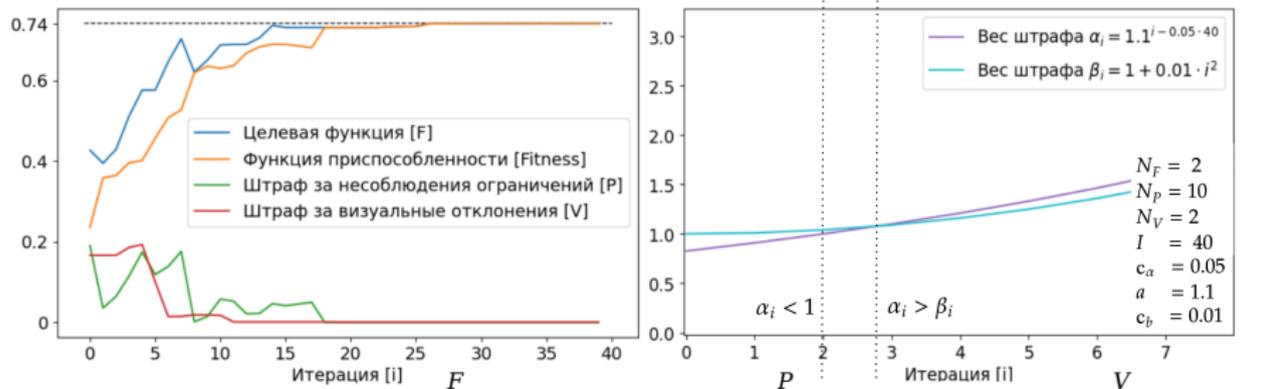
5+ алгоритмов генерации

5+ алгоритмов оптимизации

Douglas and Peucker, "Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature", 2011

Bridson, "Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions", 2007

Графики зависимости компонентов функции приспособленности от номера итерации



$$Fitness_i(draft) = \left[ \sum_k^{N_F} w_k \cdot F_k(draft) \right] - \alpha_i \left[ \frac{1}{N_P} \sum_k^{N_P} P_k(draft) \right] - \beta_i \left[ \frac{1}{N_V} \sum_k^{N_V} V_k(draft) \right]$$

$F_k(draft) \in [0, 1]$  – значение целевой функции

$P_k(draft) \in [0, 1]$  – штраф за несоблюдение ограничений

$V_k(draft) \in [0, 1]$  – штраф за визуальные отклонения

$w_k : \sum_k w_k = 1$  – веса целевых функций

$\alpha_i = a^{i-c_\alpha \cdot I}$  – вес штрафа за несоблюдение ограничений

$\beta_i = c_\beta \cdot i^2 + 1$  – вес штрафа за визуальные отклонения

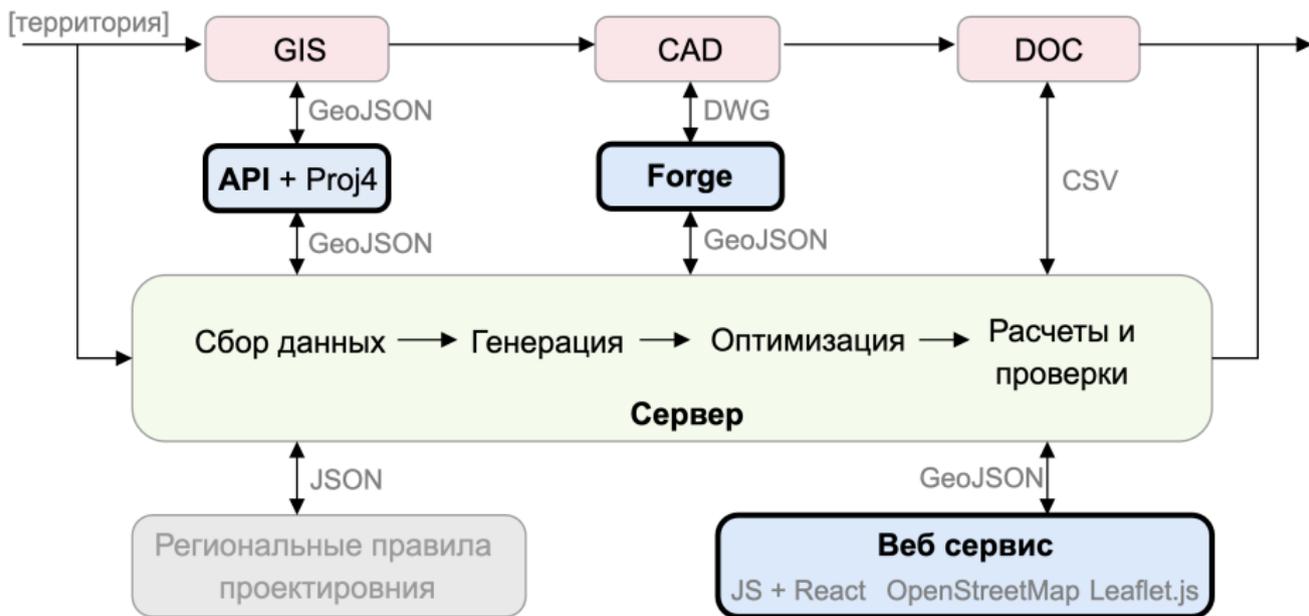
Crossley et al., "A study of adaptive penalty functions for constrained genetic algorithm-based optimization", 2012

Проект	Площадь территории [га]	Ручное проектирование		Существующие алгоритмы		Предлагаемый подход	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2
Простая форма	30.07	22.59	6.27	22.9 +1.37%	6.03 <b>-3.83%</b>	24.25 <b>+7.35%</b>	6.91 <b>+10.13%</b>
Маленький	3.56	3.3	3.06	3.3 +0.0%	3.2 <b>+4.58%</b>	3.39 <b>+2.74%</b>	3.20 <b>+4.58%</b>
Сложная форма	58.53	45.47	22.34	40.3 <b>-11.37%</b>	20.5 <b>-8.24%</b>	49.58 <b>+9.03%</b>	23.35 <b>+4.54%</b>
Большой	119.34	112.18	42.96	100.5 <b>-10.41%</b>	40.3 <b>-6.19%</b>	115.11 <b>+8.86%</b>	43.66 <b>+1.64%</b>
Частично застроен	24.99	20.89	16.32	20.9 +0.05%	16.5 +1.1%	23.10 <b>+10.58%</b>	18.37 <b>+12.58%</b>
				± 5%	± 8%	± 1%	± 2%

F1 Площадь кварталов [га]

F2 Площадь жилой застройки [га]

- + Проверена статистическая значимость
- + Unit тестирование
- + Пройдена экспертная оценка

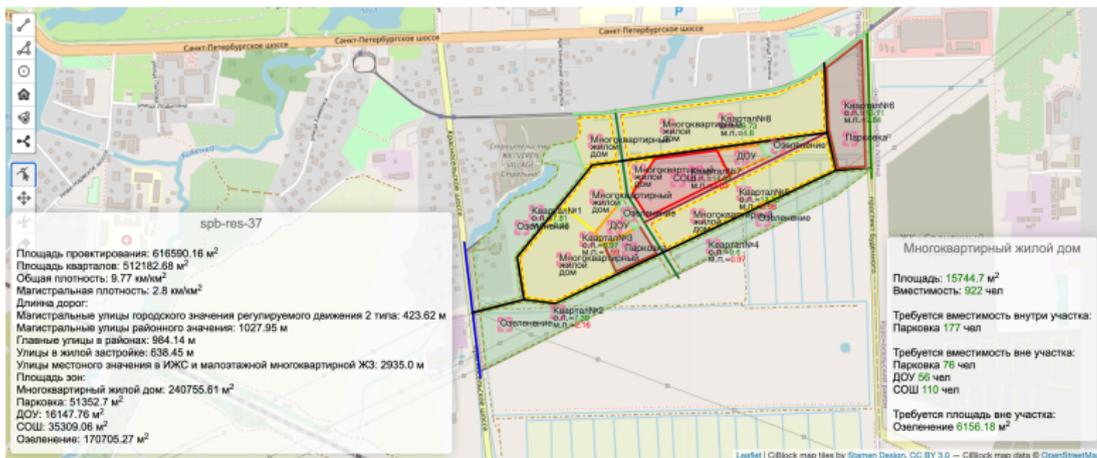


ГИС Санкт-Петербурга, <https://rgis.spb.ru/>

Forge, <https://forge.autodesk.com/>

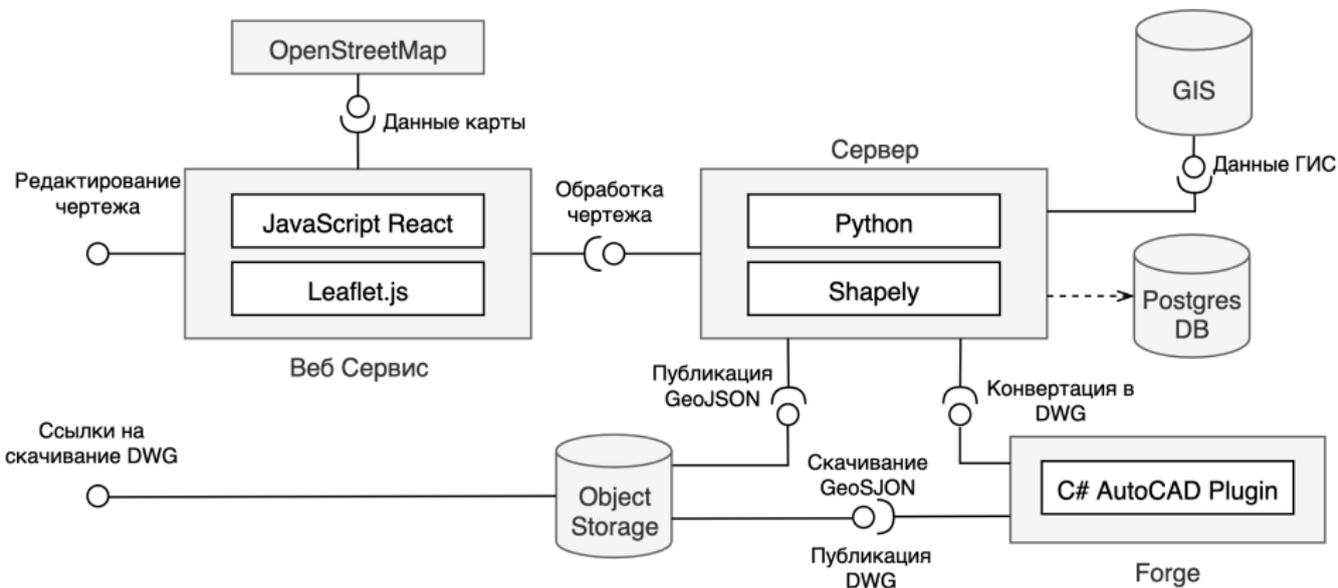
Leaflet, <https://leafletjs.com/>

OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/>

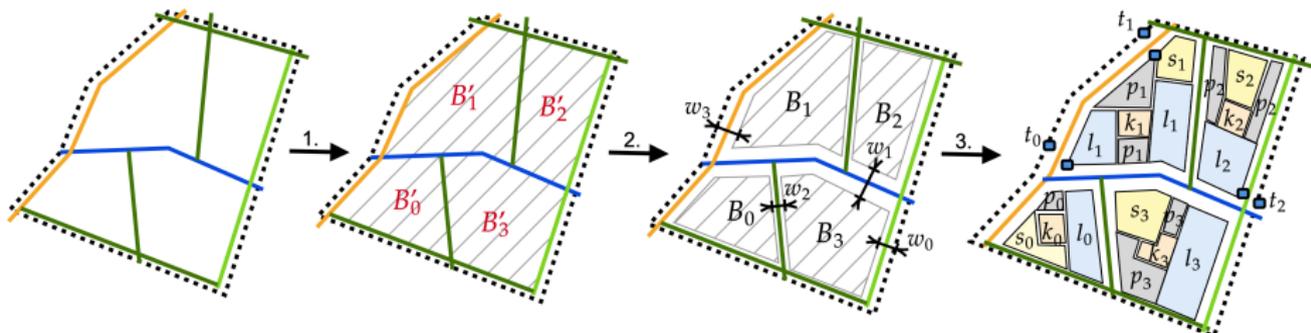


Сервис	Интеграция с			Дороги		Зоны		Региональная независимость	Расширяемость	Визуализация
	GIS	CAD	DOC	ген.	опт.	ген.	опт.			
ArcGIS	+/-	+	-	+	-	-	-	+	+	JS + карта
KPF	-	-	-	+/-	+/-	+	+	-	-	JS + карта
Delve	-	-	-	-	-	+	+	-	-	JS
Grasshopper	-	+	-	+	+	-	-	+/-	+	CAD/Windows/GPU
Pencilr	-	-	+	-	-	-	-	-	-	JS + карта
<b>CiBlock</b>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	JS + карта

- 1 Собран датасет чертежей по четырем городам
  - 2 Реализована универсальная архитектура
  - 3 Автоматизированы расчет параметров и проверки ограничений
  - 4 Адаптированы, улучшены и доработаны подходы к генерации и оптимизации
  - 5 Проведено сравнение и тестирование реализованных подходов на проектах из датасета
    - Улучшение бэйзлайна на 2 – 5% за время 1 – 2 часа
  - 6 Реализован и интегрирован с CAD и GIS сервис для работы с проектами, их генерации и оптимизации
- 
- + Проведена апробация, получен положительный отзыв от специалистов предметной области
  - + Планируется сертификация расчетных методов и внедрение

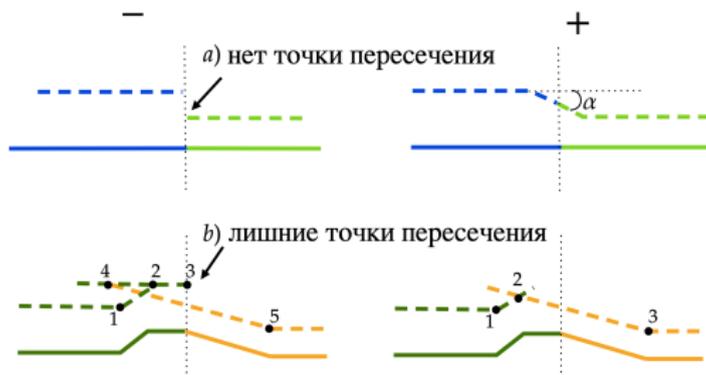
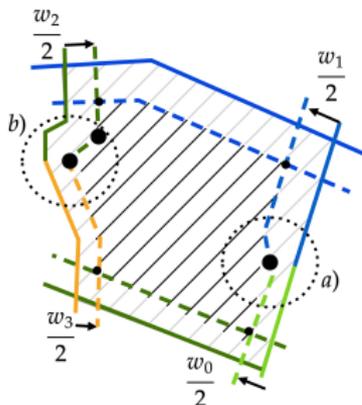


# Построение чертежа



- ..... - территория проектирования
- ▨ - территория квартала
- - осевые линии дорожных коридоров шириной  $w_0, w_1, w_2, w_3$  соответственно

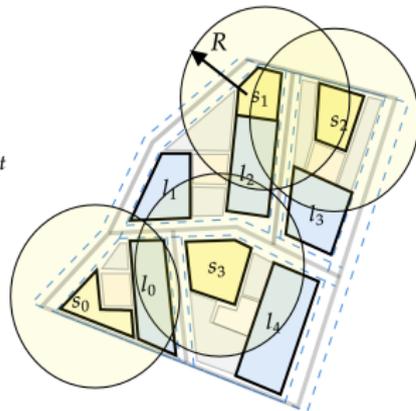
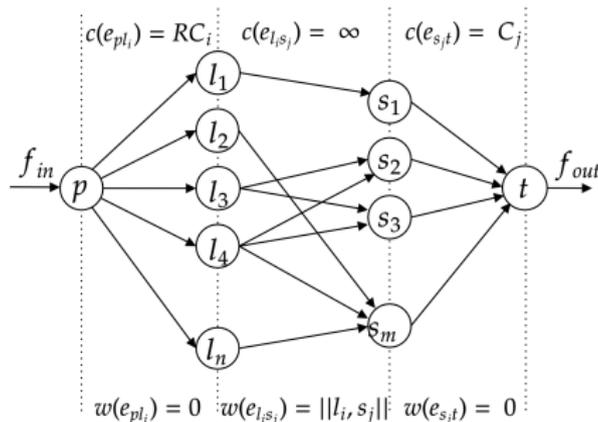
- участок ДОУ
- участок СОШ
- участок жилой застройки
- участок парковки
- остановка общественного транспорта



Параметр	Описание	Единица измерения
$C$	Вместимость участка	человек/мест/коек
$RC$	Требуемая вместимость участка	человек/мест/коек
$RA$	Требуемая площадь участка	га
$AR$	Средний радиус доступности	км
$L$	Длина дороги	км
$\alpha$	Радиус поворота дороги	рад
$k$	Число дорог на перекрестке	-
$S$	Площадь квартала и участка	га
$D$	Плотность улично-дорожной сети	$\frac{\text{км}}{\text{км}^2}$
$H$	Высота застройки на участке	м
$UR$	Коэффициент использования территории	-

Ограничения	Описание
$\alpha \geq C_\alpha$	Угол поворота дороги
$d_v = \ \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j\  \in [C_d^l, C_d^r]$	Расстояние между перекрестками, остановками общественного транспорта
$k_v \geq C_k$	Число дорог на перекрестке
$D = \frac{\sum L_r : r \in b}{S} \geq C_D$	Плотность улично-дорожной сети, регулируют размер и тип граничащих с кварталом улиц
$\frac{S_b}{S(MBB)} \geq C_{rect}$	Степень прямоугольности квартала
$\frac{MBB_a}{MBB_b} \geq C_{sq}$	Ограничение на соотношение сторон кварталов и участков, регулируют форму
$\alpha_b \geq C_{edge}$	Угол границы квартала, участка
$S \geq C_s$	Минимальная площадь квартала, участка

Цели	Описание
$AR_z \rightarrow \min$	Минимизация среднего радиуса доступности зон
$\sum S_b \rightarrow \max$	Максимизация площади застройки
$\sum S_l \rightarrow \max$	Максимизация площади под жилую застройку
$\ z, r\  \rightarrow \max$	Максимизация расстояния от дороги до некоторых зон.



$G = \langle V, E \rangle$ :

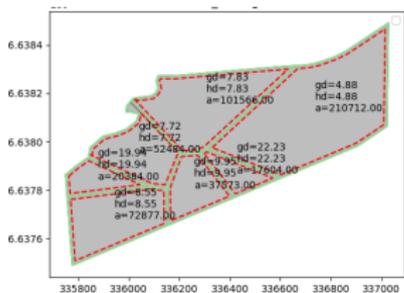
$$V = \{ \{l_i\}, \{s_j\}, p, t \}$$

$$E = \{ \{l_i \rightarrow s_j \mid \|l_i, s_j\| < R^s\}, \{p \rightarrow l_i\}, \{s_j \rightarrow t\} \}$$

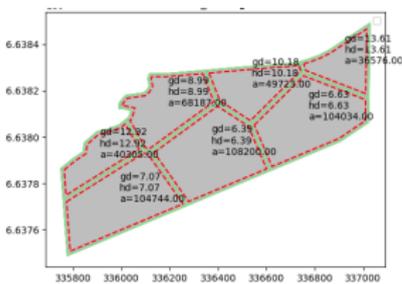
$f_{in} = \sum c(p \rightarrow l_i)$  - входной поток

- 1 Найдем **максимальный поток минимальной стоимости**
- 2  $f_{in} = f_{out} \Leftrightarrow$  всем школьникам хватило места в школе
- 3 Стоимость как метрика качества расположения

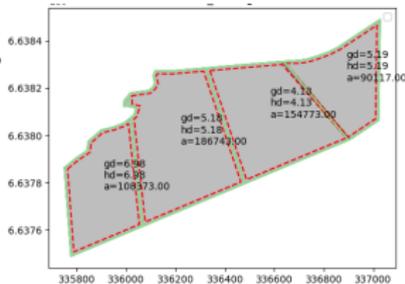
## + Начальное приближения



Пуассон

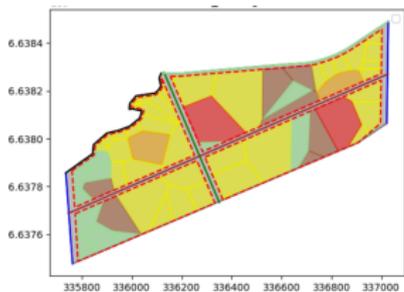


Бридсон

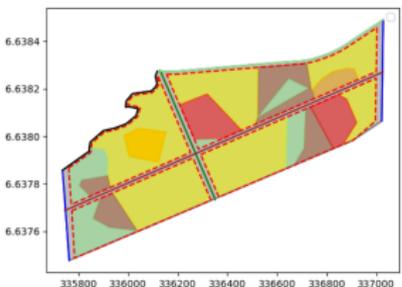


Бридсон + подбор кол-ва

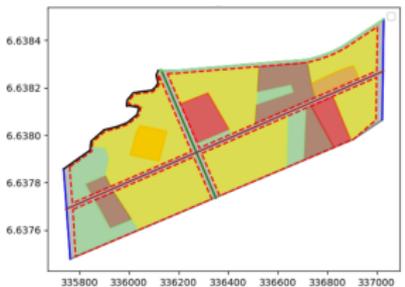
## + Форма



Генетический алгоритм +  
Диаграмма Вороного



Объединение



Алгоритм  
имитации отжига

```
{  
  "road_types": [  
    {  
      "id": 0,  
      "name": "Магистральная",  
      "width": 100,  
      "speed": 120,  
      ...  
    },  
    ...  
  ],  
  "zone_types": [ ... ],  
  "object_types": [ ... ],  
  "objectives": [ "max_flats", ... ],  
  "constraints": [ "road_density" ],  
  "parameters": [ "road_length" ],  
  "constants": { ... }  
}
```

типы дорог

специфичные региону  
характеристики

типы зон

типы объектов

цели

ограничения

параметры

константы

геометрический  
примитив

тип

true для  
существующих  
объектов

```
{  
  "type": "FeatureCollection",  
  "features": [  
    {  
      "type": "Feature",  
      "geometry": {  
        "type": "LineString",  
        "coordinates": [  
          [30.068029, 59.845651],  
          [30.06987, 59.846404],  
          [30.069913, 59.846749]  
        ]  
      },  
      "properties": {  
        "type": "road",  
        "type_id": 6,  
        "is_fixed": false  
      }  
    },  
    ...  
  ]  
}
```