

УДК 519.8

DOI 10.51691/2541-8327\_2023\_5\_23

***ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ПРИ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ***

***Сергеев А.Д.****студент,**Российский Университет Транспорта (МИИТ),**Москва, Россия***Аннотация:**

В статье исследуется оптимальное размещение базовых станций (БС) в сетях пятого поколения (5G). Разработана программа расчёта оптимального расположения базовых станций на заданной территории, использующая открытые данные о плотности населения. Вычисления основаны на совместном применении математической модели, которая использует сведение к задаче целочисленного программирования (ЗЦП), и модели потерь сигнала на близких расстояниях. Результатом является оптимальное расположение базовых станций в городе Новосибирск.

**Ключевые слова:** оптимальное размещение, базовые станции, сети 5G, задача целочисленного программирования, потери сигнала.

***OPTIMAL PLACEMENT OF BASE STATIONS IN THE DESIGN OF THE  
FIFTH GENERATION WIRELESS NETWORKS***

***Sergeev A.D.****student,**Russian University of Transport,**Moscow, Russia*

**Abstract:**

This article explores the optimal placement of base stations (BS) in the fifth-generation (5G) networks. A program has been developed to calculate the optimal positioning of base stations in a given area using open data on population density. The calculations are based on the joint application of a mathematical model, which utilizes the reduction to an integer programming problem (IPP), and a model of pass loss at close distances. The result is the optimal placement of base stations in the city of Novosibirsk.

**Keywords:** optimal placement, base stations, 5G networks, integer programming problem, path loss.

Проектирование беспроводных сетей заключается в конфигурировании множества передатчиков для покрытия некоторой целевой области. Под термином «конфигурирование» обычно понимают две задачи: определение оптимального расположения базовых станций и определение оптимальных параметров их работы, таких как частота и мощность [7]. В статье приведён пример решения первой задачи.

Задача определения оптимального расположения базовых станций заключается в выборе подмножества местоположений для базовых станций, которые обеспечивают подключение в целевой области. Целевая область разбивается на элементарные области одинакового размера. Пример такого разбиения изображен на рисунке 1, который использует карты, предоставленные участниками проекта OpenStreetMap, CC-BY-SA [6].

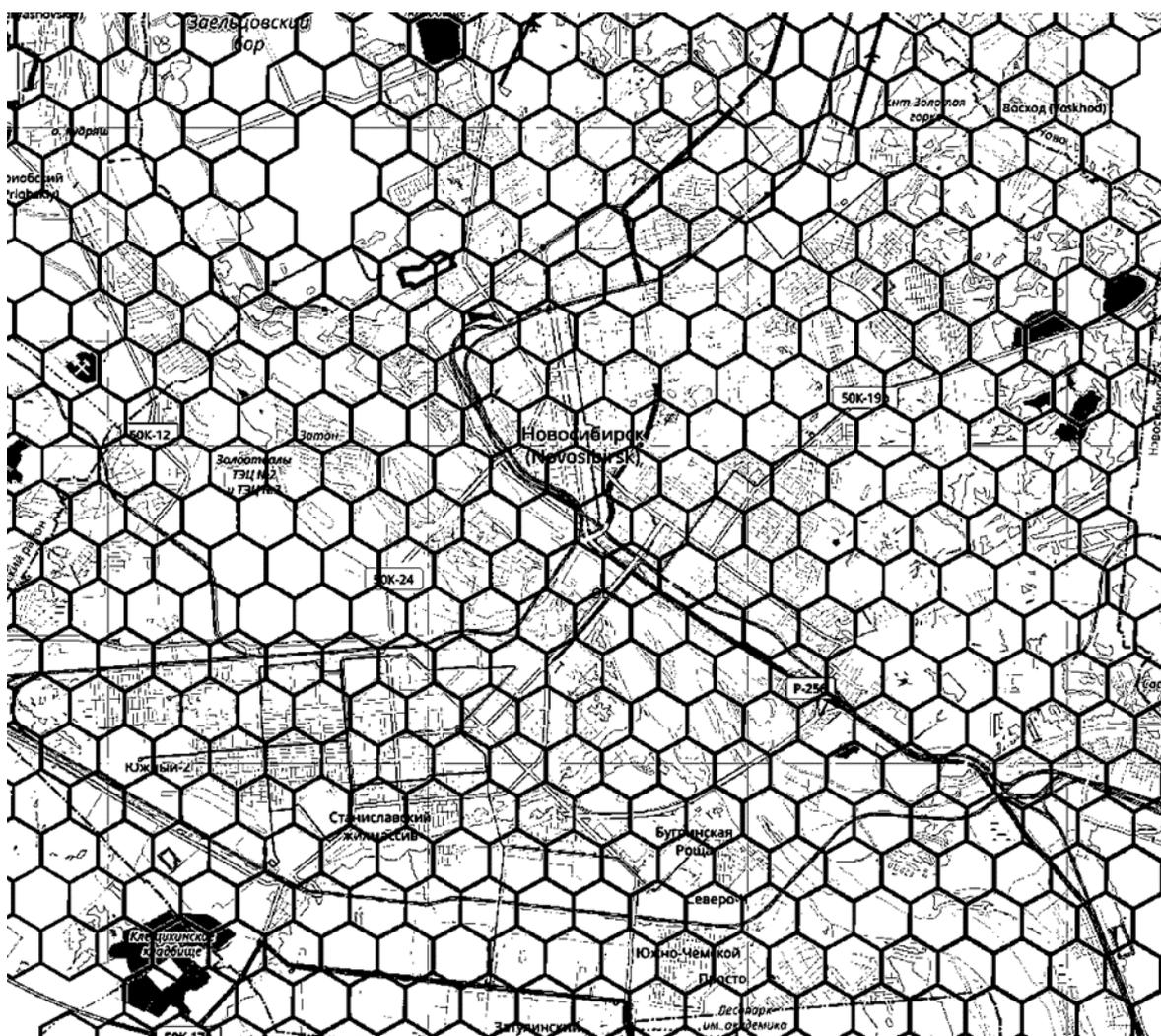


Рис. 1 – Разбиение целевой области в городе Новосибирск на элементарные области одинакового размера

Каждая элементарная область является потенциальной точкой размещения базовой станции и представляет всех потребителей, находящихся на её территории. Каждая элементарная область получает сигнал от всех передатчиков. Элементарная область считается обслуженной, если одна из метрик сигнала в ней выше порогового значения. Рассматриваемая формулировка предполагает, что частота и мощность всех передатчиков одинаковы. Рассмотрим классическую формулировку задачи (подробнее см. [7]).

Пусть  $B$  – множество потенциальных передатчиков и  $T$  – множество приёмников, расположенных в элементарных областях. Введём переменные:

$$z_{\beta} = \begin{cases} 1, & \text{если БС } \beta \text{ активна, } \beta \in B, \\ 0, & \text{в противном случае, } \beta \in B, \end{cases}$$

$$x_{\tau\beta} = \begin{cases} 1, & \text{если приёмник } \tau \text{ обслуживается БС } \beta, \tau \in T, \beta \in B. \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

Качество связи в каждой элементарной области может быть измерено по нескольким критериям. Некоторые из них приведены ниже (подробнее см. [4]).

RSSI – значение полученной силы сигнала (от англ. Received Signal Strength Indication). Измеряется в дБм.

RSRP – средняя мощность полученных пилотных сигналов или уровень получаемого сигнала от БС (от англ. Reference Signal Received Power). Измеряется в дБм.

RSRQ – качество полученных пилотных сигналов (от англ. Reference Signal Received Quality). Измеряется в дБ.

SINR – отношение силы сигнала к сумме шума и помеховой силе других сигналов (от англ. Signal to Interference + Noise Ratio). Измеряется в дБ.

Важно отметить, что для сетей пятого поколения существуют специализированные критерии (см. [5]), такие как SS-RSRP или SS-SINR, однако при решении задачи были сделаны допущения и дальше для определения качества сигнала будет использоваться критерий SINR в классическом определении.

Для всех приёмников  $\tau$ , для которых  $x_{\tau\beta} = 1$ :

$$\frac{a_{\tau\beta} z_{\beta}}{\mu + \sum_{b \in B \setminus \{\beta\}} a_{\tau b} z_b} \geq \delta, \tau \in T, \beta \in B. \quad (1)$$

Здесь  $a_{\tau\beta} > 0$  – измеренная в  $\tau$  мощность сигнала, полученного от БС  $\beta$ .  
 $\delta \geq 0$  – нижняя граница SINR, требуемое качество связи.  $\mu > 0$  – шум в системе.

Можно переписать условие (1) в виде (2):

$$a_{\tau\beta}z_{\beta} - \delta \sum_{b \in B\{\beta\}} a_{\tau b}z_b \geq \delta\mu - M_{\tau\beta}(1 - x_{\tau\beta}), \tau \in T, \beta \in B. \quad (2)$$

Здесь  $M_{\tau\beta}$  – большая положительная константа, например,

$$M_{\tau\beta} = \delta\mu + \delta \sum_{b \in B\{\beta\}} a_{\tau b}.$$

При решении задачи будем рассчитывать на хорошее качество связи, то есть  $\delta > 13$  дБ. Характеристики качества сигнала приведены в таблице 1.

Таблица 1. - Характеристики качества сигнала с использованием SINR

Качество сигнала	SINR (дБ)
Отличное	$\geq 20$
Хорошее	От 13 до 20
Среднее	От 0 до 13
Плохое	$\leq 0$

Ограничение на минимальное покрытие записывается в виде:

$$\sum_{\tau \in T} r_{\tau} \sum_{\beta \in B} x_{\tau\beta} \geq c. \quad (3)$$

Возможны два случая. Если  $r_{\tau} = 1$ , то константа  $c$  представляет собой минимальное число элементарных областей, которое нужно покрыть сигналом. Если  $r_{\tau} \in [0,1)$ , то  $r_{\tau}$  представляет процент населения, проживающий в области приёмника  $\tau \in T$ . В этом случае  $c \in [0,1]$  представляет собой процент населения, которое необходимо покрыть сигналом.

При решении задачи будем использовать второй случай, так как рассчитываем покрыть связью 70% населения.

Каждая элементарная область может быть покрыта максимум одной базовой станцией. Поэтому для каждой элементарной области  $t \in T$  должно выполняться следующее условие:

$$\sum_{\beta \in B} x_{t\beta} \leq 1. \quad (4)$$

Задача состоит в минимизации количества базовых станций:

$$\sum_{\beta \in B} z_{\beta} \rightarrow \min_{x, z}; \quad (x, z) \in S.$$

Здесь  $S = \{(x, z) \in \{0, 1\}^{n+m} : \text{удовлетворяет (2) – (4)}\}$ .

Рассматриваемая задача является задачей целочисленного программирования.

Для нахождения мощности сигнала между отдельными приёмниками и излучателями воспользуемся формулой (см. [10]):

$$a_{t\beta} = W_{\beta} - PL.$$

Здесь  $W_{\beta}$  – мощность излучателя базовой станции, а  $PL(f, d)$  – потери сигнала с расстоянием (от англ. path loss). Важно отметить, что при решении задачи не учитывались препятствия.

Для нахождения потерь сигнала существует множество различных математических моделей, таких как **ABG** (alpha, beta, gamma) или **CI** (close-in) (см. подробнее в [9]). Обе модели имеют сравнимую точность, но модель **CI** проще в использовании, так как имеет всего один физически обоснованный параметр, в то время как **ABG** использует три параметра без физического

обоснования. Модель *CI* показывает лучшую точность на близких расстояниях, что делает её более подходящей для решения описываемой задачи, в которой чаще рассматриваются расстояния менее одного километра.

Исходя из вышеперечисленного, в данной работе используется вторая модель, название которой можно перевести как модель потерь сигнала на близких расстояниях с учётом опорного расстояния в свободном пространстве. Её формула представлена ниже:

$$PL^{CI}(f, d) = FSLP(f, 1m) + 10n \log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{CI}.$$

Здесь  $n$  – константа, получаемая из опытных данных. При решении будем использовать данные компании Nokia (см. [9]).  $\chi_{\sigma}^{CI}$  – стандартное отклонение.  $FSLP(f, 1m)$  – потери сигнала на расстоянии одного метра, вычисляется по формуле:

$$FSLP(f, 1m) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right).$$

Для решения задачи требуются данные о характеристиках базовой станции. Так как большинство иностранных поставщиков телекоммуникационного оборудования прекратили деятельность в России, были использованы характеристики базовой станции разработки «Сколтех». Мощность её излучателя составляет 20 Вт. Проект был реализован при поддержке Фонда НТИ и Минцифры РФ в рамках программы "Цифровая экономика". Базовая станция разработана в соответствии с международными стандартами 3GPP и OpenRAN, поддерживает основные сервисы 5G и обладает высокой скоростью передачи данных. Она поддерживает частотный диапазон, приоритетный для запуска 5G в России, и имеет потенциал для экспорта. Решение Сколтеха становится отправной точкой для развития отечественной телекоммуникационной экосистемы и предлагает преимущества операторам благодаря стандартизации и выбору оборудования. Переговоры с операторами о

развертывании пилотных зон 5G на основе этой разработки уже идут, а запуск проектов планируется на 2023-2024 годы (см. подробнее в [1] и [2]).

Для решения задачи также необходимы данные о плотности населения. Для этого использовался открытый датасет от «HUMANITARIAN DATA EXCHANGE» – одной из организаций Управления ООН по координации гуманитарных вопросов [8]. Датасет представляет собой множество правильных шестиугольников со сторонами 400 метров, для каждого из которых известны координаты и население, проживающее на его площади. Визуализация датасета представлена на рисунке 2, который использует карты, предоставленные участниками проекта OpenStreetMap, CC-BY-SA [6].

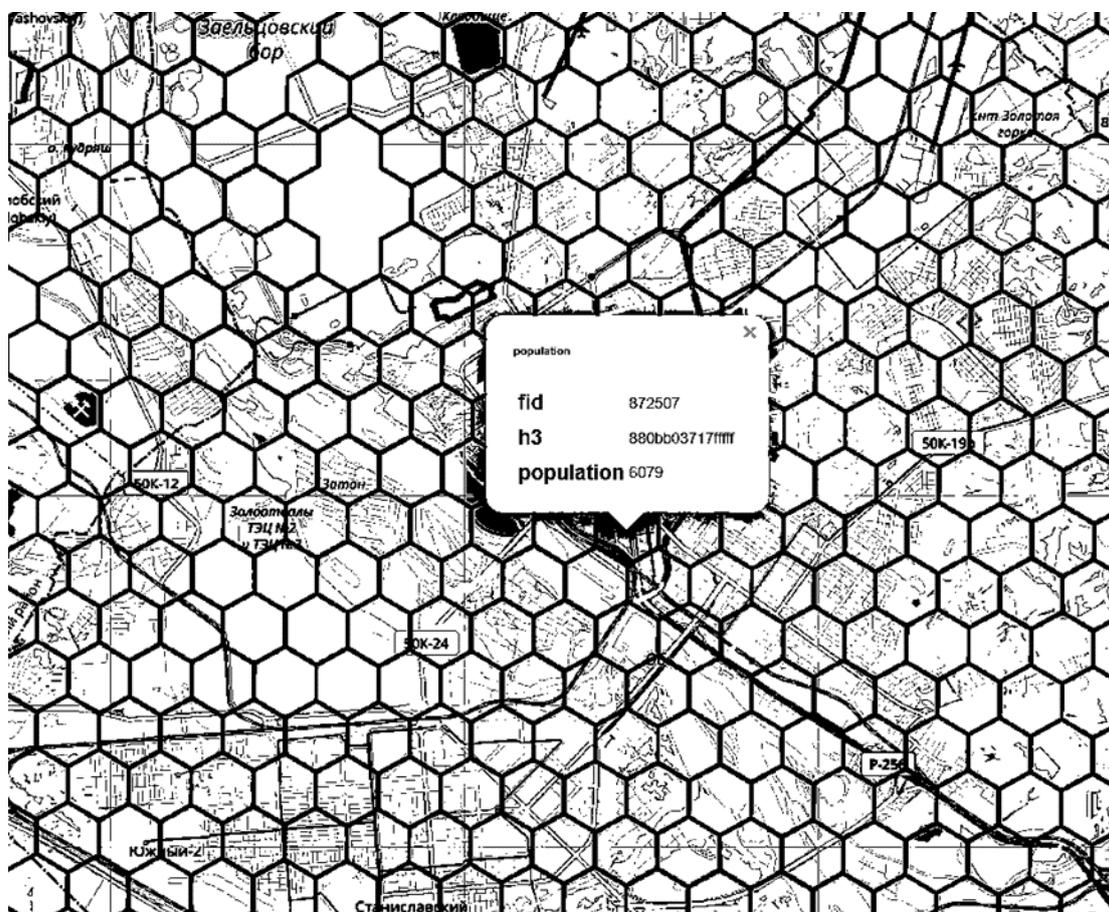


Рис. 2 – Визуализация датасета HUMANITARIAN DATA EXCHANGE

## ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

Результатом работы является программа на языке Python 3, которая может вычислять оптимальное расположение базовых станций на любой территории в границах Российской Федерации. Для решения задачи целочисленного программирования использовался метод ветвей и границ (см. [3]). Алгоритм работы программы изображен на рисунке 3, который является авторским.

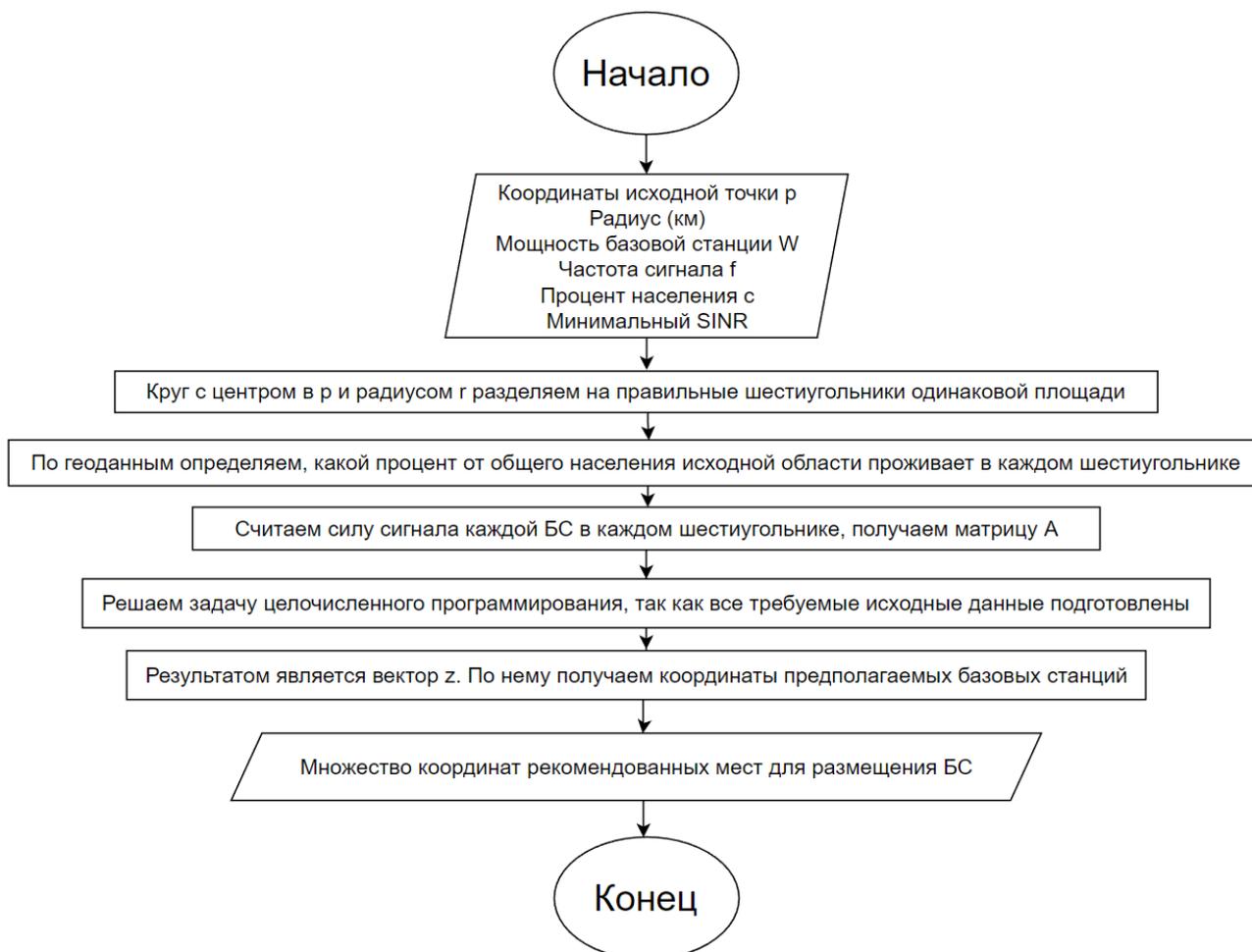


Рис. 3 – Алгоритм работы программы

Был произведен расчёт оптимального расположения базовых станций сетей пятого поколения разработки «Сколтех» в радиусе 20 километров от центра города Новосибирск при частотах 4,4 – 4,5 ГГц.

Из 947 потенциальных точек размещения были задействованы только 34. Результат работы программы представлен на рисунке 4, который использует карты, предоставленные участниками проекта OpenStreetMap, CC-BY-SA [6].

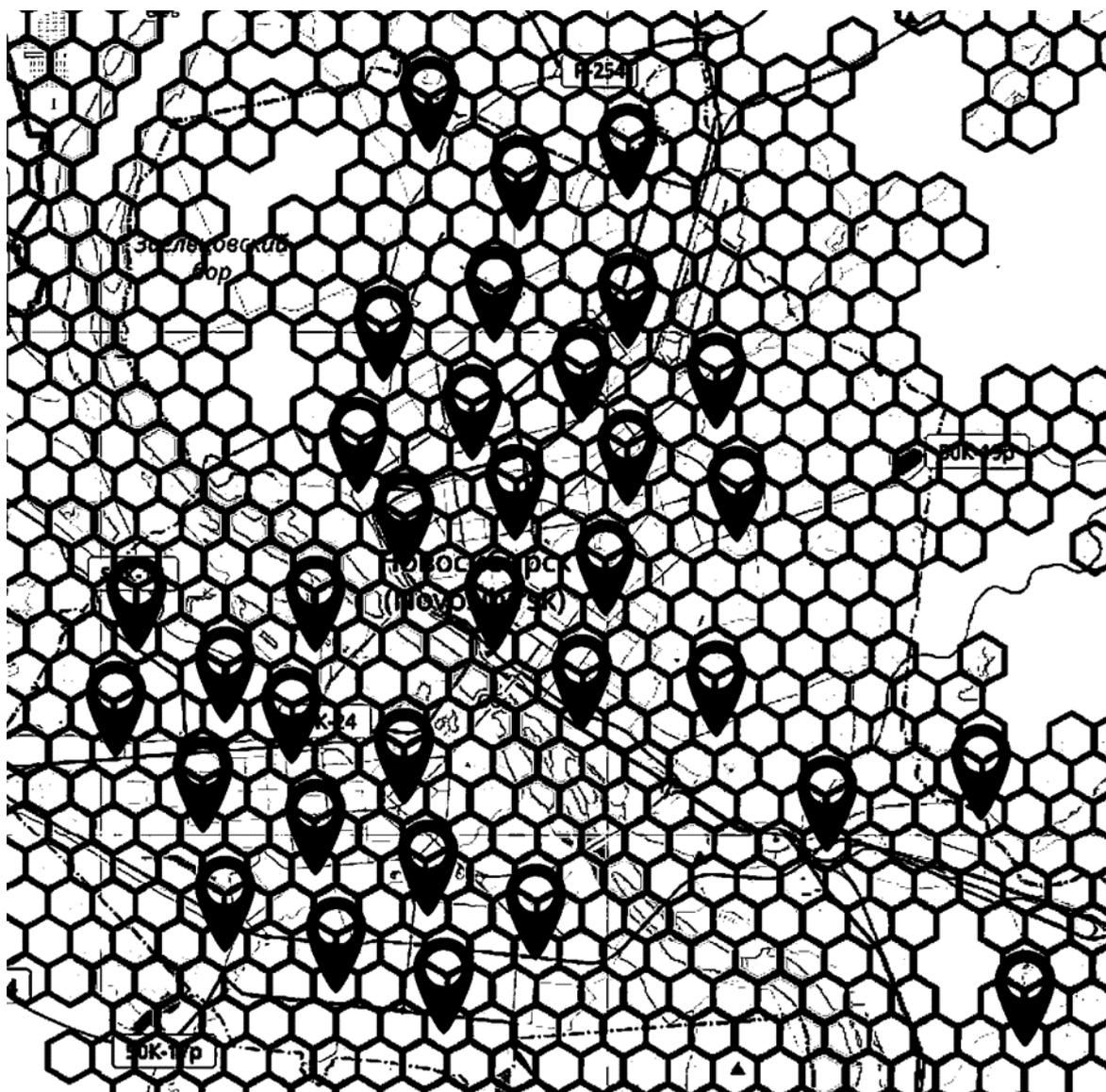


Рис. 4 – Оптимальное расположение БС сетей 5G в городе Новосибирск

В данной работе были использованы вместе две различные математические модели: формулировка ЗЦП для проблемы проектирования беспроводных сетей и модель PL на близких расстояниях с учётом опорного

расстояния в свободном пространстве. Была разработана программа для решения задачи, которая работает с любыми входными данными. Отметим, что при решении были сделаны значительные допущения: при расчёте потерь сигнала не учитывался рельеф.

### Библиографический список

- 1) 5G: «Сделано в Сколтехе» [Электронный ресурс] // сайт Skoltech. URL: <https://www.skoltech.ru/2023/04/5g-sdelano-v-skoltehe/> (дата обращения: 08.04.2023).
- 2) Российские производители и разработчики решений LTE и 5G [Электронный ресурс] // сайт COMNEWS. URL: <https://www.comnews.ru/content/214554/2021-05-27/2021-w21/rossiyskie-proizvoditeli-i-razrabotchiki-resheniy-lte-i-5g> (дата обращения: 05.05.2023).
- 3) Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы: Учеб. пособ. / ФИЗМАТЛИТ. Изд. 2-е, испр. и доп. М., 2007. 304 с.
- 4) 5G signal quality parameters [Электронный ресурс] // сайт Techplayon. Дата обновления: 25.05.2019. URL: <https://support.zyxel.eu/hc/en-us/articles/4406391493778-5G-signal-quality-parameters> (дата обращения: 29.05.2023).
- 5) 5G NR Measurements: RSRP, RSSI, RSRQ and SINR [Электронный ресурс] // сайт Zyxel. URL: <https://www.techplayon.com/5g-nr-measurements-rsrp-rssi-rsrq-and-sinr> (дата обращения: 29.05.2023).
- 6) OpenStreetMap [Электронный ресурс] // сайт OpenStreetMap / Open Street Map Foundation. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 05.05.2023).

## ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

- 7) P. Avella, A. Calamita, L. Palagi, A compact formulation for the base station deployment problem in wireless networks // *Networks*. 2023. С. 1–16.
- 8) Russian Federation: Population Density for 400m H3 Hexagons [Электронный ресурс] // сайт HUMANITARIAN DATA EXCHANGE. URL: <https://data.humdata.org/dataset/kontur-population-russian-federation> (дата обращения: 05.05.2023).
- 9) S. Sun [и др.], Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro- and Macro-Cellular Scenarios // 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Nanjing. 2016, С. 1-6.
- 10) WLAN Network Planning Guide [Электронный ресурс] // сайт Huawei. URL: <https://support.huawei.com/enterprise/ru/doc/EDOC1000113315/c3242b10/power-and-signal-strength> (дата обращения: 29.05.2023).

*Оригинальность 77%*