

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_40

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ В РАЙОНАХ С РЕЗКИМИ ПЕРЕПАДАМИ ВЫСОТ
И НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ ГЕОГРАФИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ
В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ**

**METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE LOCATIONS
OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT IN AREAS WITH SUDDEN CHANGES
IN ALTITUDE AND UNFAVORABLE GEOGRAPHICAL FACTORS
IN A COMPLEX ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT**

Канд. техн. наук А.В. Галандзовский, канд. техн. наук Е.В. Куценко, С.В. Соловьев

Ph.D. A.V. Galandzovskiy, Ph.D. E.V. Kutsenko, S.V. Soloviev

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Развитие крупных городов и промышленных центров обуславливает наличие сложной электромагнитной обстановки (ЭМО). При этом обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) уже эксплуатирующихся с вновь размещаемыми радиоэлектронными средствами (РЭС) методом пространственно-частотного разнесения не всегда становится возможным. В этом случае могут потребоваться дополнительные меры по обеспечению ЭМС РЭС. Разработаны методика и программный комплекс построения зон пространственной доступности, которые позволяют оперативно решать задачи выбора рациональных мест размещения РЭС в условиях сложной ЭМО, наличия резких перепадов высот и зон с нежелательными географическими факторами. Приведен пример применения разработанной методики для обоснования мест размещения высокоскоростных радиорелейных линий связи для управления мобильными формированиями в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сложная электромагнитная обстановка, растровое изображение карты высот, цифровая 3D-карта высот местности, зона пространственной доступности, высокоскоростные радиорелейные линии связи.

The development of large cities and industrial centers leads to the presence of a complex electromagnetic environment. At the same time, it is not always possible to ensure electromagnetic compatibility of those already in operation with newly deployed radio-electronic equipment using the space-frequency diversity method. In this case, additional measures may be required to ensure the electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. A methodology and software package for constructing spatial accessibility zones have been developed, which make it possible to quickly solve the problems of choosing rational locations for radio-electronic equipment in a complex electromagnetic environment, the presence of sudden height differences and areas with undesirable geographical factors. An example of the application of the developed methodology to substantiate the locations of high-speed radio relay communication lines for the management of mobile formations in areas of natural disasters and man-made disasters is given.

Keywords: electromagnetic compatibility, complex electromagnetic environment, bitmap image of the height map, digital 3D-terrain elevation map, spatial accessibility zone, radio relay communication lines.

Активное развитие общественно-деловой инфраструктуры и прилегающих пространств вблизи развивающихся промышленных центров и крупных городов, сопровождается ежегодным приростом вновь размещаемых радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения на 5–8 % [1, 2]. Следствием такого развития является изменение электромагнитной обстановки (ЭМО), и с течением времени она будет становиться более сложной. Кроме того, в некоторых случаях на усложнение ЭМО будет влиять несанкционированное изменение штатных режимов функционирования и технических характеристик (мощности излучения, диапазонов частот) уже эксплуатирующихся РЭС различного назначения в пределах их технических возможностей.

В этих условиях обеспечение непрерывного функционирования вновь размещаемых наземных РЭС вблизи с эксплуатирующимися РЭС посредством исключения взаимного воздействия как источников непреднамеренных помех становится особенно важной задачей. Однако, в качестве основного подхода для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС уже на этапах их эскизного и (или) технического проектирования рассматривается метод пространственно-частотного разнесения и задаются конкретные конструкторские решения. При этом прогнозировать степень изменения ЭМО для каждого конкретного места планируе-

мого размещения РЭС на весь период его разработки не всегда представляется возможным, а уже реализованные конструкторские решения на этапе эксплуатации РЭС могут стать недостаточными. В этом случае к уже обоснованным конструкторским решениям могут потребоваться дополнительные меры обеспечения ЭМС.

Так, в некоторых случаях, исключить воздействие непреднамеренных помех становится возможно, если при выборе конкретного места размещения наземного РЭС дополнительно учитывать особенности рельефа местности. Например, принятие таких дополнительных мер позволит обеспечить непрерывное и беспомеховое функционирование вновь размещаемых РЭС с учетом возможного нахождения поблизости уже эксплуатирующихся РЭС государственного значения, функционирование которых является приоритетным (рис. 1). Поэтому вопросы, рассматриваемые в статье и посвященные разработке методики обоснования мест размещения РЭС в окрестностях уже эксплуатирующихся РЭС с резкими перепадами высот и неблагоприятными географическими факторами (повышенная сейсмическая активность, болотистый или пустынный климат и др.) в условиях динамично изменяющейся ЭМО, являются актуальными.

С целью принятия дополнительных мер по обеспечению ЭМС для вновь разворачиваемых РЭС и для решения задач по выбору рационального места их размещения Z^* в окрестностях

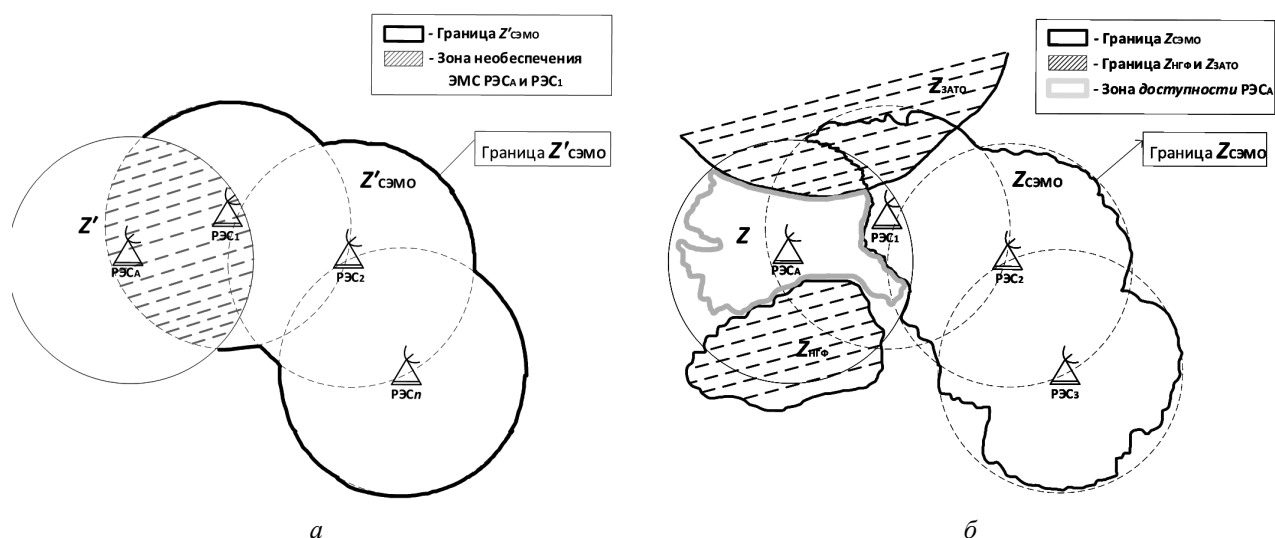


Рис. 1. Места размещения вновь разворачиваемых РЭС в окрестностях уже эксплуатирующихся РЭС:
а — без учета дополнительных мер; б — с учетом дополнительных мер

уже эксплуатирующихся РЭС $Z_{\text{СЭМО}}$ с учетом наличия закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО) $Z_{\text{ЗАТО}}$, зон с неблагоприятными географическими факторами (НГФ), заповедных зон и т.п. $Z_{\text{НГФ}}$, была разработана методика определения зоны Z_A , схема которой представлена на рис. 2.

В основе определения зоны рационального размещения РЭС лежат расчеты, проводимые на основании общедоступных методик [3, 4]. Построение зон пространственной доступности для любых приемо-передающих РЭС должно осуществляться с использованием карт высот местности. Автоматизация проводимых расчетов возможна с использованием цифровых карт высот местности существующих геоинформационных систем (ГИС «Оператор», ГИС «Панорама», ГИС «Spatial Manager») и должна существенно упростить построение зон простран-

ственной доступности $Z_{\text{СЭМО}}$ и Z_A [5–7]. Однако, в большинстве случаев использование цифровой матрицы высот местности существующих геоинформационных систем не представляется возможным или осуществляется на платной основе. Поэтому был разработан программный комплекс построения зон пространственной доступности любых приемо-передающих РЭС, алгоритм которого представлен на рис. 3.

Разработанный алгоритм состоит из пяти последовательно выполняемых шагов. На первом шаге вводятся исходные данные, состоящие из двух групп. В первую группу входят тактико-технические характеристики (ТТХ) из эксплуатационной и технической документации эксплуатирующихся и вновь размещаемых РЭС:

– центральная частота передатчика эксплуатирующегося и приемников вновь размещаемых РЭС f , в МГц;

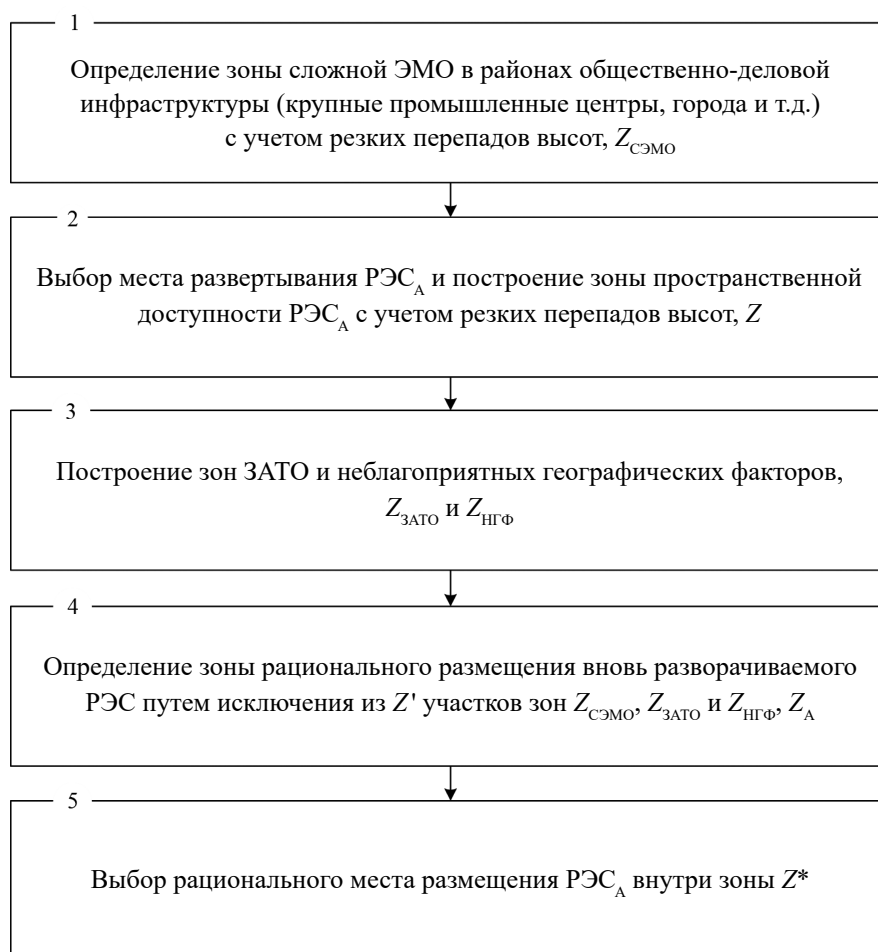


Рис. 2. Методика обоснования мест размещения РЭС в районах с резкими перепадами высот и неблагоприятными географическими факторами в условиях сложной электромагнитной обстановкой

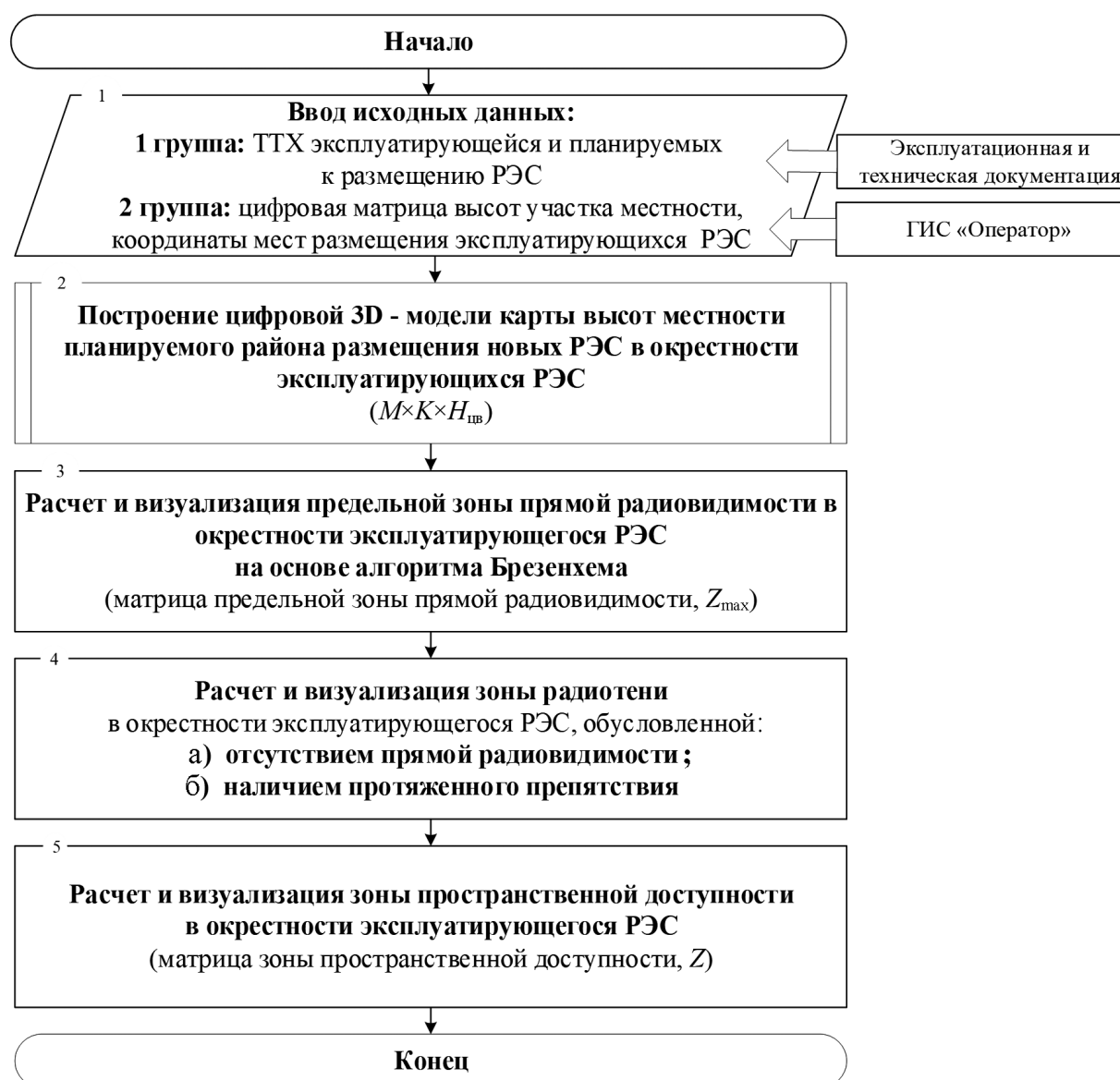


Рис. 3. Алгоритм построения зон пространственной доступности

– высота подъема антенны передатчика эксплуатирующегося РЭС над подстилающей поверхностью, h_{m0} , в км;

– высота подъема антенны приемника вновь размещаемых РЭС над подстилающей поверхностью, h_{n0} , в км;

– высота подстилающей поверхности над уровнем моря в месте эксплуатирующегося РЭС, Δh_m , в км;

– высота подстилающей поверхности над уровнем моря в месте размещения вновь размещаемых РЭС, Δh_n , в км;

– минимальная высота подстилающей поверхности над уровнем моря на трассе распространения передатчик-приемник РЭС, h_0 , в км.

Вторая группа исходных данных содержит карту планируемого района размещения РЭС и координаты мест размещения передатчика эксплуатирующегося РЭС.

Под картой понимается элемент электронной карты — цифровая матрица высот в виде растрового 256-цветного изображения формата BMP (от англ. Bitmap Picture) [7, 8]. В качестве источника карты может быть выбрана ГИС

«Оператор». Данная ГИС является некоммерческой, реализована на русском языке, удобна в эксплуатации.

Вторая группа исходных данных необходима для построения цифровой 3D-модели карты высот местности планируемого района развертывания вводимых в эксплуатацию РЭС. В основе построения цифровой 3D-модели карты высот местности лежит подход по установлению соответствия цвету каждого пикселя растрового изображения карты численного значения высоты, пояснения к которому представлены на рис. 4.

На втором шаге алгоритма осуществляется построение 3D-модели карты высот местности. В основе подхода к ее построению лежат:

– аналитическое выражение для нахождения в цветовой декартовой RGB-системе координат всех возможных расстояний между координатами цвета рассматриваемого i -го

пикселя и координатами всех N цветов шкалы высот $H_{\text{цв}}$:

$$\Delta r_{ni} = \sqrt{(R_n - R_i)^2 + (G_n - G_i)^2 + (B_n - B_i)^2},$$

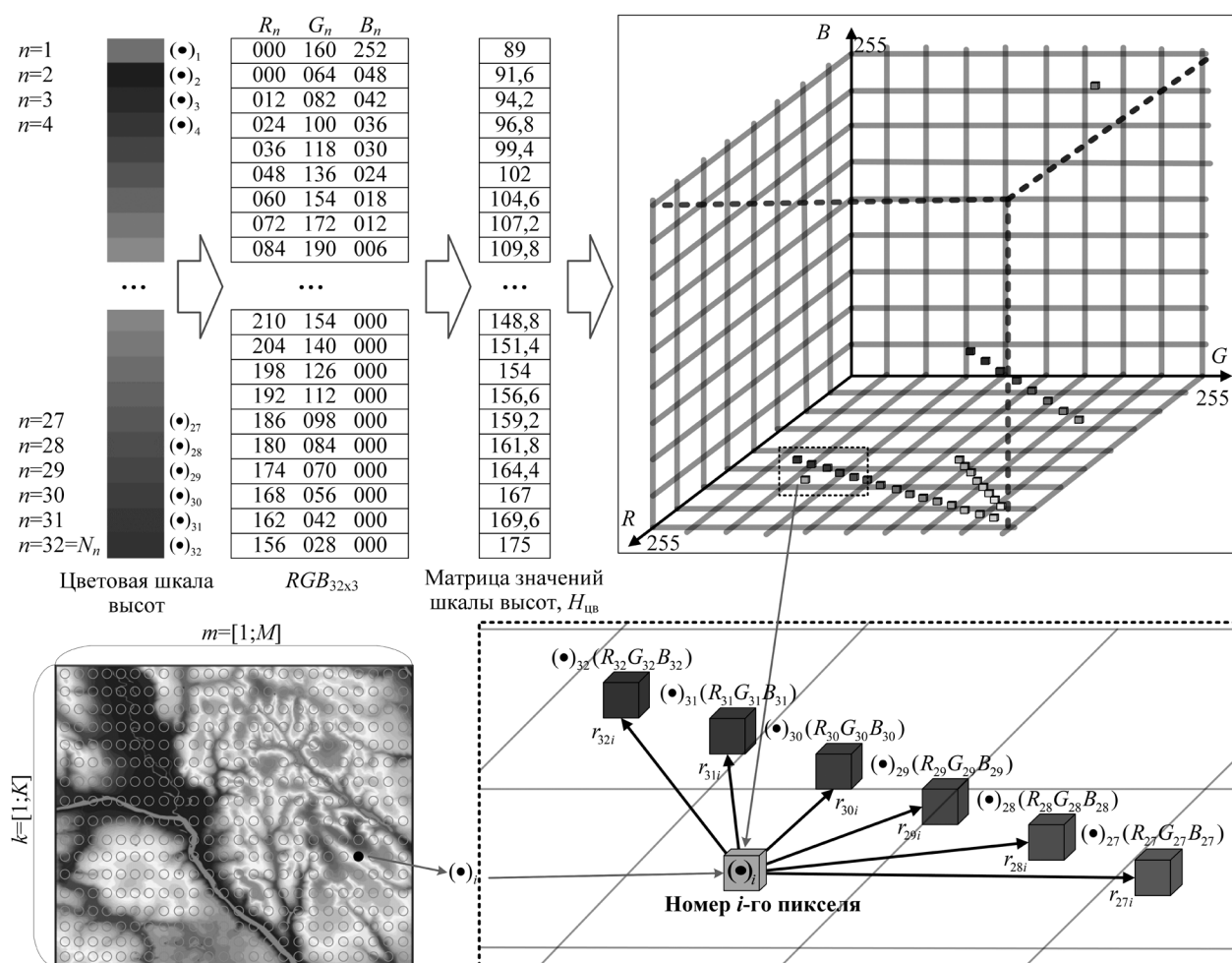
где R_n, G_n, B_n и R_i, G_i, B_i — координаты n -го цвета шкалы высот и цвета i -го пикселя соответственно в цветовой декартовой RGB-системе координат;

– правило установления соответствия цвету каждого i -го пикселя растрового изображения численного значения высоты $h_i^{(R_n, G_n, B_n)^*} = H_{\text{цв } n}$:

$$(R_n, G_n, B_n)^* = \operatorname{argmin} \{ \Delta r_{ni} \},$$

$$n \in N, i \in I = M \times K.$$

На рис. 5, б представлен результат построения цифровой 3D-модели карты высот местности для конкретного растрового изображения участка карты (рис. 5, а).



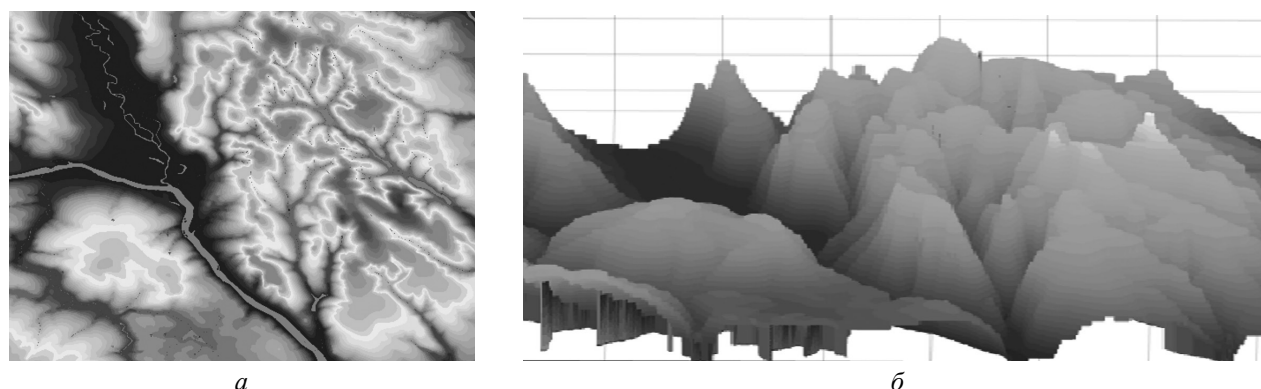


Рис. 5. 3D-модель карты высот местности для конкретного растрового изображения участка карты

С целью исключения из последующего рассмотрения всех точек пространства в окрестности эксплуатирующегося РЭС (с координатами местоположения X, Y), которые гарантированно не будут удовлетворять условию прямой радиовидимости, на третьем шаге алгоритма осуществляется построение зоны предельной прямой радиовидимости. В основе построения этой зоны лежит уравнение прямой радиовидимости [9–11] с допущением, что новое РЭС может быть развернуто в месте с максимальным значением высоты $h_{\max}$:

$$D_0 = 130,15 \cdot (\sqrt{h_{m0} + \Delta h_m - h_0} + \sqrt{h_{n0} + h_{\max} - h_0}) + \Delta d_{\text{пт}}, \quad (1)$$

где $h_{\max}$ — максимальная высота на карте, км;

$$\Delta d_{\text{пт}} = \frac{95,2}{\sqrt[3]{f}} \text{ — протяженность зоны полутени;}$$

f — центральная частота вновь размещаемого РЭС, МГц.

Данная зона не физична и используется для оптимизации автоматизированных вычислений путем исключения из рассмотрения всех пикселей, находящихся вне этой зоны. При построении этой зоны применялся алгоритм Брезенхема для цифровой окружности (рис. 6), в котором координата последующего i -го пикселя определяется путем вычисления ошибок $\Delta_H, \Delta_V, \Delta_D$ и минимального отклонения δ для всех пикселей-претендентов (V, D, H) [8]:

$$\Delta_i = \min(\Delta_H, \Delta_V, \Delta_D),$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_H &= (m_i + 1)^2 + k_i^2 - R^2 = \\ &= m_i^2 + 2m_i + 1 + k_i^2 - R^2 = \Delta_{(i-1)} + 2m_i + 1 \end{aligned}$$

для горизонтального пикселя-претендента H ;

$$\begin{aligned} \Delta_V &= m_i^2 + (k_i - 1)^2 - R^2 = \\ &= m_i^2 + k_i^2 - 2k_i + 1 - R^2 = \Delta_{(i-1)} - 2k_i + 1 \end{aligned}$$

для вертикального пикселя-претендента V ;

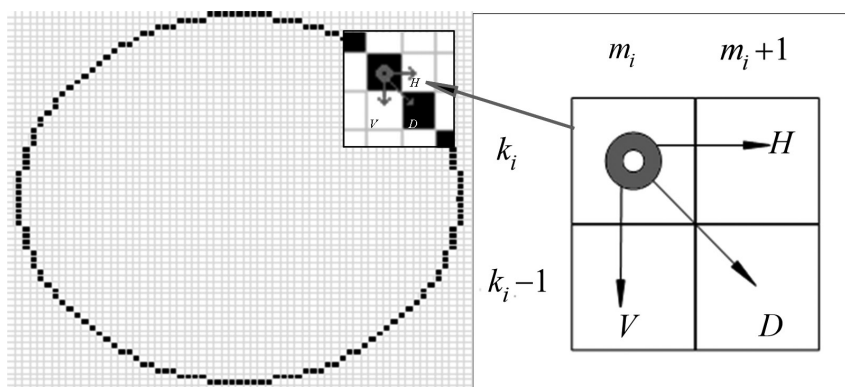


Рис. 6. Пример построения цифровой окружности по алгоритму Брезенхема

$$\Delta_D = (m_i + 1)^2 + (k_i - 1)^2 - R^2 = m_i^2 + 2m_i + 1 + k_i^2 - 2k_i + 1 - R^2 = \Delta_{(i-1)} + 2(m_i - k_i + 1)$$

для диагонального пикселя-претендента D .

На четвертом и пятом шагах алгоритма осуществляется построение зон радиотени и пространственной доступности (рис. 7), обусловленных резкими перепадами высот на трассе распространения радиосигналов. При этом принадлежность каждого рассматриваемого i -го пикселя к зоне пространственной доступности определяется выполнением следующих условий:

– наличие прямой радиовидимости в месте планируемого размещения вновь разворачиваемого РЭС (с использованием выражения (1), где вместо $h_{\max}$ используются значения высот h_i , соответствующие рассматриваемому пикселю);

– трасса распространения радиоволн между эксплуатирующимся и размещаемым РЭС является открытой (рис. 8).

Принадлежность трассы к открытому типу определяется в соответствии с правилом:

$$\begin{cases} H \geq H_0 & \text{трасса открытая;} \\ H < H_0 & \text{трасса закрытая,} \end{cases}$$

где H — высота расчетного просвета трассы, км:

$$H = D_1 \cdot \left[\frac{(h_m - h_n)}{D} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot (D - D_1) \right] + h_n - h_1;$$

H_0 — высота реального просвета трассы, км:

$$H_0 = 0,32 \cdot \sqrt{\frac{D_1(D - D_1)}{D \cdot f}}.$$



а



б

Рис. 7. Зоны пространственной доступности для вновь размещаемого РЭС: а — $h_{n0} = 7$ м; б — $h_{n0} = 50$ м

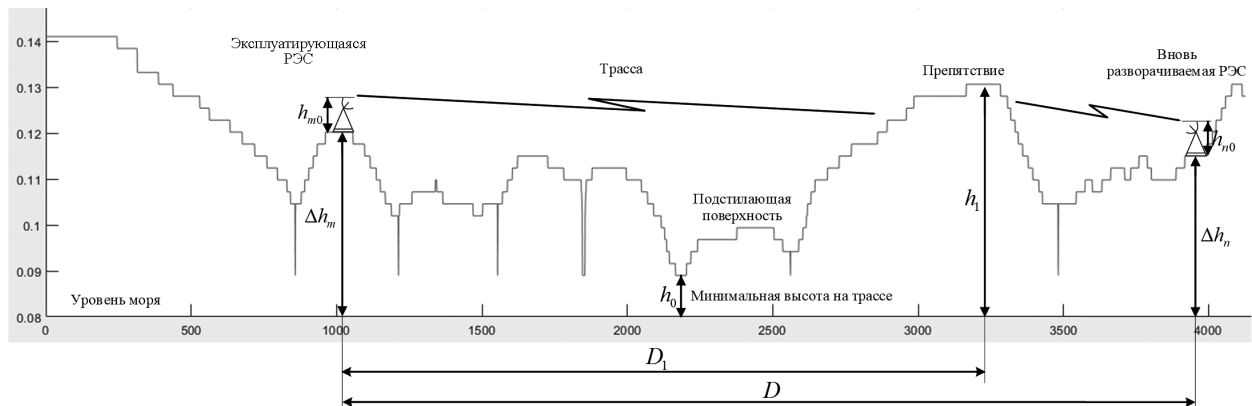


Рис. 8. Пример трассы распространения радиосигналов между двумя РЭС с наличием резких перепадов высот

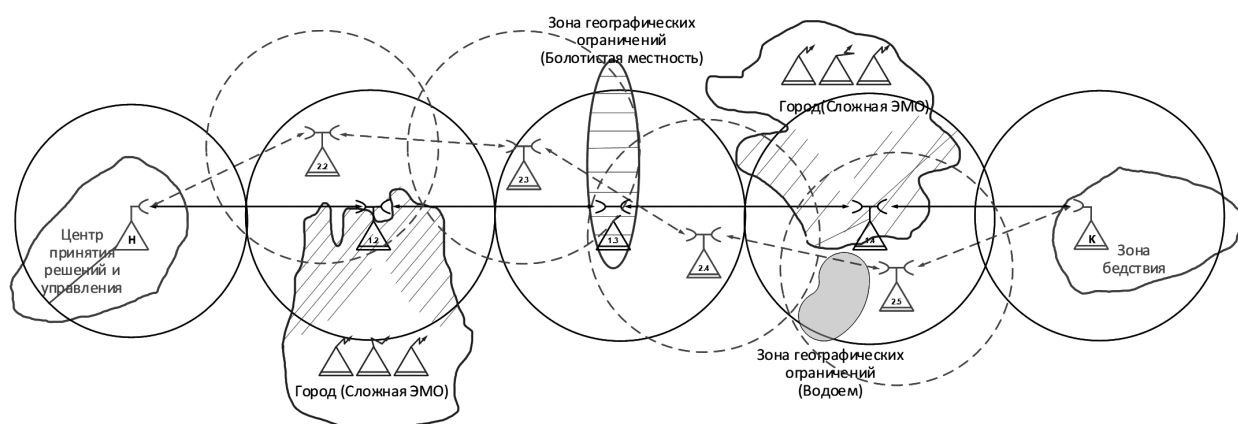


Рис. 9. Пример обоснования размещения сети РЭС в районах с резкими перепадами высот и неблагоприятными географическими факторами в условиях сложной ЭМО

Далее, на 3-м этапе разработанной методики необходимо «наложить» на карту зоны ЗАТО и НГФ, а на 4-м этапе, путем исключения пересечений вышеперечисленных зон из зоны пространственной доступности сформировать рациональную зону размещения Z^* вновь разворачиваемого РЭС.

На заключительном этапе методики оператор осуществляет выбор рационального места размещения вновь разворачиваемого РЭС внутри сформированной зоны Z^* .

Практическая значимость

Одним из примеров практической значимости разработанной методики является возможность ее использования для оперативного планирования развертывания высокоскоростной радиорелейной линии связи большой дальности с централизованным управлением мобильными поисково-, аварийно-спасательными формированиями (ПСФ/АСФ), задействованными для ликвидации последствий крупных техногенных катастроф и других бедствий, когда имеющиеся каналы управления выведены из строя или их невозможно задействовать в кратчайшие сроки (рис. 9).

Кроме того, разработанная методика может быть использована для планирования мест размещения разнородных средств противодействия несанкционированному применению малогабаритных радиоуправляемых авиационных моделей с последующим их сопряжением в единую систему вблизи с промышленными объектами со сложной ЭМО [12–14].

Заключение

Достоинством разработанной методики является то, что выбор места размещения не зависит от численных значений энергетических характеристик вновь разворачиваемых и уже эксплуатирующихся РЭС. Методика учитывает любые возможные направления прихода непреднамеренных помех, а также позволяет исключить зоны с неблагоприятными географическими факторами и другими зонами. Ее автоматизация позволяет оператору наглядно с использованием оцифрованной карты местности строить зоны пространственной доступности и путем последовательного перебора планируемых мест размещения выбрать наиболее рациональное место с учетом перепада высот рельефа местности для любой ЭМО.

Предлагаемый подход целесообразно использовать в центрах управления радиочастотным спектром и в ситуационных штабах специалистами, отвечающими за организацию связи и обеспечение ЭМС.

Список источников

1. Концепция развития системы контроля за излучениями РЭС и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года; утв. реш. ГКРЧ № 17-42-06 от 04.07.2017. М: Минкомсвязи, 2017. 83 с.
2. Ковалгин Ю.А. Цифровое радиовещание: системы и технологии. М.: Горячая линия Телеком, 2021. 580 с.

3. Методика расчета ЭМС систем абонентского радиодоступа и беспроводной передачи данных с другими РЭС гражданского применения на территории Российской Федерации, работающих в общих полосах частот от 1 ГГц до 30 ГГц; утв. реш. ГКРЧ № 05-09-03-001 от 24.10.2005. М: Мининформсвязи, 2005. 165 с.

4. Методика расчетов электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы с радиоэлектронными средствами гражданского назначения за исключением радиовещательной службы; утв. реш. ГКРЧ № 20-57-05 от 28.12.2020. М: Минкомсвязи, 2020. 144 с.

5. Серов А.В. Обзор возможностей использования трехмерных моделей рельефа для решения различных прикладных задач // Вестник Сыктывкарского университета. 2001. Серия 1. Вып. 4. С. 266–277.

6. Хлебникова Т.А., Горобцов С.Р. Автоматизированные системы обработки геопространственных данных. Цифровое моделирование рельефа в ГИС «Панорама»: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: СГГА, 2013. 62 с.

7. Сысоев А.В., Елшина Т.Е. Создание и обработка цифровых моделей рельефа в среде ГИС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Международный науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 72–77.

8. Самодумкин С.А., Степанова М.Д., Колб Д.Г. Практикум по компьютерной графике: учеб.-метод. пособие в 3 ч. Ч. 1; под ред. проф. В.В. Голенкова. Минск: БГУИР, 2007. 44 с.

9. Рекомендация Международного союза электросвязи МСЭ-R P.1546-6 «Метод прогнозирования связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц». Серия Р. Распространение радиоволн. 08.2019. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546> (дата обращения: 27.06.2025).

10. Рекомендация Международного союза электросвязи МСЭ-R P.1812-7 «Метод прогнозирования распространения радиоволн для наземных служб пункта с зоной в диапазоне частот от 30 МГц до 6 ГГц». Серия Р. Распространение радиоволн. 08.2023. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1812> (дата обращения: 27.06.2025).

11. Антипин Б.М., Виноградов Е.М. Анализ моделей для оценки потерь распространения сигналов при расчетах электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // СП6Н-ТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2021. № 1 (76). С. 233–235.

12. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.

13. Михайлов А. Меры электронного противодействия БПЛА // Системы безопасности. 2023. № 5. URL: <http://www.secuteck.ru/articles/mery-elektronnogo-protivodejstviya-bpla> (дата обращения: 27.06.2025).

14. Сергеев М. Актуальные проблемы гражданского рынка средств РЭБ // Сб. тр. VII Всероссийской конференции «Защита гражданских объектов от атак беспилотных систем». СПб.: ExpoUAV, 2025. С. 45–51.

References

1. The concept of development of the radiation monitoring system of thermal power plants and (or) high-frequency devices for civil purposes in the Russian Federation for the period up to 2025, approved by the decision. GKRCH No. 17-42-06 dated 04.07.2017. Moscow: Ministry of Communications, 2017. 83 p.

2. Kovalgin Yu.A. Digital Broadcasting: Systems and Technologies. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2021. 580 p.

3. The method of calculating the EMC of subscriber radio access and wireless data transmission systems with other distribution zones for civil use in the territory of the Russian Federation operating in common frequency bands from 1 GHz to 30 GHz, approved by the decision. GKRCH No. 05-09-03-001 dated 24.10.2005. Moscow: Ministry of Information and Communications, 2005. 165 p.

4. Methodology for calculating the electromagnetic compatibility of radio-electronic means of the land mobile service with radio-electronic means for civil purposes, with the exception of the broadcasting service, approved by the decision. GKRCH No. 20-57-05 dated 12/28/2020. Moscow: Ministry of Communications, 2020. 144 p.

5. Serov A.V. Review of the possibilities of using three-dimensional elevation models for solving various applied problems // Bulletin of Syktvykar University. Series 1. Bul.4. 2001. Pp. 266–277.

6. Khlebnikova T.A., Gorobtcov S.R. Avtomatizirovannye systemy obrabotki geoprostranstvennykh dannykh. Cifrovoe modelirovanie rel'efa v GIS «Panorama»: ucheb.-metod. posobie. Novosibirsk: SGGA, 2013. 62 p.
7. Sysoev A.V., Elshina T.E. Sozdanie i obrabotka cifrovyykh modeley rel'efa v srede GIS // Interexpo GEO-Sibir-2017. Novosibirsk: SGUGiT, 2017. Pp. 72–77.
8. Samodumkin S.A., Stepanova M.D., Kolba D.G. Boiler of computer graphics Practicum: textbook. In 3 parts. P. 1; ed. V.V. Golenkov. Minsk: BGUIR, 2007. 44 p.
9. Recommendation ITU-R P.1546-6 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. P Series. Radiowave propagation. 08.2019. URL://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546 (date of access: 27.06.2025).
10. Recommendation ITU-R P.1812: A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 6 GHz. P Series. Radiowave propagation. 08.2023. URL://www.itu.int/rec/R-REC-P.1812 (date of access: 27.06.2025).
11. Antipin B.M., Vinogradov E.M. Analiz modeley dlya poter' rasprostraneniya signalov pri rasschetakh elektromagnitnoy sovmestimosti radioelektronnih sredstv // SPbNTORES: trudy eghegodnykh konf. 2021, T. 1 (76). Pp. 233–235.
12. Makarenko S.I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nykh apparatam. St. Petersburg, 2020. 204 p.
13. Mikhaylov A. Mery elektronnoy protivodejstviya BPLA // Sistemy bezopasnosti. 2023, V. 5. URL://www.secuteck.ru/articles/mery-ehlektronnoy-protivodejstviya-bpla (date of access: 27.06.2025).
14. Sergeev M. Actual problems of the civilian electronic warfare market / Proceedings of the VII All-Russian Conference «Protection of civilian objects from attacks by unmanned systems». St. Petersburg: EXPOUAV, 2025. Pp. 45–51.