

УДК 621.396

## Методика определения частотной зависимости напряженности поля помех и надежности декаметрового диапазона связи в различные сезоны года

Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Коваль С. А., Скорик А. Д.

**Постановка задачи:** известно, что случайные изменения мощности внешних помех в декаметровом диапазоне волн существенно снижают надежность (вероятность обеспечения связи с достоверностью не хуже заданной) радиосвязи. Для поддержания надежности связи требуется своевременная смена рабочих частот. Надежность связи определяется средним (медианным) значением отношения сигнал/помеха на входе приемника, которое, в свою очередь, зависит от среднего значения суммарной напряженности поля помех различных источников. При расчете надежности связи в декаметровом диапазоне волн обычно учитывают максимальное значение суммарной напряженности поля помех, которое наблюдается в летнее время года. Для объективного расчета надежности декаметрового диапазона связи необходимо учитывать зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех от выбора рабочей частоты для других сезонов (зимнего, весеннего и осеннего). **Целью работы** является разработка методики определения зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех от выбора рабочей частоты в различные сезоны года, и оценка её влияния на надежность декаметрового радиосвязи. **Новизна** заключается в теоретическом обобщении методик определения частотной зависимости суммарной напряженности поля помех от различных источников (атмосферных, промышленных, галактических) и надежности связи в различные сезоны года. **Результат:** разработана методика определения суммарной напряженности поля помех в зависимости от выбора рабочей частоты в различные сезоны года для оценки их влияния на надежность декаметрового диапазона связи. **Практическая значимость:** частотные зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех в зимний, весенний и осенний сезоны практически одинаковы и в среднем на 8 дБ меньше по сравнению с летним периодом (максимальная разница составляет 9,5 дБ). Уменьшение суммарной напряженности поля помех в осенне-зимний и весенний сезоны обуславливает увеличение надежности декаметрового диапазона связи до 4 % по сравнению с известной методикой расчета для летнего периода.

**Ключевые слова:** декаметровая радиосвязь, надежность связи, атмосферные помехи, промышленные шумы, галактические шумы, напряженность поля помех, стандартное отклонение, коэффициент внешнего шума.

### Введение

Несмотря на огромные достижения в области спутниковой радиосвязи, развития сотовых сетей и систем широкополосного беспроводного доступа, радиосвязь в декаметровом (ДКМ) диапазоне волн продолжает играть важную роль при передаче данных на дальние расстояния как объектами гражданских ведомств, так и подразделениями силовых структур [1, 2].

Основным показателем качества ДКМ радиосвязи является надежность, или вероятность обеспечения связи с достоверностью, не хуже заданной [3-7].

#### Библиографическая ссылка на статью:

Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Коваль С. А., Скорик А. Д. Методика определения частотной зависимости напряженности поля помех и надежности декаметрового диапазона связи в различные сезоны года // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 61-79. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-61-79

#### Reference for citation:

Pashintsev V. P., Grinev E. M., Koval S. A., Skorik A. D. Method for determining the frequency dependence of the strength of the interference field and the reliability of decameter communication in different seasons of the year. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 61-79 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-61-79

Известно [3, 4], что надёжность связи  $D_{св} \sim \bar{Z}$  прямо пропорционально зависит от среднего отношения сигнал/помеха  $\bar{Z} \sim \bar{E}_c / \bar{E}_n$ , а точнее – от отношения средних значений напряженности поля сигнала  $\bar{E}_c$  и помех  $\bar{E}_n$  в точке приема.

Существует множество методик расчета напряженности поля помех, каждой из которых присущ ряд недостатков. В статье [8] и в рекомендациях МСЭ [9] производится аналитический расчет среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\bar{E}_n$  различных видов в зависимости от выбора рабочей частоты  $f$ . Однако этот расчет производится только для летнего сезона (когда наблюдается максимальный уровень  $\bar{E}_n$ ) и не рассматриваются значения  $\bar{E}_n$  ниже максимального в другие сезоны. В известной [4] методике расчета напряженности поля внешних помех используются графики частотной зависимости средних напряженностей  $\bar{E}_{ni}(f)$  помех различных ( $i$ ) типов (атмосферных, промышленных, станционных, космических) в летний и зимний сезоны. Однако в данной методике [4] не отображена зависимость этих типов помех для весеннего и осеннего периода, не представлена характеристика среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\bar{E}_n$ . В учебном пособии [6] расчет различных видов помех для всех сезонов года с помощью графического метода, но не представлена характеристика среднего значения суммарной напряженности помех  $\bar{E}_n$ .

Целью статьи является разработка методики определения зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех от выбора рабочей частоты  $\bar{E}_n(f)$  в различные сезоны года и оценка её влияния на надёжность  $D_{св}(f)$  декаметрового радиосвязи.

### Обоснование методики определения зависимости поля помех и надёжности ДКМ связи от выбора рабочей частоты в различные времена года

Известно [3], что надёжность связи  $D_{св}$  определяется выражением

$$D_{св} = F((\bar{Z} - Z_{доп}) / \sigma_z), \quad (1)$$

где  $\bar{Z} = 20 \lg(\bar{E}_c / \bar{E}_n)$  – среднее (медианное) отношение сигнал/помеха на входе приемника (дБ),  $Z_{доп}$  – допустимое отношение сигнал/помеха (дБ),  $\sigma_z$  – среднеквадратичное отклонение отношения сигнал/помеха (дБ).

В ДКМ диапазоне обычно определяются средние значения напряженности поля атмосферных  $\bar{E}_{атм}$ , промышленных  $\bar{E}_{пр}$  и галактических  $\bar{E}_{гал}$  помех (шумов), поскольку они соизмеримы по величине и существенно превосходят помехи других типов [9, 10]. Частотная зависимость медианного (среднего) значения суммарной напряженности поля помех  $\bar{E}_n(f)$  определяется не простым суммированием напряженности поля каждого вида помех  $\bar{E}_n(f) = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i(f) = \bar{E}_{атм}(f) + \bar{E}_{пр}(f) + \bar{E}_{гал}(f)$ , а более сложной комбинацией их

значений. В соответствии с рекомендациями МСЭ [9] для коротких вертикальных несимметричных вибраторов над идеально плоской земной поверхностью суммарная напряженность поля помех определяется как

$$\overline{E}_n(f) = F_a(f) + 20 \lg f + 10 \lg B - 95,5 \text{ дБ (мкВ/м)}, \quad (2)$$

где  $F_a$  – коэффициент внешнего шума (дБ),  $f$  – рабочая частота (МГц),  $B$  – ширина полосы пропускания приемника (Гц).

Величина  $F_a$  распределяется по обе стороны от медианного значения  $F_{am}$  согласно полунормальному распределению [9]. Медианное значение коэффициента внешнего шума  $F_{am}$  и стандартное отклонение  $\sigma_T$  зависит от выбора рабочей частоты  $f$ , координат приемника  $\rho_{\text{прм}}$ , даты  $t_{\text{дт}}$  и времени суток  $t_{\text{вр}}$  организации радиосвязи и в соответствии с рекомендациями МСЭ [9] определяется согласно выражению

$$F_{am} = c \cdot \left( \ln(\alpha_T) - \frac{\sigma_T^2}{2c^2} \right) \text{ (дБ)}, \quad (3)$$

где

$$\sigma_T = c \cdot \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\beta_T}{\alpha_T^2} \right)} \text{ (дБ)}, \quad (4)$$

$$c = 10 / \ln 10 = 4,343, \quad (5)$$

$$\alpha_T = \sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \exp \left( \frac{F_{ami}}{c} + \frac{\sigma_i^2}{2c^2} \right) \text{ (Вт)}, \quad (6)$$

$$\beta_T = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \left( \exp \left( \frac{\sigma_i^2}{c^2} \right) - 1 \right) \text{ (Вт}^2\text{)}. \quad (7)$$

Здесь  $F_{ami}$  – медианное значение мощности помех от различных ( $i=1 \dots 3$ ) источников ( $F_{ama}$  – атмосферных,  $F_{amp}$  – промышленных,  $F_{amg}$  – галактических), выраженное в дБ,  $\sigma_i$  – стандартное отклонение для каждого источника помех ( $\sigma_{Fama}$ ,  $\sigma_{Famp}$ ,  $\sigma_{Famg}$ ), выраженное в дБ.

Таким образом, методика определения зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n$  и надежности связи  $D_{\text{св}}$  от выбора рабочей частоты  $f$  в различные времена года должна включать несколько основных этапов:

- 1) определение в различные сезоны года частотной зависимости медианного значения  $F_{ami}$  и стандартного отклонения  $\sigma_i$  мощности различных ( $i=3$ ) типов помех (шумов): атмосферных ( $F_{ama}(f)$ ,  $\sigma_{Fama}(f)$ ), промышленных ( $F_{amp}(f)$ ,  $\sigma_{Famp}$ ) и галактических ( $F_{amg}(f)$  и  $\sigma_{Famg}$ );
- 2) определение частотной зависимости медианного значения коэффициента внешнего шума  $F_a(f)$  в различные сезоны года;

- 3) определение частотной зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E_n}(f)$  в различные сезоны года;
- 4) определение частотной зависимости надежности  $D_{св}(f)$  декаметровый радиосвязи в различные сезоны года.

### Определение частотной зависимости медианного значения мощности и стандартного отклонения помех в различные сезоны года

Атмосферные помехи вносят основной вклад в формирование среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E_n}(f)$  в нижней области ДКМ диапазона частот, особенно в ночное время, когда отсутствует поглощение в слое  $D$  ионосферы и сигналы с малым затуханием распространяются на очень большие расстояния [7, 10].

Медианное значение мощности атмосферных помех  $F_{ama}$  изменяется в широких пределах и определяется согласно картам мира фоновых атмосферных шумов (рис. 1), на которых изолиниями представлены ожидаемые за весь весенний сезон года четырехчасовые медианные значения  $F_{ama}$  на частоте  $f = 1$  МГц. Каждой карте придают свои графики (рис. 2 и 3) частотной зависимости медианы  $F_{ama}(f)$  и стандартного отклонения  $\sigma_{F_{ama}}(f)$  мощности атмосферного шума (помех).

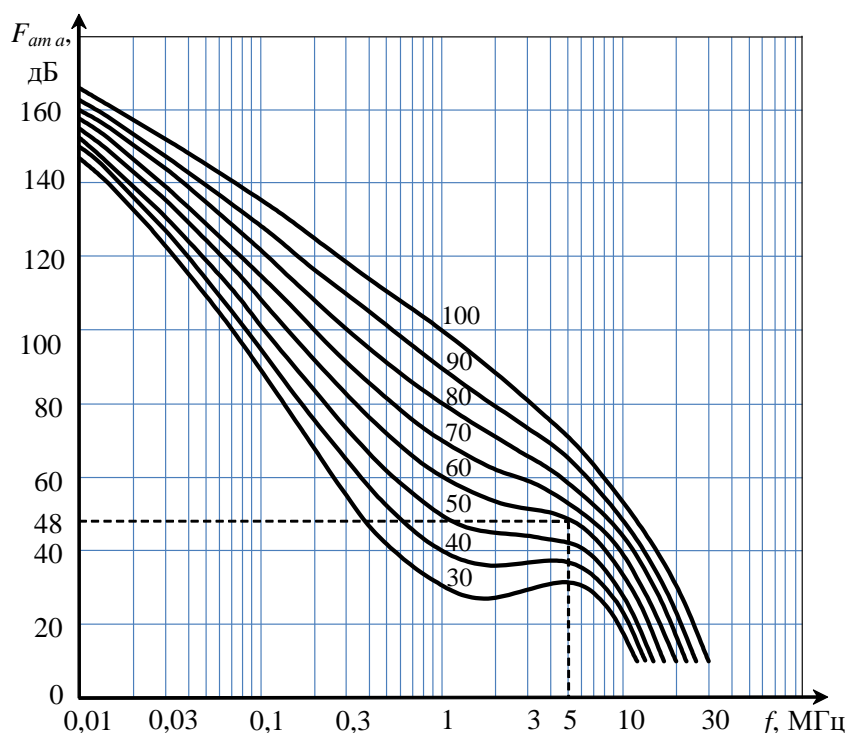


Рис. 2. Зависимость медианной мощности атмосферного шума  $F_{ama}$  от частоты (весна: 00 часов 00 минут – 04 часов 00 минут местного времени)

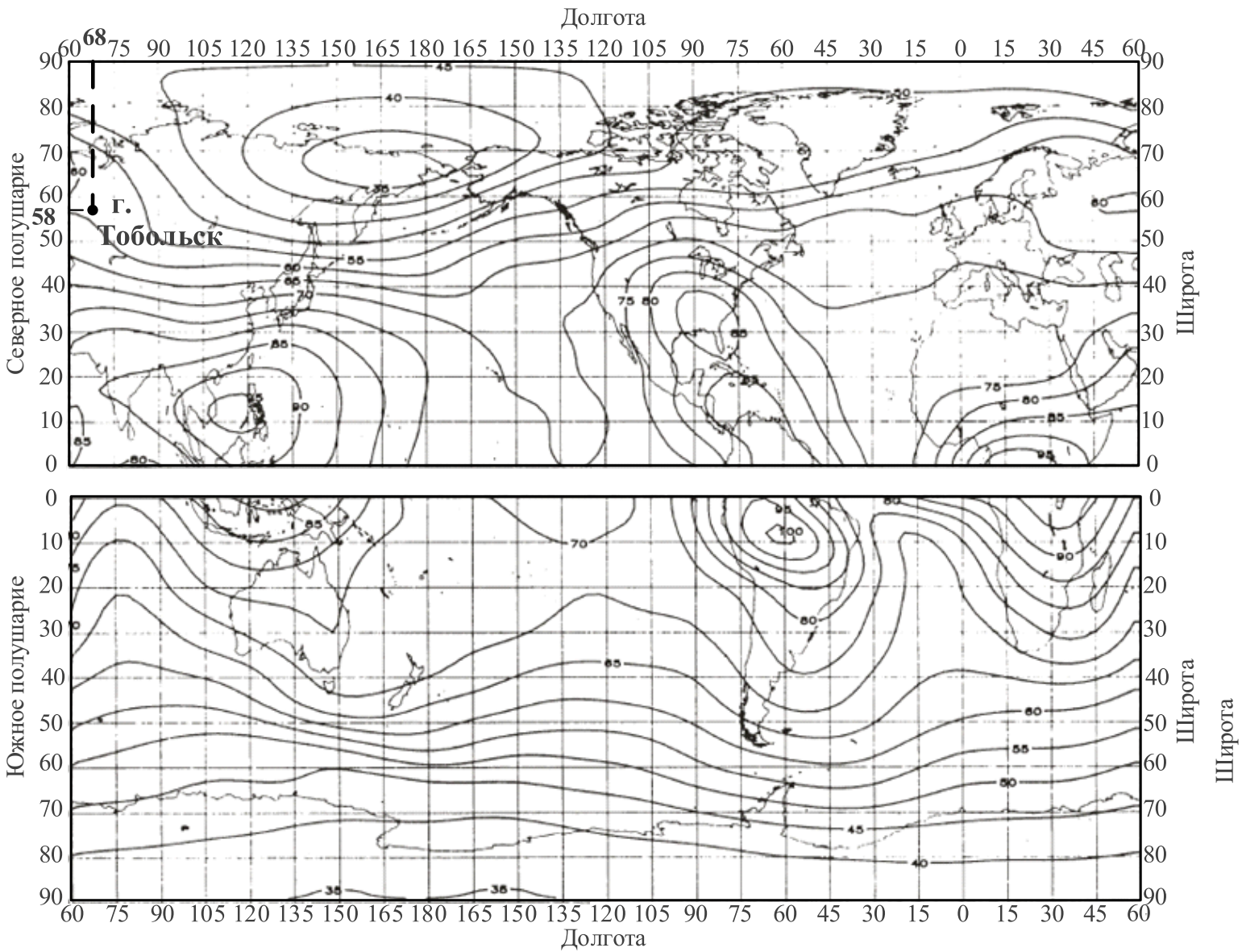


Рис. 1. Ожидаемые значения мощности атмосферного шума  $F_{атм}$  в дБ на частоте 1 МГц  
(Весна: 00 часов 00 минут – 04 часов 00 минут местного времени)

Например, согласно рис. 1, для приемника с координатами  $58^\circ$  с.ш. и  $68^\circ$  в.д. (г. Тобольск) мощность атмосферного шума составляет  $F_{am a} \approx 60$  дБ на частоте  $f = 1$  МГц. На этой основе по рис. 2 определяем для рабочей частоты  $f = 5$  МГц медианное значение мощности атмосферного шума  $F_{am a} \approx 48$  дБ.

Согласно рис. 3 для рабочей частоты  $f = 5$  МГц стандартное отклонение мощности атмосферного шума составляет  $\sigma_{F_{am a}} = 3,6$  дБ.

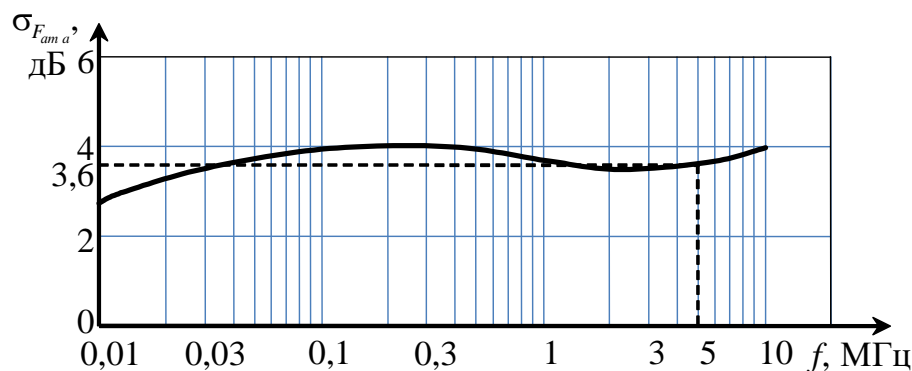


Рис. 3. Зависимость стандартного отклонения атмосферного шума  $\sigma_{F_{am a}}$  от частоты (весна: 00 часов 00 минут – 04 часов 00 минут местного времени)

По аналогии с рис. 1-3 определяются частотные зависимости медианного значения мощности  $F_{am a}(f)$  и стандартного отклонения  $\sigma_{F_{am a}}(f)$  мощности атмосферного шума в летний, осенний и зимний сезоны.

Промышленный шум (помехи) возникает от различного рода электронного оборудования, бытовых приборов, линий электропередач и т.п. В соответствии с рекомендациями МСЭ [9] частотная зависимость  $F_{am p}(f)$  медианного значения мощности промышленного шума имеет линейный характер и описывается выражением вида

$$F_{am p} = c - d \cdot \lg f \text{ (дБ)}, \quad (8)$$

где  $f$  – рабочая частота (МГц),  $c$  и  $d$  – постоянные коэффициенты, зависящие от категории окружающей среды. Значения констант  $c$  и  $d$  приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения констант  $c$  и  $d$  в зависимости от категории окружающей среды

| Категория окружающей среды | $c$  | $d$  |
|----------------------------|------|------|
| Деловая зона               | 76,8 | 27,7 |
| Жилые районы               | 72,5 | 27,7 |
| Сельская местность         | 67,2 | 27,7 |

Стандартное отклонение  $\sigma_{F_{amp}}$  мощности промышленного шума рассчитывается с использованием значений верхней ( $D_u$ ) и нижней ( $D_l$ ) децили (таблица 2) и определяется выражениями:

$$\sigma_{F_{amp}} = \frac{D_u}{1,282} \text{ (дБ)}, \quad (9)$$

$$\sigma_{F_{amp}} = \frac{D_l}{1,282} \text{ (дБ)}. \quad (10)$$

Таблица 2 – Верхние и нижние значения децилей промышленного шума

| Категория окружающей среды | Дециль  | Изменение со временем (дБ) |
|----------------------------|---------|----------------------------|
| Деловая зона               | верхняя | $D_u = 11,0$               |
|                            | нижняя  | $D_l = 6,7$                |
| Жилые районы               | верхняя | $D_u = 10,6$               |
|                            | нижняя  | $D_l = 5,3$                |
| Сельская местность         | верхняя | $D_u = 9,2$                |
|                            | нижняя  | $D_l = 4,6$                |

Например, для рабочей частоты  $f = 5$  МГц в сельской местности ( $c = 67,2$ ;  $d = 27,7$ ) медианное значение мощности промышленного шума согласно формуле (8) составляет  $F_{amp} = 67,2 - 27,7 \lg 5 = 47,8$  дБ, а стандартное отклонение (при верхней децили  $D_u = 9,2$  дБ) согласно формуле (9) –  $\sigma_{F_{amp}} = 9,2/1,282 = 7,18$  дБ.

В соответствии с формулами (8)-(10) и данными таблиц 1 и 2 определяются частотные зависимости медианного значения мощности  $F_{amp}(f)$  и стандартного отклонения  $\sigma_{F_{amp}}$  мощности промышленного шума при другой окружающей среде. От времени года  $F_{amp}(f)$  и  $\sigma_{F_{amp}}$  не зависят.

Галактический шум (помехи) создается радиоизлучением внеземных источников. Наибольшее излучение исходит из центра Галактики, поэтому при вращении Земли уровень галактического шума периодически меняется от наименьшего до наибольшего значения. В соответствии с рекомендациями МСЭ [9] частотная зависимость  $F_{amg}(f)$  медианного значения мощности галактического шума имеет линейный характер и в ДКМ диапазоне для короткого вертикального вибратора без учета экранирования определяется согласно формуле

$$F_{amg} = 52 - 23 \cdot \lg f \text{ (дБ)}, \quad (11)$$

где  $f$  – рабочая частота (МГц).

Галактический шум не будет наблюдаться на частотах ниже критической частоты  $f_{F_2}$  слоя  $F_2$  ионосферы, а для частот, превышающих в три раза крити-

ческую (т.е.  $f > 3f_{F_2}$ ) медианное значения мощности галактического шума будет меньше, чем дает расчет по формуле (11). В таблице 3 представлена частота слоя  $F_2$  в 00 часов 00 минут для различных сезонов года, полученная с использованием реферативной модели IRI-2016 [11].

Таблица 3 – Критическая частота слоя  $F_2$  полученная с использованием реферативной модели IRI-2016

| Сезон года      | Зима  | Весна | Лето | Осень |
|-----------------|-------|-------|------|-------|
| $f_{F_2}$ (МГц) | 1,975 | 2,453 | 3,74 | 2,291 |

Например, на рабочей частоте  $f = 5$  МГц (для которой выполняются соотношения  $3f_{F_2} > f > f_{F_2}$ ) медианное значение мощности галактического шума согласно формуле (11) составляет  $F_{amg} = 52 - 231\lg 5 = 35,9$  дБ. Стандартное отклонение для галактического шума имеет постоянное значение  $\sigma_{F_{amg}} = 1,56$  дБ [9].

В соответствии с формулой (11) и данными таблицы 3 определяются частотные зависимости медианного значения мощности галактического шума  $F_{amg}(f)$  при другой окружающей среде. От времени года  $F_{amg}(f)$  не зависит. Стандартное отклонение галактического шума не зависит от окружающей среды и времени года и принимается  $\sigma_{F_{amg}} = 1,56$  дБ = const.

### Определение частотной зависимости медианного значения коэффициента внешнего шума в различные времена года

На основе результатов предыдущего раздела сравним частотные зависимости мощности атмосферных  $F_{ama}(f)$ , промышленных  $F_{amp}(f)$  и галактических  $F_{amg}(f)$  шумов в различные сезоны при исходных данных, приведенных в таблицах 2 и 4.

Таблица 4 – Координаты и параметры для определения медианного значения коэффициента внешнего шума

|                                                   |                    |
|---------------------------------------------------|--------------------|
| Координаты приемника $\rho_{\text{прм}}$          | 58° с.ш., 68° в.д. |
| Время проведения исследования ( $t_{\text{вр}}$ ) | 00 часов 00 минут  |
| Категория окружающей среды                        | Сельская местность |

В соответствии с картами мира фоновых атмосферных шумов (рис. 1-3), выражениями (8, 11) и данными таблиц 2-4 на рис. 4а-4г представлены частотные зависимости  $F_{ami}(f)$  медианных значений мощности шумов различных типов (атмосферных  $F_{ama}(f)$ , промышленных  $F_{amp}(f)$ , галактических  $F_{amg}(f)$ ) для 00 часов 00 минут и различных сезонов года.

На графиках (рис. 4а-4г) сплошной линией показана зависимость от частоты  $f$  медианной мощности атмосферных шумов  $F_{ama}$ , штрихпунктирной ли-



нией – промышленных шумов  $F_{amp}$ , пунктирной – галактических шумов  $F_{amg}$ . На рис. 4б для весеннего сезона приведены полученные ранее на частоте  $f = 5$  МГц значения мощности атмосферного шума  $F_{ama} \approx 48$  дБ, промышленного  $F_{amp} = 47,8$  дБ и галактического –  $F_{amg} = 35,9$  дБ.

Анализ представленных графиков (рис. 4а-4г) показывает, что частотные зависимости мощности атмосферных  $F_{ama}(f)$  шумов существенно зависят от сезона года. Их наибольший уровень наблюдается летом (рис. 4в), когда в диапазоне от 1 МГц до 10 МГц достигаются значения от  $F_{ama} \approx 65$  дБ до 37 дБ. Наименьшая мощность атмосферных помех наблюдается зимой (рис. 4а), когда зависимость  $F_{ama}(f)$  находится в интервале значений от 55 дБ до 27 дБ. В весенний (рис. 4б) и осенний (рис. 4г) сезоны зависимости  $F_{ama}(f)$  лежат в интервалах значений 60...34 дБ и 60...31 дБ соответственно.

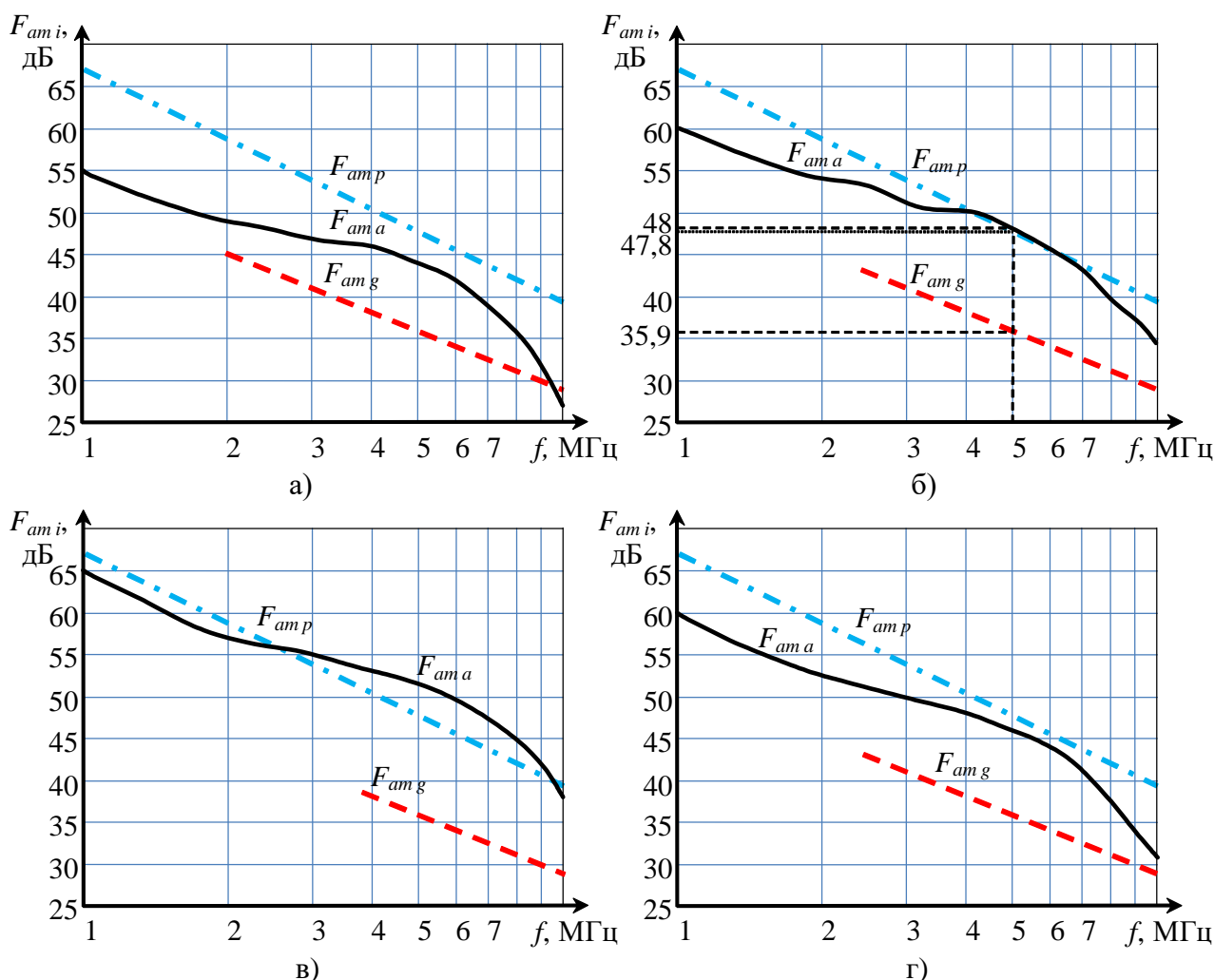


Рис. 4. Частотные зависимости мощности атмосферных  $F_{ama}$ , промышленных  $F_{amp}$  и галактических  $F_{amg}$  шумов: а) зимой; б) весной; в) летом; г) осенью

Мощность промышленных шумов в диапазоне от 1 МГц до 10 МГц составляет от  $F_{amp} \approx 67$  дБ до 40 дБ для всех сезонов года. Напомним, что галакти-

ческий шум не будет наблюдаться на частотах ниже критической частоты слоя  $F_2$  ионосферы, которая согласно данным таблицы 3 составляет  $f_{F_2} \approx 3,74$  МГц летом,  $f_{F_2} \approx 1,975$  МГц – зимой,  $f_{F_2} \approx 2,453$  МГц – весной и  $f_{F_2} \approx 2,291$  МГц – осенью. Поэтому мощность галактических шумов летом (рис. 4в) в диапазоне частот от  $f \approx 3,74$  МГц до 10 МГц принимает значения от  $F_{amg} \approx 39$  дБ до 29 дБ. В остальные сезоны мощность галактических шумов составляет от  $F_{amg} \approx 45$  дБ до 29 дБ в диапазоне от  $f \approx 2$  МГц до 10 МГц.

Напомним, что стандартные отклонения мощности промышленного  $\sigma_{F_{amp}}$  и галактического  $\sigma_{F_{amg}}$  шума практически не зависят от диапазона частот и времени года. Анализ известных [9] частотных зависимостей стандартного отклонения мощности атмосферного шума  $\sigma_{F_{ama}}(f)$  в летний, осенний и зимний сезоны показывает, что они отличаются от приведенной на рис. 3 весенней зависимости  $\sigma_{F_{ama}}(f)$  в среднем на 1 дБ.

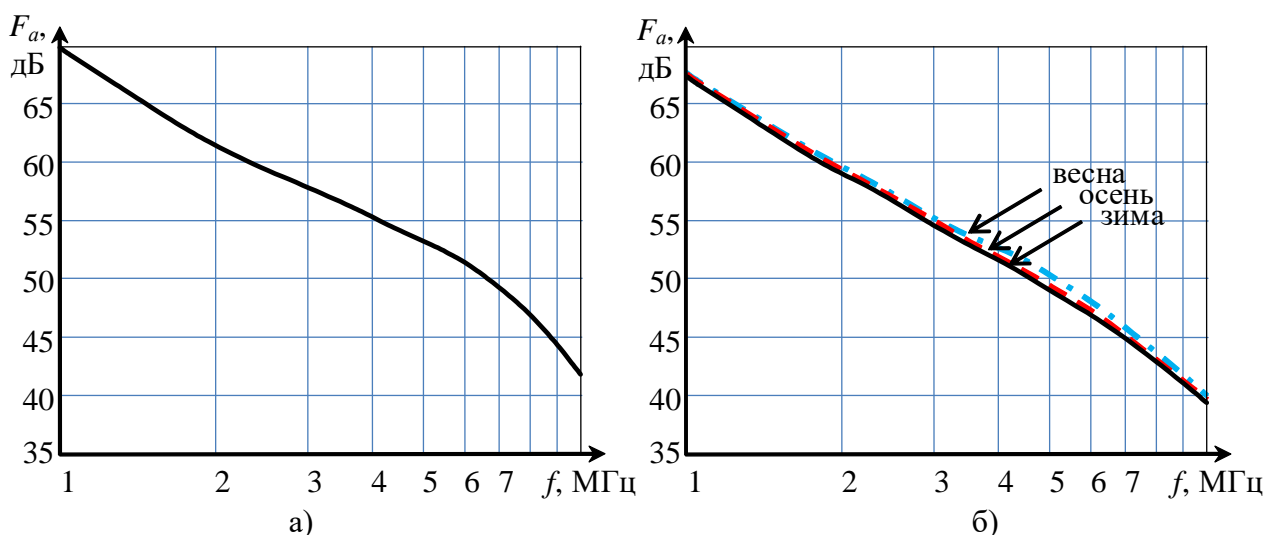


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента внешнего шума  $F_a(f)$  для различных сезонов года: а) лето; б) зима, весна и осень

На основе полученных результатов определения частотных зависимостей медианных значений мощности шумов  $F_{ami}(f)$  различных типов (рис. 4) и их стандартных отклонений  $\sigma_{F_{ami}}(f)$  в различные сезоны года в соответствии с формулами (3)-(7) можно рассчитать стандартное отклонение  $\sigma_T(f)$  и медианное значение коэффициента внешнего шума  $F_a(f)$  в зависимости от выбора рабочей частоты. На рис. 5 представлены частотные зависимости коэффициента внешнего шума  $F_a(f)$  в 00 часов 00 минут для летнего (рис. 5а) и остальных (рис. 5б) сезонов года.

Анализ графиков (рис. 5а и 5б) показывает, что при увеличении рабочей частоты  $f$  коэффициент внешнего шума  $F_a$  суммарных помех уменьшается. В

летний период (рис. 5а) коэффициент внешнего шума уменьшается с величины  $F_a \approx 69$  дБ на частоте  $f = 1$  МГц до  $F_a \approx 42$  дБ на частоте  $f = 10$  МГц. В зимний, весенний и осенний период (рис. 5б) частотные зависимости  $F_a(f)$  имеют практически одинаковый характер (максимальное расхождение не превышает 1 дБ). При этом коэффициент внешнего шума уменьшается с величины  $F_a \approx 67$  дБ на частоте  $f = 1$  МГц до  $F_a \approx 40$  дБ на частоте  $f = 10$  МГц. Следовательно, в зимний, весенний и осенний сезон коэффициент внешнего шума суммарных помех может быть меньше, чем в летний период на величину 2...4 дБ (максимальная разница в 4 дБ наблюдается на частоте  $f = 5$  МГц).

### Методика определения частотной зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех в различные времена года

В соответствии с формулой (2)  $\overline{E}_n(f) = F_a(f) + 20 \lg f + 10 \lg B - 95,5$  и полученными (рис. 5) частотными зависимостями  $F_a(f)$  коэффициента внешнего шума на рис. 6 представлены зависимости медианного (среднего) значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  от выбора рабочей частоты для полосы пропускания  $B = 200$  Гц в летнее время (рис. 6а) и остальные (рис. 6б) сезоны года (зимний, весенний и осенний).

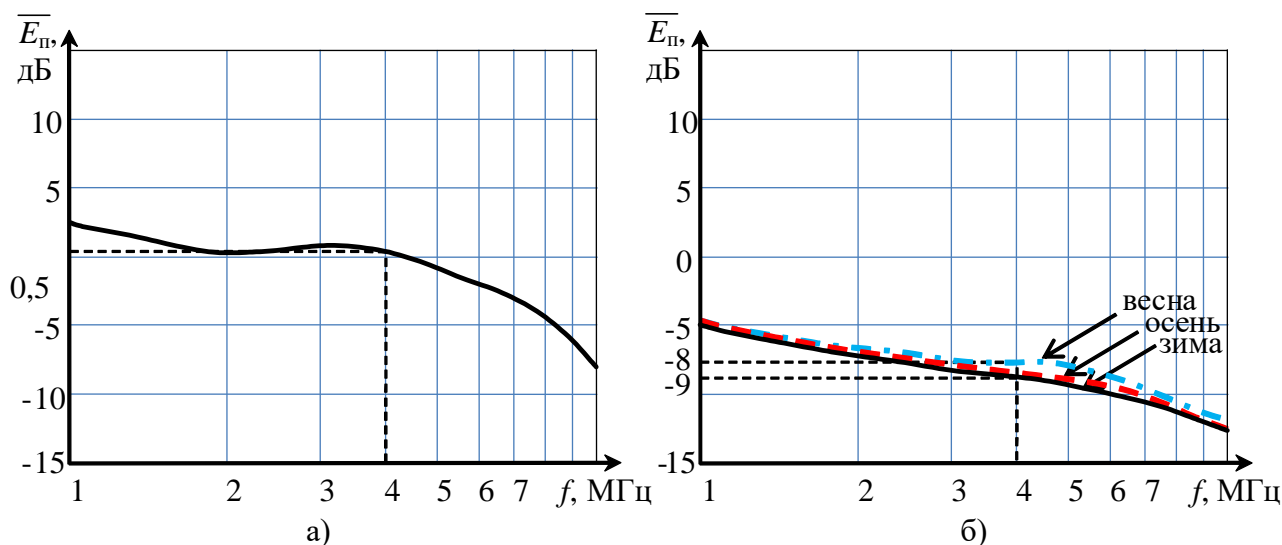


Рис. 6. Частотные зависимости суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  для различных сезонов года: а) лето; б) зима, весна и осень

На рис. 6а показаны результаты расчета медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$ , полученные в соответствии с методикой [8], а на рис. 6б – результаты расчета согласно формуле (2) и рис. 5.

Анализ графиков на рис. 6а показывает, что полученные частотные зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  в летний сезон в диапазоне от 1 МГц до 4 МГц изменяется от  $\overline{E}_n \approx 3$  дБ до 0 дБ, а в диапазоне от 4 МГц до 10 МГц – от 0 дБ до –8 дБ. В зимний, весенний и осен-

ний сезоны (рис. 6б) частотные зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  практически совпадают между собой (расхождение не превышает 2 дБ) и существенно отличаются от летнего периода. В эти сезоны суммарная напряженность поля помех от различных источников в диапазоне от 1 МГц до 10 МГц имеет пологий характер и изменяется от  $\overline{E}_n \approx -5$  дБ до  $-13$  дБ. Следовательно, в зимний, весенний и осенний сезоны медианные значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n$  могут быть меньше, чем в летний период в среднем на 8 дБ, а максимальная разница составляет 9,5 дБ (рис. 6) на рабочей частоте  $f = 4$  МГц.

Таким образом, методика определения частотной зависимости  $\overline{E}_n(f)$  медианного значения суммарной напряженности поля помех должна включать в себя следующие этапы:

1. Определение исходных данных: диапазона рабочих частот  $f$ , ширины полосы пропускания приемника  $B$ , координат приемника  $\rho_{\text{прм}}$ , времени проведения исследования  $t_{\text{вр}}$  и даты  $t_{\text{дт}}$  организации радиосвязи, категории окружающей среды.
2. Определение частотных зависимостей медианного значения мощности атмосферного шума  $F_{\text{ам а}}(f)$  и стандартного отклонения  $\sigma_{F_{\text{ам а}}}(f)$  по графикам (рис. 1-3) в соответствии с рекомендациями МСЭ [9].
3. Определение частотной зависимости медианного значения мощности промышленного шума  $F_{\text{ам п}}(f)$  согласно формуле (8) и стандартного отклонения  $\sigma_{F_{\text{ам п}}}$  согласно формулам (9), (10).
4. Если рабочая частота  $f$  меньше критической частоты слоя  $F_2 (f < f_{F_2})$ , то галактический шум не будет учитываться в расчетах, если  $f > f_{F_2}$ , то частотная зависимость мощности галактического шума  $F_{\text{ам г}}(f)$  рассчитывается согласно (11), а стандартное отклонение принимается неизменным  $\sigma_{F_{\text{ам г}}} = 1,56$  дБ.
5. Учет коэффициента (5)  $c = 4,343$ .
6. Расчёт частотных зависимостей коэффициентов  $\alpha_T(f)$  и  $\beta_T(f)$  согласно формулам (6), (7).
7. Расчёт частотной зависимости стандартного отклонения  $\sigma_T(f)$  от коэффициента внешнего шума согласно формуле (4).
8. Определение частотной зависимости медианного значения коэффициента внешнего шума  $F_a(f)$  согласно формуле (3).
9. Определение частотной зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  согласно формуле (2).

Реализующий данную методику алгоритм расчёта медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n$  на каждой из рабочих частот  $f$  представлен на рис. 7.

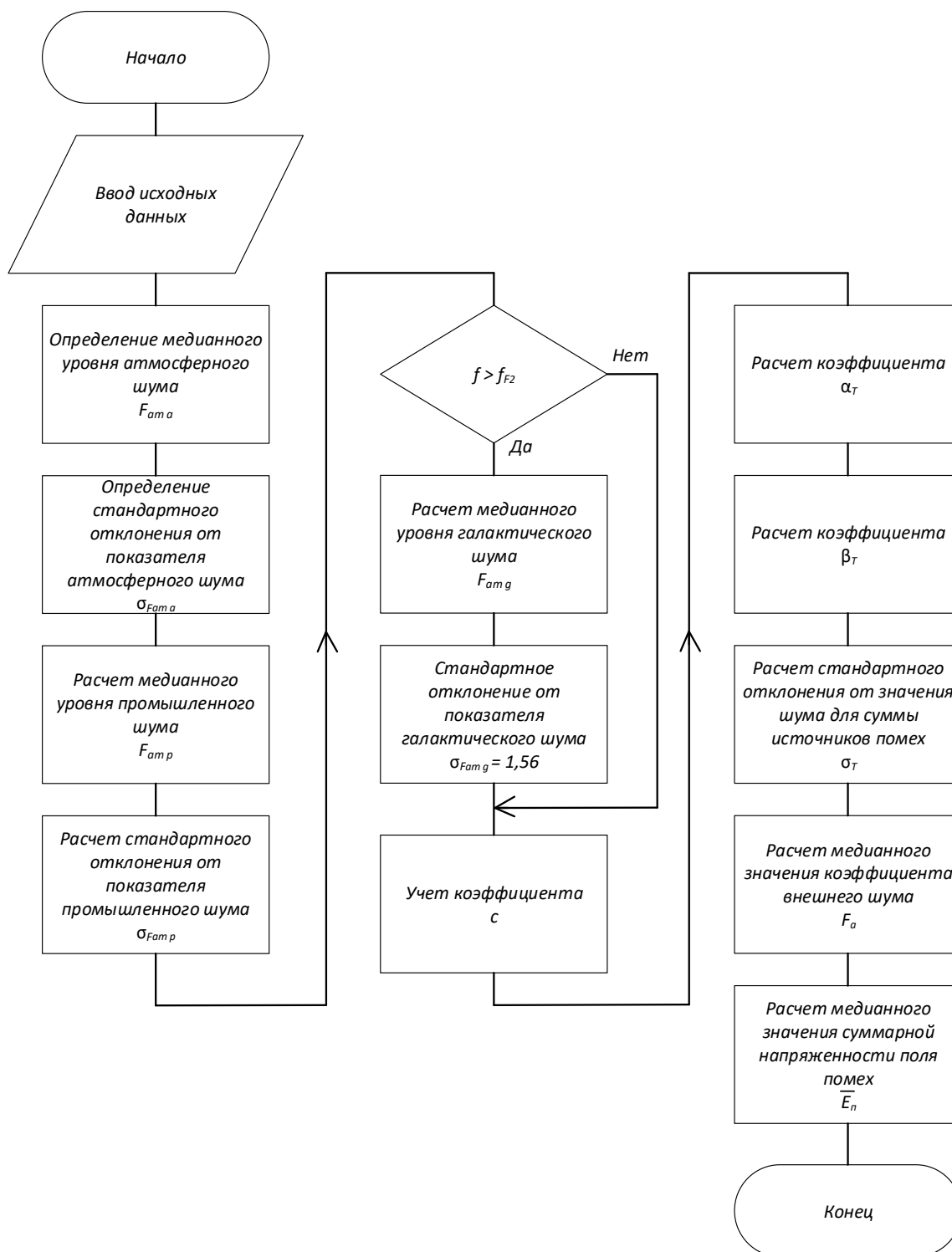


Рис. 7. Алгоритм расчёта значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E_n}$  на каждой из рабочих частот

Алгоритм позволяет провести анализ оценки медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E_n}$  в зависимости от выбора рабочей частоты  $f$  в различные сезоны года.

### Определение частотной зависимости надежности декаметровый радиосвязи в различные времена года

Согласно выражению (1) надежность связи определяется как  $D_{св} = F((\bar{Z} - Z_{доп})/\sigma_z)$ , где среднее отношение сигнал/помеха  $\bar{Z}$  [дБ] соответствует разности  $\bar{Z}$  [дБ] =  $\bar{E}_c$  [дБ] –  $\bar{E}_n$  [дБ] среднего значения напряженности поля сигнала  $\bar{E}_c$  и среднего значения суммарной напряженности поля помех  $\bar{E}_n$  в точке приема. Поэтому частотная зависимость надежности декаметровый радиосвязи будет описываться выражением

$$D_{св}(f) = F((\bar{E}_c(f) - \bar{E}_n(f) - Z_{доп}(f))/\sigma_z). \quad (12)$$

В соответствии с методикой [8] для летнего периода в условиях умеренной диффузности ионосферы ( $\beta = 10^{-2}$ ) надежность связи согласно выражению (1) на рабочей частоте  $f = 5$  МГц при среднем отношении сигнал/помеха  $\bar{Z} = 40$  дБ, допустимом значении отношения сигнал/помеха  $Z_{доп} = 15$  дБ и стандартном среднеквадратичном отклонении  $\sigma_z = 14$  дБ составит  $D_{св} = F((\bar{Z} - Z_{доп})/\sigma_z) = F((40 - 15)/14) = F(1,78) = 0,96$ .

В соответствии с графиками на рис. 6 медианные значения суммарной напряженности поля помех  $\bar{E}_n$  в зимний, весенний и осенний сезоны будут в среднем на 8 дБ меньше, чем в летний период. Следовательно, среднее отношение сигнал/помеха на входе приемника для зимнего, весеннего и осеннего сезонов будет больше летнего на 8 дБ, т.е.  $\bar{Z}$  [дБ] =  $\bar{E}_c$  [дБ] –  $\bar{E}_n$  [дБ] = 48 дБ. Поэтому надежность связи на рабочей частоте  $f = 5$  МГц в соответствии с исходными данными, приведенными в методике [8], в весенний, осенний и зимний сезоны составит  $D_{св} = F((\bar{Z} - Z_{доп})/\sigma_z) = F((48 - 15)/14) = F(2,36) = 0,98$ . Следовательно, надежность связи на частоте  $f = 5$  МГц в весенний, осенний и зимний сезоны будет на 2 % больше, чем в летний период.

В соответствии с исходными данными методики [8] и приведенными на рис. 6б зависимостями  $\bar{E}_n(f)$  согласно формуле (12) рассчитаны частотные зависимости надежности связи  $D_{св}(f)$  в различные времена года при неизменных значениях  $Z_{доп} = 15$  дБ и  $\sigma_z = 14$  дБ (рис. 8).

На рис. 8а показаны результаты расчета в соответствии с методикой [8], на рис. 8б – результаты, полученные с помощью графиков рис. 6б.

Анализ рис. 8а и 8б показывает, что частотные зависимости надежности связи  $D_{св}(f)$  в зимний, весенний и осенний периоды практически одинаковы и достигают максимального значения  $D_{св} \approx 0,98$ . В летний период надежность связи принимает максимальное значение  $D_{св} \approx 0,96$ . Поэтому в среднем повышение надежности связи  $D_{св}$  в зимний, весенний и осенний сезоны составляет 2 % по сравнению с летним сезоном. Максимальный выигрыш надежности связи  $D_{св}$  в зимний, весенний и осенний сезоны достигает 4 % на рабочей частоте  $f = 8,8$  МГц (рис. 8).

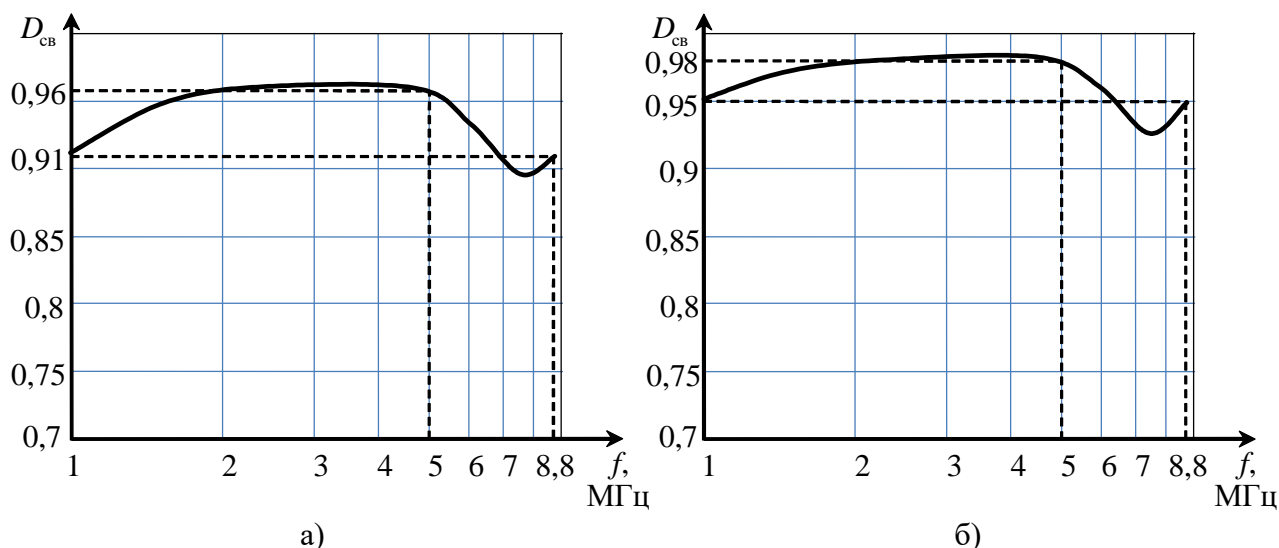


Рис. 8. Частотная зависимость надежности связи  $D_{св}$  в различные времена года:  
а) лето; б) зима, весна и осень

### Заключение

Обобщая материалы статьи, в заключении можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика определения зависимости среднего значения суммарной напряженности поля помех от выбора рабочей частоты  $\overline{E}_n(f)$  в различные сезоны года и оценка её влияния на надежность  $D_{св}(f)$  декаметрового радиосвязи.
2. Сравнительный анализ результатов оценки медианного (среднего) значения суммарной напряженности поля помех в зависимости от выбора рабочей частоты  $\overline{E}_n(f)$  в различные сезоны года позволяет сделать следующие выводы:
  - а) частотные зависимости медианного значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  в зимний, весенний и осенний периоды (рис. 6б) практически одинаковы (наибольшая разница  $\overline{E}_n(f)$  в указанные сезоны не превышает 2 дБ);
  - б) медианные значения суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n(f)$  в зимний, весенний и осенний сезоны (рис. 6б) меньше в среднем на 8 дБ, чем в летний период (рис. 6а).
3. Уменьшение суммарной напряженности поля помех  $\overline{E}_n$  в зимний, весенний и осенний сезоны при постоянной напряженности поля сигнала  $\overline{E}_с$ , приводит к увеличению надежности связи  $D_{св}$  до 4 % (рис. 8).

В дальнейшем планируется развитие представленной методики в направлении определения частотной зависимости среднеквадратичного отклонения отношения сигнал/шум  $\sigma_z(f)$  в различные времена года и оценка ее влияния на надежность декаметрового радиосвязи.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>).*

### Литература

1. Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы. – М.: Радиотехника, 2011. – 444 с.
2. Исаков Е. Е. Технологические проблемы построения транспортных сетей систем военной связи. – СПб, 2004. – 328 с.
3. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные помехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
4. Жуков В. А., Серков В. П., Филиппов В. В. Радиочастотная служба и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1989. – 264 с.
5. Игнатов В. В., Килимник Ю. П., Никольский И. Н., Пивоваров В. Ф. Военные системы связи. Ч. 1. – Л.: ВАС, 1989. – 386 с.
6. Мешалкин В. А., Сосунов Б. В. Основы энергетического расчета радиоканалов. – Л.: ВАС, 1991. – 110 с.
7. Чернов Ю. А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. – М.: Техносфера, 2018. – 688 с.
8. Пашинцев В. П., Скорик А. Д., Коваль С. А., Киселев Д. П., Сенокосов М. А. Зависимость надежности связи в декаметровой радиолинии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 300-322. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10412.
9. Рекомендации МСЭ-R P.372-12. Радиошум // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс] URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-12-201507-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-12-201507-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 15.03.2022).
10. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. – М.: Техносфера, 2018. – 936 с.
11. Bilitza D. D., Altadill V., Truhlik V., Shubin I., Galkin B., Huang X. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. Vol. 15. P. 418-429. doi: 10.1002/2016SW001593.

### References

1. Berezovsky V. A., Dulkeit I. V., Savitsky O. K. *Sovremennaya dekametrovaya radiosvyaz': oborudovaniye, sistemy i komplekсы* [Modern decameter radio communication: equipment, systems and complexes]. Moscow, Radio engineering Publ., 2011. 444 p. (in Russian).



2. Isakov E. E. *Tekhnologicheskiye problemy postroyeniya transportnykh setey sistem voyennoy svyazi* [Technological problems of building transport networks of military communication systems]. Saint Petersburg, 2004. 328 p. (in Russian).
3. Komarov V. F., Sosunov V. N. *Sluchainye pomexi i nadezhnost' KV svyazi* [Random hindrances and reliability of HF communication]. Moscow, Svyaz' Publ., 1977. 136 p. (in Russian).
4. Zhukov V. A., Serkov V. P., Filippov V. V. *Radiochastotnaya sluzhba i antennoye ustroystvo* [Radio frequency service and antenna devices]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1989. 264 p. (in Russian).
5. Ignatov V. V., Kilimnik Yu. P., Nikolsky I. N., Pivovarov V. F. *Voyennyye sistemy svyazi. Chast' I* [Military communication systems. Part I]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1989. 386 p. (in Russian).
6. Meshalkin V. A., Sosunov B. V. *Osnovy energeticheskogo rascheta radiokanalov* [Fundamentals of energy calculation of radio channels]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1991. 110 p. (in Russian).
7. Chernov Yu. A. *Spetsial'nyye voprosy rasprostraneniya radiovoln v setyakh svyazi i radioveshchaniya* [Special issues of radio wave propagation in communication and radio broadcasting networks]. Moscow, Technosphere Publ., 2018. 688 p. (in Russian).
8. Pashintsev V. P., Skorik A. D., Koval S. A., Kiselev D. P., Senokosov M. A. Decimeter radio line communication reliability dependence of the operating frequency choice taking into account the signal-noise situation and ionosphere diffuseness. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 300-322. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10412. (in Russian).
9. Recommendation ITU-R P.372-12 (07/2015). Radio noise. P Series. Radio-wave propagation. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/RREC-P.372-12-201507-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/RREC-P.372-12-201507-S!!PDF-E.pdf) (accessed 15 March 2022).
10. Fabrizio G. A. *High frequency over the horizon radar: Fundamental principles, signal processing, and practical application*. New York, McGraw-Hill Publ., 2013. 944 p.
11. Bilitza D. D., Altadill V., Truhlik V., Shubin I., Galkin B., Huang X. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*, 2017, vol. 15, pp. 418-429. doi: 10.1002/2016SW001593.

Статья поступила 8 апреля 2022 г.

### Информация об авторах

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Северо-Кавказского федерального университета. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Гринеv Евгений Михайлович – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Северо-Кавказского федерального университета. Область научных интересов: повышение качества коротковолновой связи в условиях диффузности ионосферы. E-mail: saru3d@yandex.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Коваль Станислав Андреевич – кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметрового связи. E-mail: \_bober\_@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т., д. 3.

Скорик Александр Дмитриевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Заместитель технического директора. АО «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем декаметрового связи. E-mail: alexander\_skorik@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

---

## Method for determining the frequency dependence of the strength of the interference field and the reliability of decameter communication in different seasons of the year

V. P. Pashintsev, E. M. Grinev, S. A. Koval, A. D. Skorik

**Problem statement:** *it is known that random changes in the power of external interference in the decameter wave range, they significantly reduce the reliability (the probability of providing communication with a reliability no worse than a given one) of radio communication. To maintain communication reliability, a timely change of operating frequencies is required. Communication reliability is determined by the average (median) value of the signal-to-noise ratio at the receiver input, which, in turn, depends from the average value of the total strength of the interference field of various sources. When calculating the reliability of communication in the decameter wave range, the maximum value of the total interference field strength, which is observed in the summer, is usually taken into account. For an objective calculation of the decameter communication reliability, it is necessary to take into account the dependence of the median value of the total interference field strength on the choice of the operating frequency for other seasons (winter, spring and autumn). The aim of the work is to develop a methodology for determining the dependence of the average value of the total interference field strength on the choice of operating frequency in different seasons of the year and to assess its impact on the reliability of decameter radio communications. The novelty lies in the theoretical generalization of methods for determining the frequency dependence of the total strength of the interference field from various sources (atmospheric, industrial, galactic) and the reliability of communication in different seasons of the year. Result: a method has been developed for determining the total strength of the interference field depending on the choice of operating frequency in different seasons of the year to assess their impact on the reliability of decameter communication. Practical significance: the frequency dependences of the median value of the total interference field strength in the winter, spring and autumn seasons are almost the same and on average 8 dB less compared to the summer period (the maximum difference is 9.5 dB). The decrease in the total strength of the interference field in the autumn-winter and spring seasons causes an increase in the reliability of decameter communication by up to 4 % compared to the known calculation method for the summer period.*

**Keywords:** *decameter radio link, communication reliability, atmospheric interference, industrial noise, galactic noise, interference field strength, standard deviation, external noise factor.*

### Information about Authors

*Vladimir Petrovich Pashintsev* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

*Grinev Evgeny Mikhailovich* – graduate student of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: improving the quality of shortwave communication in diffuse ionospheric conditions. E-mail: saru3d@yandex.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

*Stanislav Andreevich Koval* – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of ionosphere parameters for decimeter radio. E-mail: \_bober\_@mail.ru

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.

*Aleksandr Dmitrievich Skorik* – Doctoral student. Deputy Technical Director. Joint-Stock Company «Russian Institute of Powerful Radio Engineering». Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of HF communication systems. E-mail: alexander\_skorik@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.