

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.4>

УДК: 550.388.2

## О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ «МЕРТВОЙ» ЗОНЫ, ТРЕБУЮЩЕЙ УЧЕТА ПРИ ЧАСТОТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ

Зачатейский Д.Е.<sup>1,2</sup>, Сысоев Д.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)  
644024, Омск, Пр. Карла Маркса, д. 15

<sup>2</sup>Омский научно-исследовательский институт приборостроения  
644071, Омск, ул. Масленникова, д. 231

Статья поступила в редакцию 30 августа 2024г.

**Аннотация.** В статье представлены результаты вычислительных экспериментов, показывающие возможность возникновения ситуации, в которой определяемые известными способами значения оптимальных рабочих частот коротковолновой радиолинии соответствуют, исходя из существующих представлений об отражении радиоволн от регулярных слоев ионосферы недоступному для ведения радиосвязи частотному диапазону. Приведены результаты статистической обработки данных вычислительных экспериментов, отражающие вероятность возникновения таких ситуаций на радиолиниях, дальность которых близка к предельной дальности односкачкового распространения ионосферной радиоволны.

**Ключевые слова:** ионосфера, короткие волны, распространение радиоволн, оптимальная рабочая частота.

**Финансирование:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

**Автор для переписки:** Сысоев Дмитрий Вячеславович, [dima.sysoeff2017@yandex.ru](mailto:dima.sysoeff2017@yandex.ru)

## Введение

Радиосвязь на расстояниях порядка 3,5 тыс. км. из Полдхью (Корнуэлл, Англия) в Сент-Джонс (Ньюфаундленд) была организована Г. Маркони 31 декабря 1901 г. [1]. С тех пор в результате многочисленных исследований и практических работ собран обширный экспериментальный материал об особенностях коротковолновой радиосвязи, а физика процессов коротковолнового распространения радиоволн достаточно подробно изложена в различных источниках [см., например, 2-4]. Считается, что данные расстояния (3,5-4 тыс. км) являются предельными для односкачкового распространения ионосферной радиоволны.

При решении задач прогнозирования условий ионосферного распространения радиоволн расчетными методами для радиолиний, дальности которых близки к предельным для односкачкового распространения, определяется зона, в которой, теоретически невозможен прием радиосигналов, в том числе на частотах, считающихся оптимальными. Отсутствие упоминания об этом в научной литературе является поводом для рассмотрения этой особенности распространения радиоволн в данной статье.

Целью работы является представление результатов расчета характеристик распространения радиоволн, показывающих возможность существования дополнительной «мертвой» зоны на дальностях порядка предельной дальности односкачкового ионосферного распространения радиоволн.

### 1. Постановка задачи

Вычислялись характеристики радиолинии Москва-Красноярск (дальность радиолинии 3350 км) в различных условиях. Расчеты проводились с использованием программы «Трасса», разработанной в Южном федеральном университете (г. Ростов-на-Дону) [5-7]. Координаты радиостанций, задававшиеся при расчетах: для радиостанции в Москве:  $55^{\circ}45'$  с.ш.,  $37^{\circ}37'$  в.д.; для радиостанции в Красноярске:  $56^{\circ}01'$  с.ш.,  $92^{\circ}50'$  в.д. Расчеты проводились для условий низкой и высокой солнечной активности (значения чисел

Вольфа, задававшиеся при моделировании равны 10 и 150, соответственно) по следующей методике:

На первом шаге определялся суточный ход максимально-применимой частоты (МПЧ) радиолинии, по которому рассчитывались значения оптимальных рабочих частот (ОРЧ). Коэффициент для пересчета значений МПЧ в ОРЧ принимался равным 0,85. Рабочие частот радиолиний принимались равными ОРЧ.

Результаты проведения расчетов ОРЧ иллюстрируют таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Значения МПЧ и ОРЧ радиолинии, вычисленные для условий зимнего солнцестояния (21 декабря) при низкой солнечной активности (значение числа Вольфа = 10).

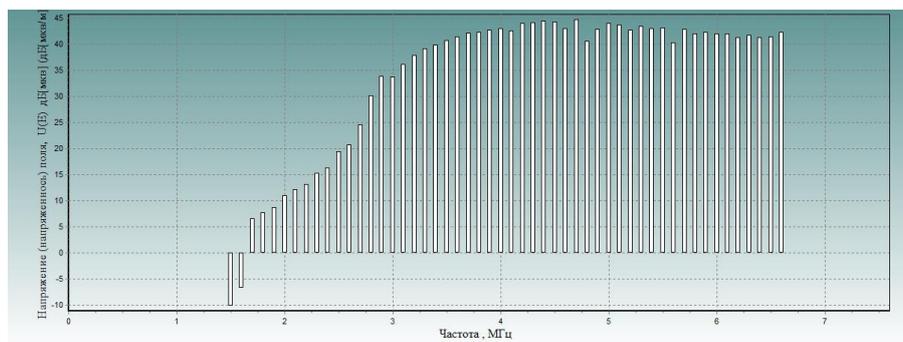
Время (UTC), час	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МПЧ, МГц	6,7	6,2	6,4	7,5	9,7	12,4	10,5	12	12,9	12,4	10,8	9,0
ОРЧ, МГц	5,70	5,27	5,44	6,38	8,25	10,54	8,93	10,20	10,97	10,54	9,18	7,65
Время (UTC), час	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
МПЧ, МГц	7,4	5,9	4,5	4,2	5,8	4,5	4,9	7,8	8,4	8,5	8,2	7,4
ОРЧ, МГц	6,29	5,02	3,83	3,57	4,93	3,83	4,17	6,63	7,14	7,23	6,97	6,29

Таблица 2. Значения МПЧ и ОРЧ радиолинии, вычисленные для условий зимнего солнцестояния (21 декабря) при высокой солнечной активности (значение числа Вольфа = 150).

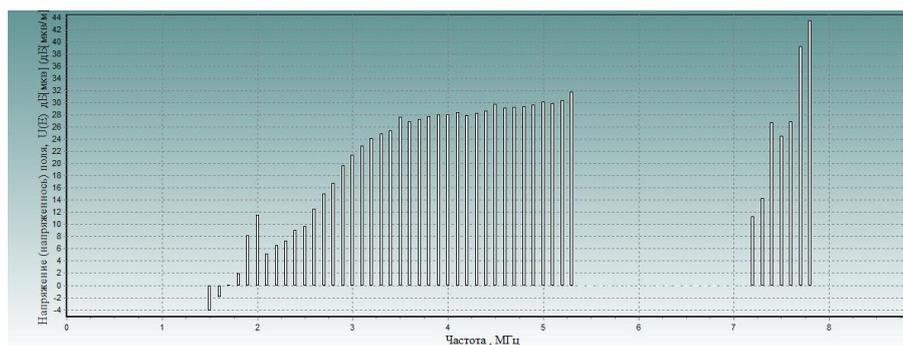
Время (UTC), час	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МПЧ, МГц	9,7	9,5	11,3	10,7	14,3	18,2	32,9	37,2	39,3	39,3	37,9	35,3
ОРЧ, МГц	8,3	8,1	9,6	9,1	12,2	15,5	28,0	31,6	33,4	33,4	32,2	30,0
Время (UTC), час	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
МПЧ, МГц	31,4	26,3	20,7	15,8	12,5	10,9	11	11,9	12,8	12,8	12	10,8
ОРЧ, МГц	26,7	22,4	17,6	13,4	10,6	9,27	9,35	10,1	10,9	10,9	10,2	9,18

Далее для каждого часа суток проводился расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) радиолинии. Фиксировались случаи, в которых значение напряженности поля на ОРЧ определялось программой «Трасса» как нулевое.

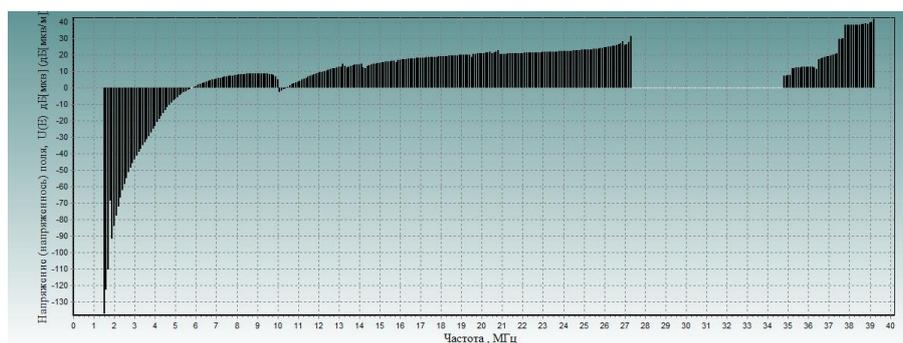
Примеры расчета АЧХ радиолиний показаны на рисунке 1.



а)



б)



в)

Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика радиолинии:  
а) в 00 часов при  $W = 10$ ; в 19 часов при  $W = 10$ ; в 09 часов при  $W = 150$ .

Далее проверялось попадание значений рабочих частот в диапазон, для которого не прогнозируется возможность прохождения ионосферной волны.

Как видно из рис. 1, расчет позволяет определить данные диапазоны радиочастот. На рисунке 1 а) такой диапазон не отображается. Связь на ОРЧ с отражениями от регулярных слоев ионосферы возможна. На рисунках 1 б) и 1 в) прохождение радиоволн не прогнозируется в диапазонах частот от 5,4 МГц до 7,1 МГц и от 27,3 МГц до 34,7 МГц, соответственно. Значения ОРЧ

для данных условий (см. таблицы 1 и 2) – 6,63 МГц и 34,4 МГц попадают в данные диапазоны.

Для данных случаев дополнительно анализировались угловые частотные характеристики, которые также могут быть рассчитаны с использованием программы «Трасса». Результаты данного анализа приведены в разделе «Обсуждение результатов».

Для случаев, когда, согласно расчету, не прогнозировалось распространение радиоволн на ОРЧ определялись границы частотных диапазонов, в которых не прогнозируется возможность ведения радиосвязи на рассматриваемой радиолинии.

## 2. Результаты работы

Таблица 3. Результаты определения возможности расчета параметров радиолиний на ОРЧ для зимних условий (21 декабря).

Время (UTC), час	Результаты для W=10	Результаты для W=150
0	Расчет возможен	Расчет возможен
1	Расчет возможен	Расчет возможен
2	Расчет возможен	Расчет возможен
3	Расчет возможен	Расчет возможен
4	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
5	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
6	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
7	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
8	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
9	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
10	Расчет возможен	Расчет возможен
11	Расчет возможен	Расчет возможен
12	Расчет возможен	Расчет возможен
13	Расчет возможен	Расчет возможен
14	Расчет возможен	Расчет возможен
15	Расчет возможен	Расчет возможен
16	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
17	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
18	Расчет возможен	Расчет возможен
19	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
20	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
21	Расчет возможен	Расчет возможен
22	Расчет возможен	Расчет возможен
23	Расчет возможен	Расчет возможен

Таблица 4. Результаты определения возможности расчета параметров радиолиний на ОРЧ для весенних условий (21 марта).

Время (UTC), час	Результаты для W=10	Результаты для W=150
0	Расчет возможен	Расчет возможен
1	Расчет возможен	Расчет возможен
2	Расчет возможен	Расчет возможен
3	Расчет возможен	Расчет возможен
4	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
5	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
6	Расчет возможен	Расчет возможен
7	Расчет возможен	Расчет возможен
8	Расчет возможен	Расчет возможен
9	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
10	Расчет возможен	Расчет возможен
11	Расчет возможен	Расчет возможен
12	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
13	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
14	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
15	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
16	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
17	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
18	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
19	Расчет возможен	Расчет возможен
20	Расчет возможен	Расчет возможен
21	Расчет возможен	Расчет возможен
22	Расчет возможен	Расчет возможен
23	Расчет возможен	Расчет возможен

Таблица 5. Результаты определения возможности расчета параметров радиолиний на ОРЧ для летних условий (21 июня).

Время (UTC), час	Результаты для W=10	Результаты для W=150
0	Расчет возможен	Расчет возможен
1	Расчет возможен	Расчет возможен
2	Расчет возможен	Расчет возможен
3	Расчет возможен	Расчет возможен
4	Расчет возможен	Расчет возможен
5	Расчет возможен	Расчет возможен
6	Расчет возможен	Расчет возможен
7	Расчет возможен	Расчет возможен
8	Расчет возможен	Расчет возможен
9	Расчет возможен	Расчет возможен
10	Расчет возможен	Расчет возможен
11	Расчет возможен	Расчет возможен
12	Расчет возможен	Расчет возможен
13	Расчет возможен	Расчет возможен
14	Расчет возможен	Расчет возможен
15	Расчет возможен	Расчет возможен
16	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
17	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
18	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
19	Расчет возможен	Расчет возможен
20	Расчет возможен	Расчет возможен
21	Расчет возможен	Расчет возможен
22	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
23	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен

Таблица 6. Результаты определения возможности расчета параметров радиолиний на ОРЧ для осенних условий (21 сентября).

Время (UTC), час	Результаты для W=10	Результаты для W=150
0	Расчет возможен	Расчет возможен
1	Расчет возможен	Расчет возможен
2	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
3	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
4	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
5	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
6	Расчет возможен	Расчет возможен
7	Расчет возможен	Расчет возможен
8	Расчет возможен	Расчет возможен
9	Расчет возможен	Расчет возможен
10	Расчет возможен	Расчет возможен
11	Расчет возможен	Расчет возможен
12	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
13	<b>Расчет невозможен</b>	Расчет возможен
14	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
15	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
16	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
17	<b>Расчет невозможен</b>	<b>Расчет невозможен</b>
18	Расчет возможен	<b>Расчет невозможен</b>
19	Расчет возможен	Расчет возможен
20	Расчет возможен	Расчет возможен
21	Расчет возможен	Расчет возможен
22	Расчет возможен	Расчет возможен
23	Расчет возможен	Расчет возможен

### 3. Обсуждение результатов

Методика определения ОРЧ коротковолновых радиолиний, исходя из соотношения

$$\text{ОРЧ} = k \times \text{МПЧ}, \quad (1)$$

широко применяется на практике. Так, например, в [2, 8] оптимальная рабочая частота определяется как частота, определяемая равенством  $\text{ОРЧ} = 0,85 \text{ МПЧ}$ . В [9] оптимальной предлагается считать частоту, составляющую 0,7-0,8 от значения МПЧ.

В ходе проведения вычислительных экспериментов проанализированы характеристики 192 радиолиний. В 42 случаях (26% от общего числа рассмотренных) в результате моделирования получено, что на частотах, определяемых по (1),  $k = 0,85$ , как оптимальные для трассы Москва-Красноярск

в рассмотренных условиях, прогнозируется отсутствие возможности прохождения радиоволн.

Для объяснения полученного результата рассмотрим угловую частотную характеристику радиолинии (см. рисунок 2) в условиях, соответствующих рисунку 1 в).

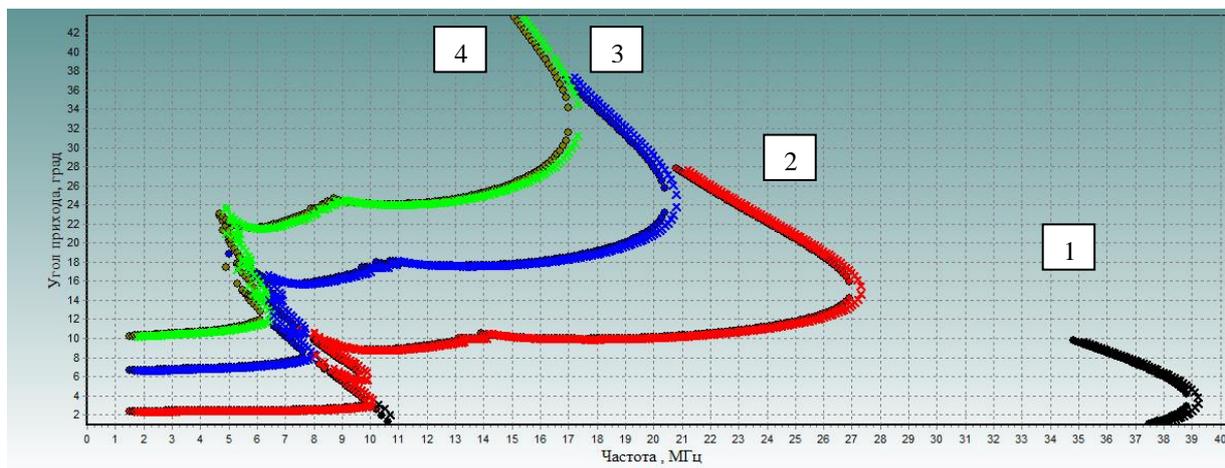


Рис. 2. Расчетная угловая частотная характеристика радиолинии Москва-Красноярск, вычисленная для условий: 21 декабря, 09 UTC,  $W = 150$ .

Цифрами 1, 2, 3 и 4 на рисунке обозначены УЧХ для радиоволн, распространяющихся одним, двумя, тремя и четырьмя скачками, соответственно. Как видно из рисунка 2, значение МПЧ первой скачковой моды (для односкачкового распространения) равно 39,3 МГц (см. также таблицу 2). При этом известно, что на высоких частотах, а МПЧ, при описании распространения радиоволн с отражением от регулярных слоев ионосферы, считается наибольшей, из возможных для организации связи в данных условиях, радиоволна способна наиболее глубоко проникать в отражающую область ионосферы и отражаться от ионосферы на наибольшей высоте. При снижении значения частоты на значение коэффициента  $k$  она должна отражаться на меньших высотах. Как видно из рисунка 2, углы прихода радиоволны первой моды на частотах, близких МПЧ составляют порядка 3 градусов. При снижении высоты области отражения радиоволны они становятся отрицательными, что и объясняет результаты проведенного расчета.

Таким образом, при определении значений МПЧ на радиолиниях, дальность которых близка к предельной дальности односкачкового распространения радиоволн, рекомендуется учитывать возможность такого «ухода области отражения радиоволны за горизонт» проводя дополнительный анализ углов прихода в диапазоне частот, близких к МПЧ, или производя дополнительные расчеты характеристик радиоволны на частотах, определяемых по (1) как оптимальные.

На практике возможно распространение радиоволн по траекториям, определяемым неоднородностями в распределении электронной концентрации вдоль трассы. Однако при составлении частотного расписания работы радиостанции более корректным является переход к рассмотрению возможности распространения радиоволны с большим количеством скачков. Так из характеристики радиолинии, представленной на рисунке 2, видно, что прохождение радиоволн двумя скачками может наблюдаться на частотах ниже 27 МГц. Соответственно, при составлении частотных расписаний, рекомендуется назначать рабочие частоты в частотном диапазоне, не превышающем данную частоту.

При организации работы радиолиний с автоматической адаптацией по частоте (или систем когнитивной радиосвязи) также желательно изначально определить набор не только разрешенных для ведения радиосвязи частот, но и частот, прохождение радиоволн на которых наиболее вероятно. Сокращение количества частот, на которых производится оперативная оценка качества радиоканала позволяет либо сократить время вхождения в связь, либо провести зондирование радиоканала на предмет отсутствия медленных замираний за то же время. Рассмотрение возможности работы в частотных диапазонах, для которых прогнозируются наилучшие условия прохождения волн, повышает качество радиосвязи.

Следует отметить, что в результате совместной работы с разработчиками программы «Трасса» удалось реализовать алгоритм автоматического анализа характеристик радиолинии, и рекомендации выбору ОРЧ радиолинии

формируются данной программой с учетом рассмотренных в данной статье особенностей ионосферного распространения радиоволн на радиоприемных дальностью 3-4 тыс. км. [7].

## **Заключение**

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что при расчете оптимальных рабочих частот коротковолновых радиоприемных дальностей которых близка к предельной дальности односкачкового ионосферного распространения, по известным методикам [2, 8, 9] необходимо учитывать возможность ухода области отражения радиоволны на частотах, определяемых как оптимальные «за горизонт». Показано, что вероятность возникновения таких ситуаций достаточно высока и, для рассмотренных условий, составила 26%.

При выполнении работ по частотному планированию работы коротковолновых радиостанций рекомендуется учитывать возможность возникновения таких ситуаций и назначать частоты с ориентацией на ионосферное распространение радиоволн с большим количеством скачков.

**Финансирование:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

## **Литература**

1. К. Дэвис. Радиоволны в ионосфере. М.: «Мир». 1973 г. – 504 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: «Сов. радио». 1972 г. – 464 с.
3. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: «Наука». – 1972 г. – 564 с.
4. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: «Наука». – 1988 г. – 528 с.
5. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Программный комплекс прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2-30 МГц «Трасса» (часть 1) // Техника радиосвязи. 2013. Вып. 1(19). С. 3-10.

6. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Программный комплекс прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2-30 МГц «Трасса» (часть 2) // Техника радиосвязи. 2013. Вып. 2 (20). С. 14-21.
7. Барабашов Б.Г., Анишин М.М., Зачатейский Д.Е., Прохоров В.Г. Пакет программ для расчета КВ радиолиний «Трасса-2» // «Радиотехника, электроника и связь» «РЭС-2017» // Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. Омск. – 2017 г. С. 74-75
8. Ионосфера Земли. Термины и определения. Стандарт предприятия СТП52.26.001-2012. М.: ФБГУ «ИПГ». – 2012 г. – 38 с.
9. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Издание 4-е. – М.: «Связь». – 1972 г. – 336 с.

**Для цитирования:**

Зачатейский Д.Е., Сысоев Д.В. О возможности существования дополнительной «мертвой» зоны, требующей учета при частотном планировании работы коротковолновых радиостанций. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.4>