

УДК 621.39; 537.86

**В. А. Алецкая**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СОТОВОЙ СВЯЗИ  
В ГОРОДЕ СВЕТЛОГОРСКЕ  
НА ОСНОВЕ СЕТИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

5

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия  
Поступила в редакцию 20.02.2022 г.  
Принята к публикации 04.03.2022 г.

**Для цитирования:** *Алецкая В. А. Модернизация системы сотовой связи в городе Светлогорске на основе сети пятого поколения // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки. 2022. №1. С. 5 – 13.*

*Проанализирована существующая сеть сотовой связи в городе Светлогорске. Обоснована целесообразность внедрения сетей пятого поколения. С учетом плотности застройки и рельефа местности выбраны модели распространения сигнала, произведен расчет бюджета радиоканала, радиуса зоны уверенного радиоприема, количества базовых станций. Определено оптимальное расположение базовых станций сотовой связи на территории города Светлогорска.*

**Ключевые слова:** мобильная радиосвязь, сети 5G (пятого поколения), диапазон частот 5G, базовая станция, бюджет радиоканала, радиус зоны уверенного радиоприема

Увеличение числа и динамики пользователей на ограниченной территории, а также внедрение новых услуг ведут к значительному увеличению объема абонентского трафика. Это приводит к снижению качества обслуживания, поскольку существующие системы перестают в полной мере удовлетворять постоянно растущие потребности пользователей. Отсюда следует, что внедрение новых технологий в систему связи и модернизация существующей системы являются актуальной задачей на сегодняшний день.

**Цель** данной работы – моделирование сети связи в городе Светлогорске на основе технологии 5G, которая позволит оснастить город высокоскоростной, надежной мобильной связью с малыми задержками.

При построении сети 5G должны учитываться сети уже существующих стандартов. Необходимо произвести оценку имеющейся системы



сотовой связи в Светлогорске. Для проведения анализа выбраны четыре оператора, являющиеся лидерами рынка мобильной связи: «МТС», «МегаФон», «Билайн» и «Tele2».

Услугами «МТС» пользуется более 100 млн абонентов. Компания имеет большую розничную сеть и насчитывает около 6 тыс. торговых точек. Сети 3G и 4G оператора МТС охватывают большую часть территории города Светлогорска, а именно жилые зоны, поселки, центр города. В Светлогорске насчитывается 5 базовых станций МТС [1].

«МегаФон» — оператор, сочетающий разнообразные предложения для различных типов абонентов. Данный провайдер насчитывает около 76 млн российских абонентов. Как и предыдущий оператор, «МегаФон» покрывает своими сетями большую часть Светлогорска. В зонах густой и высокой растительности наблюдается отсутствие сети. Покрытие 4G до 150 Мбит/с охватывает только центр города. Насчитывается 8 базовых станций компании «МегаФон», благодаря которым обеспечивается связь четвертого поколения [1].

«Билайн». Данный провайдер предоставляет своим клиентам особую выгоду от использования услуг мобильной связи, а также интернета, так как компания имеет самое большое число стран-партнеров в роуминге. В России количество подключенных абонентов превышает 60 млн. По сравнению с предыдущими двумя операторами покрытие города сетями 3G и 4G «Билайн» хуже. На территории города расположено 8 базовых станций LTE данной компании [1].

«Tele2» занял свое место в четверке лидеров недавно и насчитывает около 40 млн абонентов. Высокоскоростное интернет-соединение и недорогие тарифы с доступом к глобальной сети являются отличительными чертами оператора. Сети 3G и 4G «Tele2» почти полностью покрывают территорию Светлогорска, насчитывается 5 базовых станций LTE [1].

Таким образом, Светлогорск обладает неплохим покрытием сетями третьего и четвертого поколения. Однако в связи с активным развитием технологий существующая связь в городе не способна в полной мере удовлетворить растущие потребности пользователей. Применение технологии 5G позволит обеспечить город Светлогорск высокоскоростной надежной мобильной связью с малыми задержками.

На сегодняшний день различают три основных диапазона 5G: низкочастотный (Low-band), среднечастотный (Mid-band) и высокочастотный (High-band) [2].

1. Низкочастотный диапазон: частоты ниже 1 ГГц. Базовая станция с низкой полосой пропускания может покрывать сотни квадратных миль и обеспечивать скорость передачи данных по нисходящему каналу от 30 до 75 Мбит/с. Низкочастотные сигналы легко проходят через здания и обеспечивают надежное покрытие внутри и снаружи помещений. Широкая зона покрытия низкочастотного диапазона дает возможность создать основу для Интернета вещей (IoT).

2. Среднечастотный диапазон: частоты 1–6 ГГц. Волны средней длины обеспечивают баланс между скоростью и дальностью действия,



покрывая большую территорию с высокой скоростью. Радиус действия базовой станции — от сотен метров до 2 км. Базовые станции 5G среднего диапазона могут передавать и принимать сигналы высокой пропускной способности на довольно больших территориях. Скорость загрузки около 115–223 Мбит/с для основной части трафика 5G в городских районах.

Говоря про диапазоны 5G, можно встретить такое выражение, как «золотой диапазон», подразумевающее диапазон частот 3,4–3,8 ГГц [2]. В настоящее время в России данный диапазон занят спецслужбами. В связи с этим для развертывания сетей 5G в России выделен частотный диапазон 4,7–4,9 ГГц.

3. Высокочастотный диапазон: частоты миллиметрового диапазона (mmWave) от 6 до 100 ГГц. Короткие волны покрывают небольшую площадь и способны к сверхбыстрой передаче данных. Радиус действия передатчика — не более 200 м. Работая в меньшем радиусе, он особенно полезен в местах массового скопления людей. Высокочастотный диапазон может одновременно обеспечивать большое количество высокоскоростных соединений, сосредоточенных на площади всего в один или два квартала, с небольшой сотовой станции, расположенной близко к уровню улицы. Высокочастотный диапазон чувствителен к таким нюансам, как здания, листва деревьев, погодные условия.

Для города Светлогорска характерно наличие густой растительности, высота которой может достигать 35 м, и холмистый рельеф. Высота зданий варьируется от 5 до 35 м.

По итогам анализа особенностей частотных диапазонов 5G и специфики местности города на проектируемой территории решено использовать среднечастотный диапазон 4,8–4,9 ГГц.

Базовые станции 5G состоят из активной антенной системы (active antenna system — AAS) и модуля основной полосы частот (baseband unit — BBU) [3]. Среди преимуществ активных антенных систем — наличие встроенного радиомодуля, адаптивное формирование луча, использование Massive MIMO, излучение на малых мощностях. Для проектируемой территории решено использовать активную антенную систему AAU5613 и модуль основной полосы частот BBU5900 от компании Huawei. Данное оборудование по своим характеристикам удовлетворяет требованиям и работает в выбранном диапазоне частот.

Чтобы покрыть город Светлогорск сетью пятого поколения, необходимо произвести расчет бюджета радиоканала, моделей распространения сигнала, радиуса зон покрытия базовой станции, количества базовых станций и радиуса зоны обслуживания базовой станции [4; 5]. Расчет производится для зон 1 и 2 исследуемой территории. Зона 1 охватывает центр города, соответственно, для нее характерна городская застройка. Эта зона представляет собой территорию с более высокой плотностью населения. Для зоны 2 характерна малоэтажная застройка с преобладанием частного сектора. Деление территории на зоны представлено на рисунке 1.

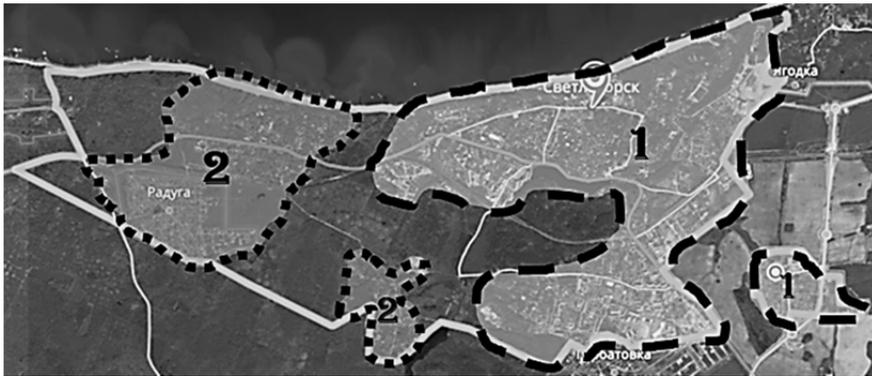


Рис. 1. Деление территории Светлогорска на две зоны

Расчеты проводились для метода модуляции 64QAM. В этом случае рассчитанные значения радиуса зоны покрытия и радиуса зоны обслуживания практически совпадают.

Для определения радиуса зоны покрытия базовой станции необходимо решить первое уравнение связи (1). Для этого найдем максимально допустимые потери на трассе распространения радиосигнала, то есть вычислим бюджет радиоканала:

$$L_{\text{МДП}} = PL(R), \quad (1)$$

где  $L_{\text{МДП}}$ , дБ – максимально допустимые потери на трассе;  $PL(R)$ , дБ – модель распространения радиосигнала, описывающая затухание.

Бюджет радиоканала рассчитывается по формуле (2) из значений эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ) на выходе антенны передатчика ( $Tx_{\text{ЭИИМ}}$ , дБм) (3); минимально необходимого уровня мощности на входе приемника ( $Rx_{\text{мин}}$ , дБм); потерь в системе, среди которых различают потери на проникновение в здание ( $L_3 = 17$  дБ – для зоны 1;  $L_3 = 12$  дБ – для зоны 2), потери в растительности ( $L_p = 8,5$  дБ), потери в осадках ( $L_o = 0$  дБ), потери в теле человека ( $L_c = 3$  дБ), запас на потери, обусловленные медленными замираниями ( $L_{\text{МЗ}} = 7$  дБ – для зоны 1;  $L_{\text{МЗ}} = 6$  дБ – для зоны 2), и запас на интерференцию (DL:  $L_u = 2$  дБ; UL:  $L_u = 6$  дБ) [4]:

$$L_{\text{МДП}} = Tx_{\text{ЭИИМ}} - Rx_{\text{мин}} - L_3 - L_p - L_o - L_c - L_{\text{МЗ}} - L_u, \quad (2)$$

$$Tx_{\text{ЭИИМ}} = Tx_{\text{пер}} + 10 \cdot \log(N_{Tx}) - B_{Tx} + G_{Tx} + G_{\text{фл}}, \quad (3)$$

где  $Tx_{\text{пер}}$ , дБм – мощность излучения, приходящаяся на одну антенну (DL: 35 дБм; UL: 23 дБм);  $N_{Tx}$  – количество антенн передатчика (DL:  $N_{Tx} = 64$ ; UL:  $N_{Tx} = 4$ );  $B_{Tx}$ , дБ – потери в передатчике (DL: 1 дБ; UL: 0 дБ);  $G_{Tx}$ , дБи – коэффициент усиления антенны передатчика (DL: 24 дБи; UL: 0 дБи);  $G_{\text{фл}}$ , дБ – выигрыш в усилении благодаря технологии формирования луча (10 дБ) [6].



Зная значения чувствительности приемника ( $R_x$ , дБм) (4), числа антенн приемника ( $N_{Rx} = 64$ ), коэффициента усиления антенны приемника ( $G_{Rx} = 24$  дБи) и потерь в приемнике ( $B_{Rx} = 1$  дБ), найдем  $R_{x_{мин}}$  по формуле (5) [6]:

$$R_x = NF + TN + SINR = NF - 174 + 10 \cdot \log(\Delta F) + SINR, \quad (4)$$

$$R_{x_{мин}} = R_x - 10 \cdot \log(N_{Rx}) - G_{Rx} + B_{Rx}, \quad (5)$$

где  $NF$ , дБ – коэффициент шума (DL: 7 дБ; UL: 3,5 дБ);  $TN$ , дБ – тепловой шум;  $SINR$  – соотношение сигнал / шум и интерференция (DL: 13 для 64QAM; UL: 13 для 64QAM);  $\Delta F$ , Гц – ширина полосы используемых частот (DL: 16,2 МГц; UL: 98,28 МГц).

Для расчета модели затухания при распространении сигнала обратимся к рекомендации 3GPP TS 38.901. Для зоны 1 выбрана модель распространения для городской застройки, которая рассчитывается по формуле (6). Модель распространения для зоны 2 рассчитывается по формуле (7).

$$PL1_{NLOS}(R_{3,n}) = 13,54 + 39,08 \cdot \lg(\sqrt{R_{3,n}^2 + (h_{bc} + h_{ac})^2}) + 20 \lg(f_c) - 0,6 \cdot (h_{ac} - 1,5), \quad (6)$$

$$PL2_{NLOS}(R_{3,n}) = 161,04 - 7,1 \cdot \lg(W) + 7,5 \cdot \lg(h) - (24,37 - 3,7 \cdot (\frac{h}{h_{bc}})^2) \cdot \lg(h_{bc}) + (43,42 - 3,1 \cdot \lg(h_{bc})) \cdot (\lg(\sqrt{R_{3,n}^2 + (h_{bc} + h_{ac})^2}) - 3) + 20 \lg(f_c) - (3,2 \cdot (\lg(11,75 \cdot h_{ac}))^2 - 4,97), \quad (7)$$

где  $h_{bc}$ , м – высота БС;  $h_{ac}$ , м – высота абонентской станции;  $f_c$ , ГГц – выбранная частота проектируемой сети;  $W$ , м – средняя ширина улиц;  $h$ , м – средняя высота зданий;  $R_{3,n}$ , м – радиус зоны покрытия БС.

Упростим формулы (6) и (7), применим формулу (1) и выразим радиус зоны покрытия БС для зоны 1 (8) и зоны 2 (9).

Для зоны 1:  $h_{bc} = 25$  м;  $h_{ac} = 1,5$  м:

$$R_{3,n} = \sqrt{(10^{\frac{L_{MPP} - 27,25}{39,08}})^2 - (h_{bc} - h_{ac})^2}. \quad (8)$$

Для зоны 2:  $h_{bc} = 35$  м;  $h_{ac} = 1,5$  м;  $h = 5$  м;  $W = 20$  м:

$$R_{3,n} = \sqrt{(10^{\frac{L_{MPP} - 26,54}{38,63}})^2 - (h_{bc} - h_{ac})^2}. \quad (9)$$

Для определения количества базовых станций и радиуса зоны обслуживания необходимо рассчитать максимальную пропускную способность базовой станции ( $NT_{макс}$ ) (10) и среднюю пропускную способность сети ( $NT$ ) (11).

$$NT_{макс}, \text{ Мбит} / \text{с} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left[ \nu \cdot Q_m \cdot f \cdot R_{макс} \cdot \frac{N_{PBR} \cdot 12}{T_S^\mu} \cdot (1 - OH) \right], \quad (10)$$

где количество сгенерированных несущих  $J = 1$ ; количество потоков ММО  $\nu = 4$ ;  $Q_m$  – порядок модуляции (6 – 64QAM); масштабируемый



фактор  $f=1$ ; количество ресурсных блоков для выбранной полосы частот и нумерологии ( $\mu=1$ )  $N_{PBR}=273$ ; максимальная скорость кодирования  $R_{max}=0,926$ ; 12 – количество поднесущих в ресурсном блоке; средняя длительность OFDM-символа для данного значения нумерологии для нормального циклического префикса  $T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$ ; доля ресурсов, занимаемых каналами управления, для нисходящей линии (DL)  $OH=0,14$  и восходящей линии (UL)  $OH=0,08$  [5]:

$$NT = TU \cdot \sum SUT, \quad (11)$$

где  $TU$  – общее количество пользователей, пользующееся сотовой связью (8000 чел.);  $SUT$  – средняя пропускная способность одного пользователя (12);

$$SUT = \frac{T_{min} \cdot BHSA \cdot PR \cdot (1 + PAR)}{3600}, \quad (12)$$

где  $T_{min}$  – минимальная пропускная способность, обеспечивающая необходимое качество обслуживания для определенной услуги (13);  $BHSA$  – занятость часового обслуживания;  $PAR$  – отношение максимального значения к среднему значению загрузки канала;  $PR$  – уровень проникновения услуги; 3600 – временной интервал (один час);

$$T_{min} = ST \cdot SDR \cdot BR \cdot \left( \frac{1}{1 - BLER} \right), \quad (13)$$

где  $ST$  – средняя продолжительность услуги;  $SDR$  – коэффициент использования услуги;  $BR$  – скорость передачи данных услуги;  $BLER$  – вероятность блочной ошибки.

Проектируемая сеть нацелена на оказание следующих видов услуг: передача речи, мультимедиа, файлов, текстовых сообщений, видеоконференцсвязь, использование веб-браузера. Значения необходимых параметров для расчета представлены в таблице 1 [7].

Таблица 1

Параметры услуг

| Услуга           | BHSA | PR, % | PAR, % | link | ST   | SDR  | BR, Мбит/с | BLER, % |
|------------------|------|-------|--------|------|------|------|------------|---------|
| Речь             | 0,1  | 1     | 20     | DL:  | 120  | 0,6  | 0,03       | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 120  | 0,6  | 0,03       |         |
| Видеоконференция | 0,2  | 10    | 20     | DL:  | 3600 | 0,3  | 1          | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 3600 | 0,3  | 1          |         |
| Мультимедиа      | 1    | 30    | 20     | DL:  | 3600 | 0,35 | 1,25       | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 3600 | 0,35 | 0,5        |         |
| Веб-браузер      | 2    | 80    | 20     | DL:  | 1800 | 0,05 | 0,25       | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 1800 | 0,05 | 0,062      |         |
| Передача файлов  | 0,2  | 20    | 20     | DL:  | 300  | 0,7  | 0,75       | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 300  | 0,7  | 0,14       |         |
| Сообщения        | 1    | 50    | 20     | DL:  | 300  | 0,7  | 0,75       | 1       |
|                  |      |       |        | UL:  | 300  | 0,7  | 0,141      |         |

Количество базовых станций для каждой из зон определим по формуле

$$N_{\text{бс}} = \frac{NT}{NT_{\text{макс}}} + 1. \quad (14)$$

Радиус зоны обслуживания (16) выведем из формулы площади территории (15), обслуживаемой одной базовой станцией:

$$S_{\text{бс}} = \frac{S_3}{N_{\text{бс}}} = \pi R_{3,\text{об}}^2, \quad (15)$$

$$R_{3,\text{об}} = \sqrt{\frac{S_{\text{бс}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{S_3}{N_{\text{бс}} \cdot \pi}}, \quad (16)$$

где  $S_3$  – площадь зоны 1 или зоны 2 ( $S_{31} = 8,1 \text{ км}^2$ ;  $S_{32} = 4,4 \text{ км}^2$ ).

Основные результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Результаты расчетов

| Параметр              | DL/UL | Зона 1 | Зона 2 |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| $L_{\text{мдп}}$ , дБ | DL    | 127,5  | 133,5  |
|                       | UL    | 120    | 126    |
| $R_{3,\text{п}}$ , м  | DL    | 360    | 580    |
|                       | UL    | 230    | 370    |
| $N_{\text{бс}}$       | DL    | 68     | 30     |
|                       | UL    | 145    | 63     |
| $R_{3,\text{об}}$ , м | DL    | 196    | 218    |
|                       | UL    | 133    | 149    |

Таким образом, радиус зоны радиопокрытия базовой станции, при котором будет обеспечен приемлемый уровень сигнала для зоны 1, равен 133 м, а для зоны 2 – 149 м. Для обеспечения оптимального покрытия сетью 5G зоны 1 необходимо 145 базовых станций, а для зоны 2 – 63 базовые станции.

Размещение базовых станций на территории Светлогорска производилось на основании полученных расчетов (рис. 2).

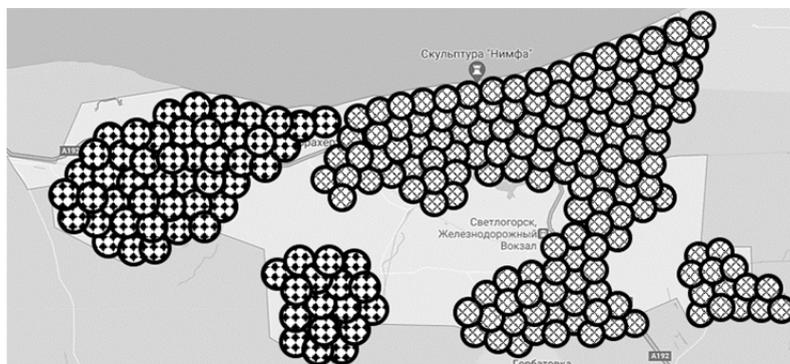


Рис. 2. Расположение БС на территориях зоны 1 и зоны 2:

⊗ – базовая станция зоны 1; ⊕ – базовая станция зоны 2



Покрытие спроектированной сети пятого поколения способно обеспечивать хороший уровень сигнала на исследуемой территории.

**Таким образом,** сформировано предложение по развитию системы сотовой связи на основе сети пятого поколения, способное обеспечить город Светлогорск качественной связью. Исходя из расчетов бюджета радиоканала, радиуса зоны покрытия, пропускной способности сети, радиуса зоны обслуживания определено количество и расположение базовых станций на территории города (рис. 2): 145 базовых станций, работающих в диапазоне 4,8–4,9 ГГц, с радиусом зоны радиопокрытия 133 м на территории зоны 1; 63 базовые станции, работающие в диапазоне 4,8–4,9 ГГц, с радиусом зоны радиопокрытия 149 м на территории зоны 2.

#### Список литературы

1. *Карта расположения базовых станций* // CellMapper. URL: <https://www.cellmapper.net> (дата обращения: 12.02.2022).
2. *Степунин А. Н., Николаев А. Д.* Мобильная связь на пути к 6G. 3-е изд. М.; Вологда, 2021. Т. 2.
3. *5g ultra lean site* // Huawei. URL: [https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019pdf\\_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper\\_en.pdf](https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019pdf_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper_en.pdf) (дата обращения: 12.02.2022).
4. *Рекомендации 3GPP; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TS 38.901-g10.* URL: [https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38\\_series/38.901/38901-g10.zip](https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38_series/38.901/38901-g10.zip) (дата обращения: 12.02.2022).
5. *Рекомендации 3GPP; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TS 38.306-g10.* URL: [https://www.3gpp.org/FTP/Specs/archive/38\\_series/38.306/38306-g10.zip](https://www.3gpp.org/FTP/Specs/archive/38_series/38.306/38306-g10.zip) (дата обращения: 12.02.2022).
6. *Huawei AAU5613 Technical Specifications*, 2020.
7. *Ryan Rasyid Yusuf, Uke Kurniawan Usman, Yuyun Siti Rohmah.* Planning analysis of the expansion LTE and LTE-A network in garut district // e-Proceeding of Engineering – School of Electrical Engineering. 2018. Vol. 5, №1. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7888/0c55acb0e3a049c3ad4682a1def3db0e8e1b.pdf> (дата обращения: 12.02.2022).

#### Об авторе

Виктория Александровна Алецкая – студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: VAletskaia@stud. kantiana.ru

*V. A. Aletskaya*

### MODERNIZATION OF THE CELLULAR COMMUNICATION SYSTEM IN THE CITY OF SVETLOGORSK BASED ON THE FIFTH GENERATION NETWORK

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 20 February 2022

Accepted 03 April 2022

**To cite this article:** Aletskaya V.A. 2022, Modernization of the cellular communication system in the city of Svetlogorsk based on the fifth generation network, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Physical-mathematical and technical sciences*, №1. P. 5–13.



*Analyzed the existing cellular network in the city of Svetlogorsk. The expediency of introducing fifth generation networks is substantiated. Taking into account the building density and terrain, signal propagation models were selected, the radio channel budget, the radius of the zone of reliable radio reception, and the number of base stations were calculated. The optimal location of cellular base stations in the city of Svetlogorsk has been determined.*

**Keywords:** mobile radio communication, 5G networks (fifth generation), 5G frequency range, base station, radio channel budget, radius of the reliable radio reception zone

#### **The author**

Victoria A. Aletskaya, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: VAletskaya@stud.kantiana.ru