

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК.:621.371.344(23) + 004.023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ДЛЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВЫСОКОГОРНЫХ РЕГИОНОВ: ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА (НА ПРИМЕРЕ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ)

Статья поступила в редакцию 10.02.2019, в окончательном варианте – 12.06.2019.

Оконов Манас, Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина, 720000, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская, 44,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сети связи и системы коммуникации», e-mail: mokonov3@gmail.com

Куцев Евгений Витальевич, Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина, 720000, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская, 44,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Сети связи и системы коммуникации», e-mail: evgeny230285@mail.ru

Боскебеев Калычбек Джетмишбаевич, Кыргызско-Российский Славянский Университет, 720000, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская, 44,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Сети связи и системы коммуникации», e-mail: kboskebeev@mail.ru

Использование радиорелейных линий является приоритетным, а порой и единственно возможным вариантом для организации радиосвязи в районах со сложными географическими условиями; при необходимости быстрой организации связи, по качеству не уступающей проводной связи, в малообжитых районах, а также при нарушении иных каналов связи в результате стихийных бедствий. Целью настоящей статьи является попытка разработки решений, направленных на повышение устойчивости связи радиорелейных линий с помощью метода пространственного разнесения приемных антенн. Описанные подходы могут быть применены к организации радиосвязи в горных районах, в том числе в Кыргызской Республике и России (Республика Дагестан, некоторые районы республик Северного Кавказа). Исследования эффективности использования пространственно-разнесенного приема производились путем анализа статистики глубины замираний относительно медианного уровня для одинарного и разнесенного приема. Эта статистика была получена методом проведения измерений параметров устойчивости на интервалах (участках) цифровых радиорелейных линий в Кыргызской республике в течение нескольких лет. В результате были получены статистические распределения глубины замираний при пространственно-разнесенном приеме для высокогорных интервалов цифровых радиорелейных линий; произведена оценка выигрыша по глубине замираний при применении пространственно-разнесенного приема; предложен более точный метод расчета глубины замираний при пространственно-разнесенном приеме.

Ключевые слова: радиосвязь, качество связи, пространственно-разнесенный прием, цифровые радиорелейные линии, замирания, множитель ослабления, длина волны, обработка данных, системный анализ

USING RADIO-RELAY COMMUNICATION LINES FOR THE SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF HIGH-MOUNTAIN REGIONS: EFFICIENCY EVALUATION OF SPATIALLY SEPARATED RECEPTION (BY THE EXAMPLE OF THE KYRGYZ REPUBLIC)

The article was received by editorial board on 10.02.2019, in the final version – 12.06.2019.

Okonov Manas, Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, 44 Kievskaya St., Bishkek, 720000, Kyrgyz Republic,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Networks and Communication Systems Department, e-mail: mokonov3@gmail.com

Kutsev Evgeny V., Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, 44 Kievskaya St., Bishkek, 720000, Kyrgyz Republic,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Networks and Communication Systems Department, e-mail: evgeny230285@mail.ru

Boskebeev Kalychbek Dzh., Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, 44 Kievskaya St., Bishkek, 720000, Kyrgyz Republic,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Networks and Communication Systems Department, e-mail: kboskebeev@mail.ru

Use of radio-relay lines is a priority, and sometimes – the only possible way to establish radio communications in geographically difficult areas; if it is necessary to establish communications rapidly, none the worse for wire ones, in poor developed areas; if other communication channels are broken due to natural disasters. The purpose of this article is to develop solutions to improve stability of communication radio-relay lines applying the technique of space-diversity reception of receiving antennas. The approaches described can find application in establishment of radio communications in mountainous areas, including the Kyrgyz Republic and Russia (the Republic of Dagestan, some regions of the Northern Caucasus republics). To study efficiency of space-diversity reception application, ratio between the statistics of fading depth and the median level for single and diversity reception was analyzed. This statistics was obtained by measuring stability parameters at intervals (sites) of digital radio-relay lines in the Kyrgyz Republic over several years. As a result, statistical distributions of fading depth for high-altitude intervals of digital radio-relay lines under space-diversity reception were obtained; gain in the fading depth under space-diversity reception was evaluated; a more accurate method to measure fading depth under space-diversity reception was suggested.

Keywords: radio communications, communication quality, diversity reception, digital radio-relay lines, fading, attenuation multiplier, wavelength, data processing, system analysis

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Обеспечение населения и организаций устойчивой связью является важной задачей, успешное решение которой необходимо для комплексной поддержки социально-экономического развития регионов, организаций и пр. В настоящее время для этих целей применяется как проводная связь, так и беспроводная. При этом наиболее сложным решением вопросов организации связи оказывается для горных районов, в которых прокладка кабельных сетей затруднена или даже невозможна.

Радиорелейная связь – это вид радиосвязи для передачи данных на большие расстояния, в котором используется цепочка приемо-передающих станций. Особенностью радиорелейных линий (РРЛ) связи является применение антенн с узкими диаграммами направленности излучения (узконаправленных антенн), с помощью которых излучаемые радиосигналы передаются от одной станции к другой [5, 6].

Таким образом, создание и обеспечение эффективной эксплуатации РРЛ имеет важное социально-экономическое значение, в том числе для поддержки развития труднодоступных горных районов; обеспечение в них доступа к «информационной среде» подразделений бизнес-структур, семей, отдельных физических лиц.

Устойчивость связи и скорость передачи данных по РРЛ сопоставимы с кабельными линиями связи [2, 3]. При этом в настоящее время РРЛ используются для организации линий связи преимущественно в районах, сложных с точки зрения прокладки кабельных линий связи. К таковым можно отнести горную местность, территории с сильно развитой гидрографической сетью и пр.

Вопросы использования пространственно-разнесенного приема (ПРП) для обеспечения устойчивости радиосвязи с помощью РРЛ являются весьма актуальными. В существующей литературе эта тематика, применительно к горным районам, рассмотрена в недостаточной степени. Поэтому целью настоящей работы является попытка разработки (обоснования) решений, направленных на повышение устойчивости связи РРЛ путем применения метода пространственного разнесения приемных антенн. Для определенности модели и метод ПРП рассматриваются применительно к Кыргызской Республике. Описанные подходы также применимы к горным районам Российской Федерации, в том числе Республике Дагестан, некоторым районам республик Северного Кавказа.

Общая характеристика проблематики статьи. В настоящее время РРЛ являются важной составной частью цифровых сетей связи как небольших организаций, так и крупных компаний [17].

Основные преимущества РРЛ:

- возможность постройки (создания) РРЛ в местности со сложными географическими условиями (горы, ущелья, развитая гидрографическая сеть, малообжитые районы, в которых другие виды связи могут быть нерентабельны – например, в арктических регионах России);
- быстрота возведения. Для запуска РРЛ необходимо установить станции в начальной и конечной точках (при необходимости также и в промежуточных);
- низкая себестоимость беспроводной трассы, использующей РРЛ;
- возможность применения РРЛ для экстренного (аварийного) обеспечения связи в зоне бедствия, при спасательных операциях, телемедицины и т.д.;
- улучшенная помехозащищенность и задержка сигнала по сравнению со спутниковыми линиями связи, ввиду значительно меньших расстояний, влияния тропосферы и ионосферы;
- качество связи не уступает проводным линиям связи [1, 4, 9].

В горных районах корреспондирующие пункты никогда не бывают на одной высоте, поэтому волна распространяется по наклонному пути. Это приводит к увеличению углов скольжения на горизонтальные отражающие слои и соответственно к уменьшению коэффициентов отражения от слоя.

На больших высотах интенсивные неоднородности возникают реже, так как наиболее сильные инверсии температуры и влажности образуются в приземном слое и уменьшаются с увеличением высоты.

Вероятность появления интенсивных слоистых неоднородностей большой протяженности в атмосфере над сильно пересеченным рельефом значительно меньше. Причина – они разрушаются восходящими и нисходящими потоками воздуха, характерными для горных районов.

На горных и высокогорных трассах РРЛ причиной флуктуации уровня сигнала является влияние неоднородностей тропосферы. Они вызывают отражение, преломление и рассеяние волны, проходящей через неоднородную среду.

На трассах РРЛ большой протяженности волна встречает на своем пути множество неоднородностей. Последние вызывают не только флуктуации, но и ослабление уровня сигнала, так как отраженные волны уходят в сторону от трассы, унося определенную долю энергии падающей волны (рис. 1) [16].

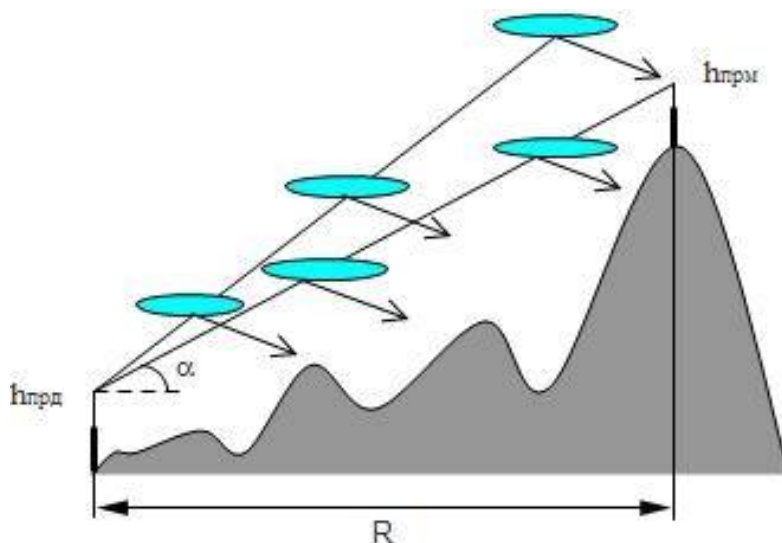


Рисунок 1 – Природа замираний

В горных районах неоднородность тропосферы особенно велика. Изменчивость неоднородностей, их непрерывное движение вызывают непрерывные изменения уровня сигнала, непрерывные замирания. Естественно, что чем больше энергии уходит из волны за счет отражений, тем больше и глубина замираний.

Другой важной причиной является также интерференция (взаимное влияние) прямой волны и волн, отраженных от неоднородностей тропосферы (см. рис. 1). В приемную антенну РРЛ сигнал может поступать как по прямому пути, так и отразившись от ровной поверхности Земли. Кроме того, отражения могут возникнуть и от облаков, и от фронта дождя.

Интерференционное замирание сигнала появляется вследствие интерференции волн, распространявшихся от передатчика к приемнику по разным переменным траекториям. Возникающие при этом разности амплитуд и фаз, например между прямым и отраженным лучами, способны существенно влиять на громкость звучания приёмника. Возможны также искажения за счет перемодуляции, когда несущая частота частично или полностью подавлена (замирание несущей). Интерференционные явления наблюдаются также при наложении поверхностных и пространственных волн.

В результате в точке приема может происходить геометрическое сложение прямой волны и отраженных волн, которые могут прийти в противофазе. При этом возникает интерференция – сложение волн и, как следствие – глубокие замирания сигнала.

При малых расстояниях волна встречает небольшое количество неоднородностей, поэтому флуктуации ее амплитуды и фазы малы. С ростом расстояния их число увеличивается, флуктуации растут, поэтому их влияние возрастает с увеличением расстояния. С удлинением волны флуктуации уменьшаются за счет того, что размеры неоднородностей становятся сравнимыми с длиной волны. В этом случае отражающее и преломляющее действие неоднородностей становится заметным лишь на волнах дециметрового и сантиметрового диапазонов и ничтожно мало на более длинных волнах.

На РРЛ могут быть применены следующие методы разнесения:

- пространственное разнесение антенн (обычно перпендикулярно трассе);
- частотное разнесение, использующее независимость замирания сигнала на частотах, разнесенных на величину, превышающую радиус частотной корреляции;
- разнесение по углу прихода луча, при котором используются одна приемная антенна и несколько облучателей, каждый из которых создает свою диаграмму направленности, сдвинутую относительно соседних по азимуту либо по углу места;
- комбинированное разнесение, например, при счетверенном приеме разнесения пар сигналов по частоте и в пространстве или по частоте и углу [7, 8].

Пространственно-разнесенный прием (ПРП) является наиболее эффективным средством борьбы с интерференционными замираниями и практически не уменьшает глубины замираний, возникающих из-за экранирующего влияния препятствия и ослабления в атмосферных осадках. На приземных интервалах радиорелейных линий он применяется, как правило, в наиболее трудных условиях: на слабопересеченных трассах и в морских районах, где даже при оптимальном выборе параметров трасс требования к устойчивости сигнала не могут быть выполнены. При необходимости ПРП применяется также на протяженных пересеченных интервалах цифровых РРЛ (ЦРРЛ) (см. графическую аннотацию).

На интервалах РРЛ с большим перепадом высот корреспондирующих пунктов, проходящих как в сухопутных, так и приморских регионах, где существенны сравнительно медленные замирания за счет экранирующего влияния слоистых неоднородностей тропосферы, эффективность использования ПРП становится проблематичной. Масштаб пространственной корреляции в такой ситуации значительно больше, чем на обычных интервалах РРЛ, поэтому для увеличения эффективности ПРП в работе [10] рекомендуется выбирать величину разнесения антенн по вертикали в длинах волн λ , как

$$\Delta h \approx (700 \div 1400)\lambda, \quad (1)$$

вместо значений

$$\Delta h \approx (150 \div 200)\lambda, \quad (2)$$

которые в большинстве случаев используются на приземных трассах с пересеченной местностью.

Данные в (1) очень ориентировочные, так как в литературе практически отсутствуют количественные сведения о масштабах пространственной корреляции на высокогорных и морских трассах с перепадом высот корреспондирующих пунктов. Можно привести лишь результаты исследования из [4], где показано, что на интервалах Бишкек – Западная (рис. 2) на частоте 3,8 ГГц

при разнесении антенн на 20 м по вертикали, что соответствует значению $\Delta h \approx 250\lambda$, коэффициент корреляции сигналов на разнесенных в пространстве приемных антенн равен примерно 0,7. Это свидетельствует о большой корреляционной связи указанных сигналов.



Рисунок 2 – Схема расположения РРЛ

Выбор разнесения в соответствии с формулой (1) в большинстве случаев затруднителен. Поэтому при оценке устойчивости работы высокогорных и горных интервалов РРЛ выигрыш от применения ПРП в «Методиках» [10, 11] не учитывался вообще.

При проектировании сети ЦРРЛ в Кыргызской Республике проектировщики действовали по аналогии с приземными трассами и учитывали выигрыш от применения ПРП на высокогорных трассах по методам расчета обычных интервалов РРЛ [5, 12, 13]. Результаты этих расчетов на практике не подтвердились. Поэтому одной из основных задач исследований, проводимых на сети ЦРРЛ Кыргызской Республики, являлась оценка эффективности ПРП, работающего по методу сложения разнесенных сигналов, в реальных высокогорных условиях. Ниже приведены результаты этих исследований.

Следует отметить, что на данном этапе эффективность ПРП ЦРРЛ производилась по сравнительной оценке статистики глубины замираний цифрового сигнала при одиарном приеме и ПРП. Это в строгой постановке отражает учет влияния коэффициента ошибок по тепловой составляющей, т.е. влияние возможных межсимвольных искажений из-за селективности замираний в пределах спектра передаваемых частот не учитывалось.

Материал и методика проведения исследований. Результаты экспериментов Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт радио» ФГУП (НИИР), проведенные ранее на высокогорном интервале РРЛ Западная – Бишкек в широкополосной аналоговой системе при передаче 1920 каналов, показали, что в высокогорных условиях влияние селективной составляющей (избирательность) на устойчивость связи незначительно [10, 11, 13]. Однако для полного решения задачи устойчивости связи применительно к ЦРРЛ необходимо дополнить эти исследования сравнительной оценкой показателя качества SESR. Это отношение числа сильно пораженных ошибками секунд к общему числу секунд в период готовности тракта за время наблюдения, полученного при одиарном приеме и ПРП, которые будут отражать все возможные причины, ухудшающие его эффективность.

Исследования эффективности ПРП производились по разным параметрам на семи интервалах (участках) ЦРРЛ. Периоды проведения исследований указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Статистика измерений устойчивости сигнала при ПРП

Название трассы	Западная – Бишкек	Ала-Мышик – Дююмеля	Бишкек – Восточная	Чолпон-Ата – Оргочор	Сары-Кыр – Узген	Майли-Суу – Кербен	Дююмеля – Сары-Кыр
Этапы измерений, год, месяцы	2016 г. май-июнь, июль, август, сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-апрель, май, июнь, июль	2016 г. июль, сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-май, июнь, июль	2016 г. май-июнь, июль, август, сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-апрель, май, июнь, июль	2016 г. май-июнь, июль, август, сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-апрель, май, июнь, июль	2016 г. июль, август, сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-апрель, май, июнь, июль	2016 г. сентябрь-декабрь. 2017 г. январь-май, июль	2016 г. июль. 2017 г. июль

Величины разнесения приемных антенн по высоте на тестируемых трассах лежат в пределах $\Delta h \approx (100 \div 340)\lambda$ (табл. 2).

Таблица 2 – Величины пространственного разнесения антенн

Название трассы	f, ГГц	Величина разнosa Δh , м	Величина разнosa в λ
Западная – Бишкек	6,8	15	340
Бишкек – Западная	6,8	12	272
Ала-Мышик – Дююмеля	6,8	12,4	281
Дююмеля – Ала-Мышик	6,8	10,2	232
Бишкек – Восточная	6,8	10	227
Восточная – Бишкек	6,8	15	340
Чолпон-Ата – Оргочор	4,7	11,5	180
Оргочор – Чолпон-Ата	4,7	6,3	98
Сары-Кыр – Узген	6,8	10	227
Узген – Сары-Кыр	6,8	10	227
Майли-Суу – Кербен	6,8	10	227
Кербен – Майли-Суу	6,8	10	227
Сары-Кыр – Дююмеля	6,8	10	227
Дююмеля – Сары-Кыр	6,8	10	227

Результаты исследований. Все приводимые ниже результаты исследований были получены с использованием статистики глубины замираний относительно медианного уровня напряженности поля ΔV . Это значение напряженности поля, необходимое для обеспечения желаемого качества приема для заданных условий приема при наличии естественных или промышленных шумов, но при условии отсутствия помех от других передающих станций (условия приема включают тип передачи и используемый диапазон частот, характеристики приемной аппаратуры (усиление, высота подвеса, направленность приемной антенны, характеристики приемника и т.д.), режимы работы приемника). Рассчитывается для 50 % мест приема и 50 % времени на высоте 10 м над уровнем Земли.

Первоначально были рассчитаны значения выигрыша при ПРП $I_{\text{ПРП}}$ по сравнению с одинарным приемом, наблюдаемые при разных значениях ΔV за различные этапы измерений при реализованном разнесении антенн $\Delta h \approx (100 \div 340)\lambda$:

$$I_{\text{ПРП}} = \frac{T(\Delta V)}{T(\Delta V)_{\text{ПРП}}}, \quad (3)$$

где $T(\Delta V)$ – время, относящееся к одинарному приему (приему с использованием одной антенны); $T(\Delta V)_{\text{ПРП}}$ – время, относящееся к ПРП приему (приему с использованием ПРП антенн).

Из этого массива данных были выбраны и усреднены значения $I_{\text{ПРП}}$, относящиеся к наихудшим по устойчивости сигнала месяцам (или этапам измерений). Результаты анализа для сухопутных высокогорных трасс представлены на рисунке 3, где показаны усредненные

зависимости $I_{прп}$ от длины трассы и нанесены экспериментальные значения $I_{прп}$ с указанием номера тестируемой трассы в соответствии с таблицей 1.

Результаты сравнительной оценки отклонений усредненных зависимостей $I_{прп} = f(R)$ от экспериментальных данных выполнены в соответствии с Рек. МСЭ-Р Р.311 [18]. Они приводятся в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная оценка усредненных и экспериментальных значений $I_{прп}$

ΔV , дБ	Статистика отклонений	
	Среднее значение, %	Стандартная девиация, %
-30	-4,6	7,0
-25	-0,2	1,1
-20	0,3	9,8

На рисунке 3 приведены также зависимости $I_{прп} = f(R)$, рассчитанные для тестируемых интервалов ЦРРЛ по Методике Рек. МСЭ-Р Р.530 [19].

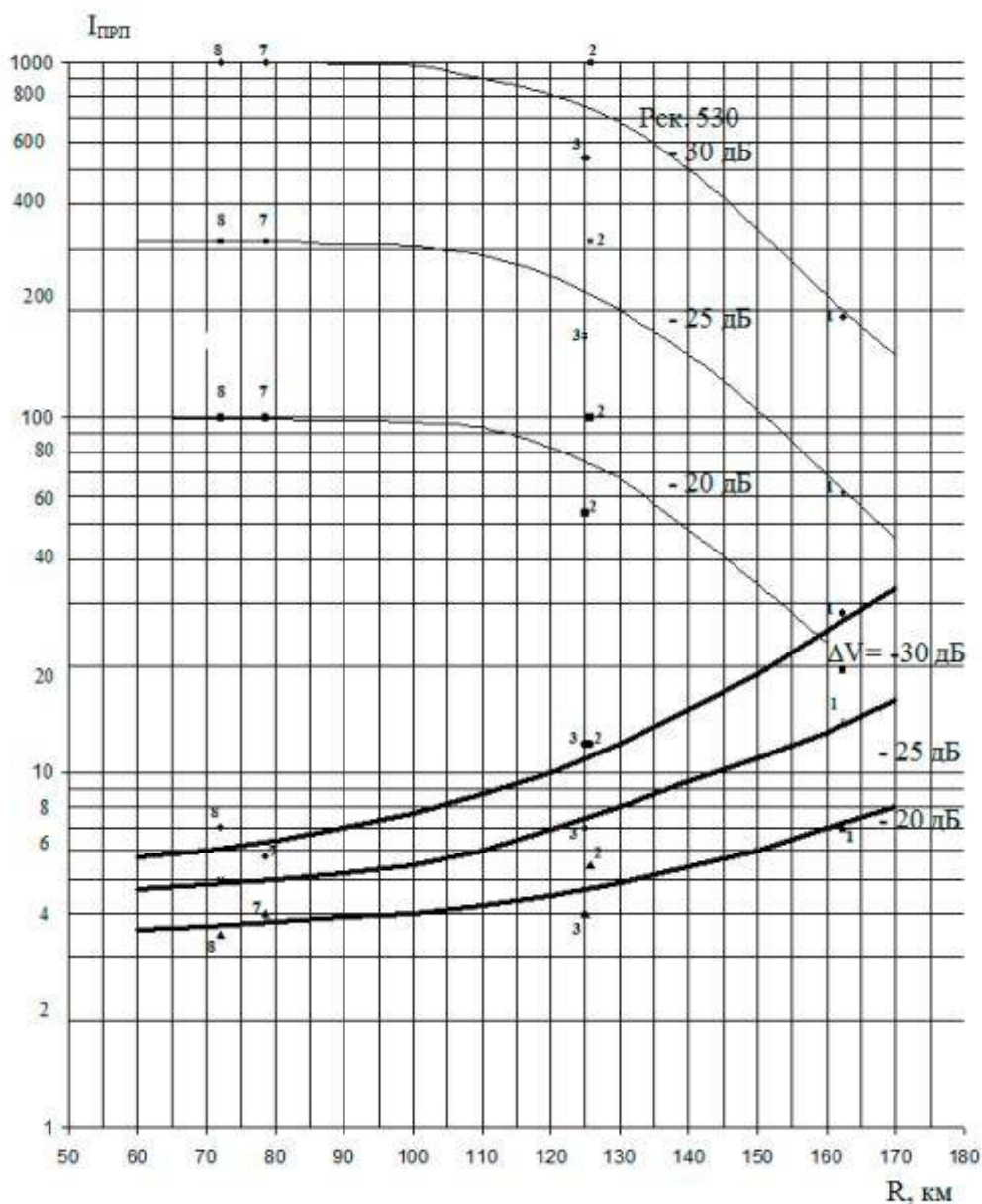


Рисунок 3 – Выигрыш при использовании ПРП на сухопутных высокогорных интервалах РРЛ:

•, x, ▲ – измерения; □, ■, * – расчет по Рек. 530

Ход данных зависимостей имеет прямо противоположный характер относительно указанной Методики. Результаты экспериментов на высокогорных трассах показывают возрастание I_{npr} при увеличении длины трассы. Это можно объяснить тем обстоятельством, что при увеличении R в общей статистике замираний возрастает влияние многолучевой рэлеевской компоненты, которая дает больший выигрыш при ПРП. Рэлеевские замирания обусловлены интерференцией большого числа рассеянных сигналов и сильным ослаблением прямого сигнала. Они бывают достаточно глубокими, и при этом отношение сигнал/шум падает настолько сильно, что полезная информация может существенно искажаться, вплоть до полной ее потери. Ультракороткие волны (УКВ), используемые в РРЛ, распространяются по прямой, но испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Следствием многолучевого распространения являются замирания и искажения принимаемого сигнала.

Реально наблюдаемый выигрыш I_{npr} значительно меньше расчетной величины. Уменьшение величины I_{npr} в диапазоне $\Delta V = -(30 \div 20)$ дБ для коротких трасс ($R = 72$ км) составляет $(165 \div 25)$ раз, а для длинных трасс ($R = 160$ км) наблюдаемое уменьшение колеблется в пределах $(8 \div 3)$ раз.

Для надводной трассы Оргочор – Чолпон-Ата, проходящей над озером Иссык-Куль, влияние многолучевой структуры поля более значительно, чем в сухопутных районах [15]. Здесь также наблюдается резкое отличие экспериментальных и расчетных данных, полученных по методу [18]. Измеренная зависимость I_{npr} от ΔV , полученная в результате усреднения, представлена на рисунке 4. На этом же рисунке приведена и расчетная зависимость [4]. Сравнение показывает, что при используемых вертикальных разнесениях антенн реально наблюдаемые значения I_{npr} в диапазоне $\Delta V = -(35 \div 20)$ дБ меньше расчетных примерно в $(57 \div 12)$ раз.

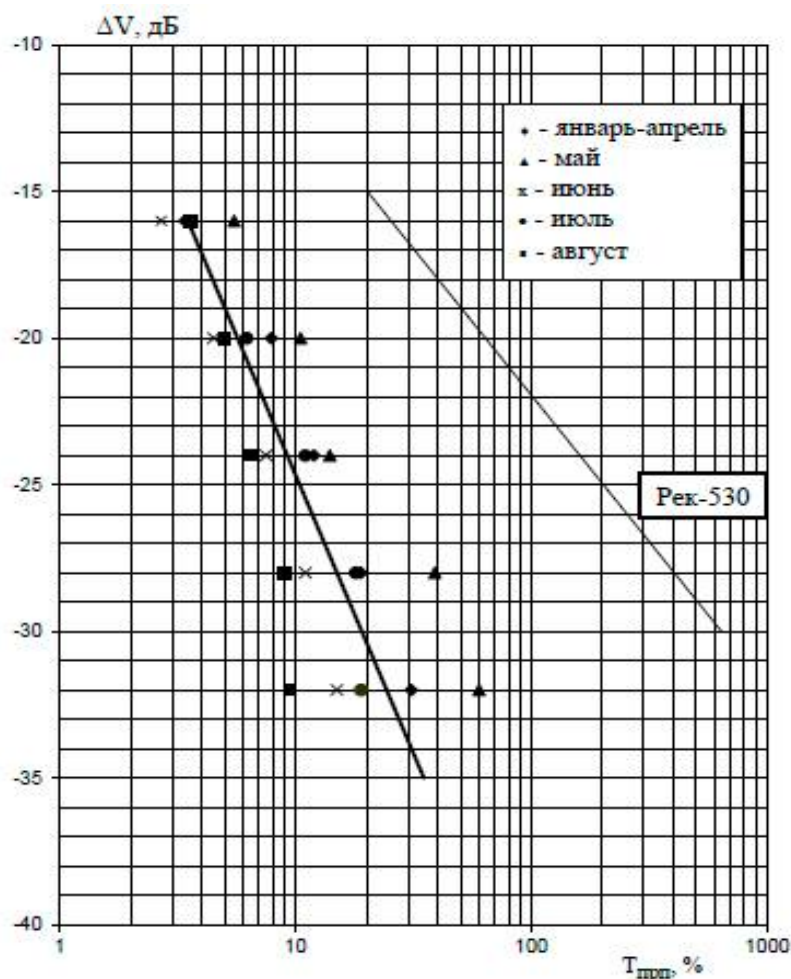


Рисунок 4 – Выигрыш при использовании ПРП на высокогорной трассе Оргочор – Чолпон-Ата, проходящей над озером Иссык-Куль: •, x, ▲ – измерения; □, ■, * – расчет по Рек. 530

В этом случае аппроксимирующее выражение для I_{npr} имеет вид:

$$I_{npr} = 0,463 \times 10^{-0,0545\Delta V}, \quad (4)$$

где ΔV – абсолютное значение, дБ.

На основе полученных результатов измерений при применении системы ПРП со сложением сигналов расчет общей неустойчивости связи, обусловленной влиянием тропосферы на высокочастотных интервалах ЦРРЛ, предлагается производить по методу, аналогичному [10]:

$$T(\Delta V_{мин})_{npr} = \nu \times C_{\Delta h} \times 10^{-2} \times [T(\Delta V_{мин})]^2, \quad (5)$$

где $\Delta V_{мин}$ – минимально допустимое значение множителя ослабления относительно медианного уровня – оно определяется минимально допустимым уровнем сигнала на входе приемника, зависящим от нормируемого показателя качества;

$T(\Delta V_{мин})$ – значение неустойчивости при одинарном приеме для $\Delta V = \Delta V_{мин}$;

ν – коэффициент, учитывающий отличие в усилениях приемных разнесенных антенн. Он равен отношению усиления (по мощности) основной антенны к разнесенной. Например, при разнице в усилениях 3 дБ величина $\nu = 2$;

$C_{\Delta h}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий статистическую зависимость замираний при пространственном разнесении антенн.

Предлагаемые для расчета значения $C_{\Delta h}$ получены по экспериментальным усредненным значениям I_{npr} , приведенным на рисунке 3, а также расчетным значениям неустойчивости при одинарном приеме $T(\Delta V)$:

$$C_{\Delta h} = \frac{100}{I_{npr} \cdot T(\Delta V)}, \quad (6)$$

где $T(\Delta V)$ выражено в %.

Значения $C_{\Delta h}$ для сухопутных высокочастотных интервалов РРЛ показаны на рисунке 5.

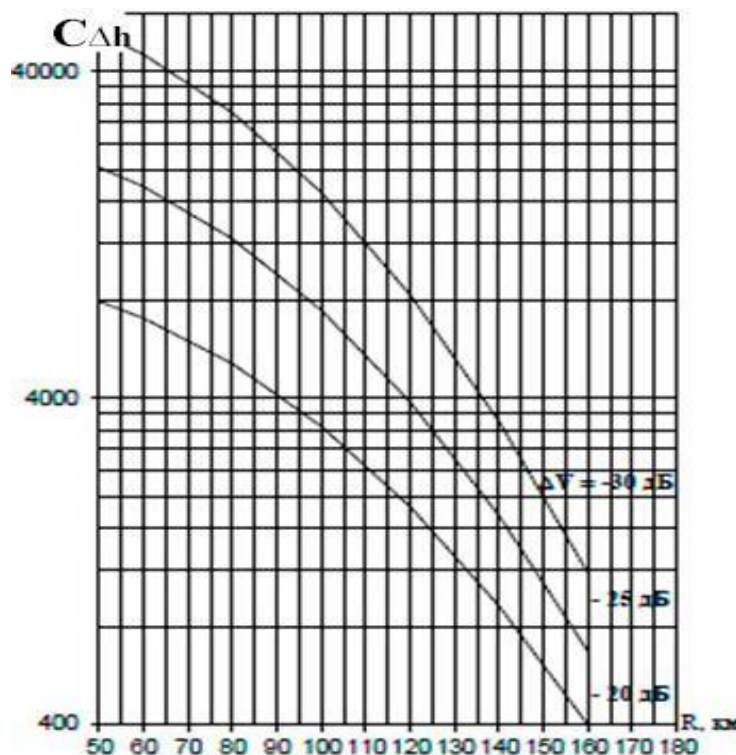


Рисунок 5 – Расчету эффективности ПРП на сухопутных высокочастотных трассах

В этом случае аппроксимирующая зависимость $C_{\Delta h}$ удовлетворительно описывается следующей формулой:

$$C_{\Delta h} = 10^{2,3+0,085 \times |\Delta V| - 2,42 \times 10^{-6} \times |\Delta V|^{0,6} \times R^{2,26}}, \quad (7)$$

где $|\Delta V|$ – абсолютное значение, дБ.

При расчете неустойчивости по формуле (5) будем полагать $|\Delta V| = |\Delta V_{\min}|$.

Для надводной трассы Оргочор – Чолпон-Ата, проходящей над озером Иссык-Куль, значения $C_{\Delta h}$ рассчитываются по эмпирической формуле:

$$C_{\Delta h} = 3,32 \times 10^{-0,0433 \Delta V}, \quad (8)$$

где ΔV – абсолютное значение, дБ.

Для сравнительной оценки точности предлагаемого метода расчета $T(\Delta V)_{нрп}$ на рисунках 6–12 приводятся экспериментальные распределения $T(\Delta V)_{нрп}$ для различных тестируемых интервалов ЦРРЛ за различные периоды времени. Кроме того, приводятся распределения $T(\Delta V)_{нрп}$, полученные в результате расчета по предлагаемой в настоящей работе формуле (5) и по методу Рек. МСЭ-Р Р.530 [19].

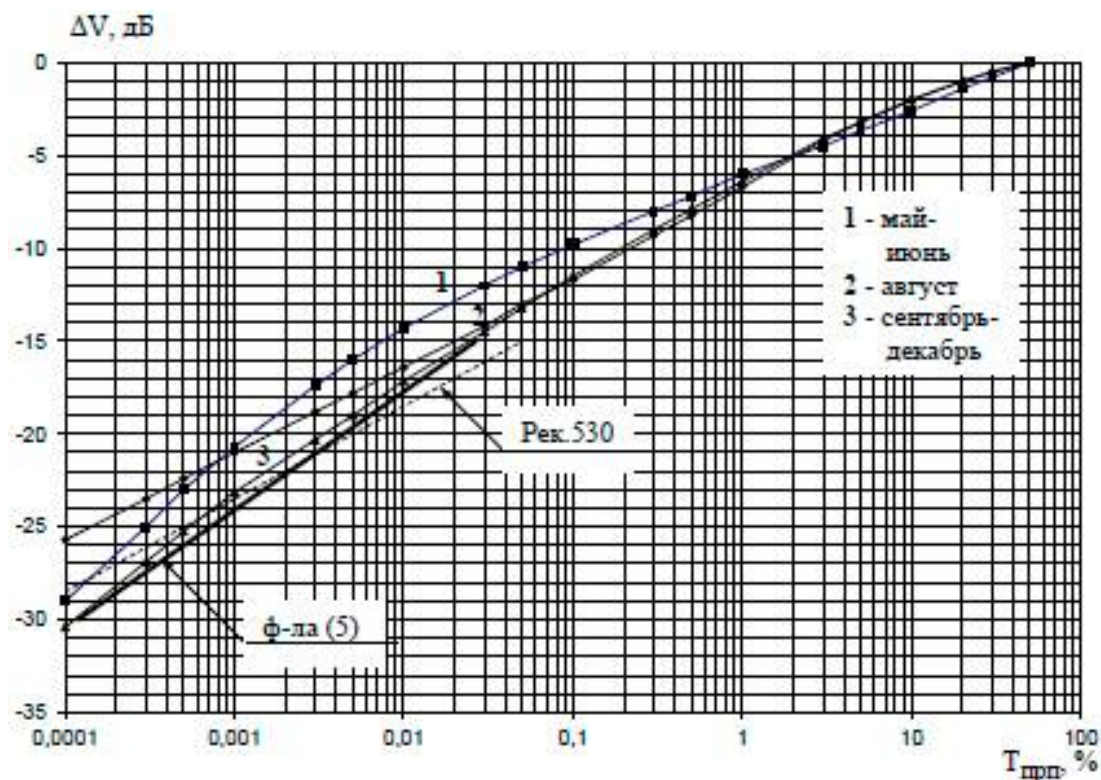


Рисунок 6 – Распределения глубины замираний на интервале Западная – Бишкек при ПРП

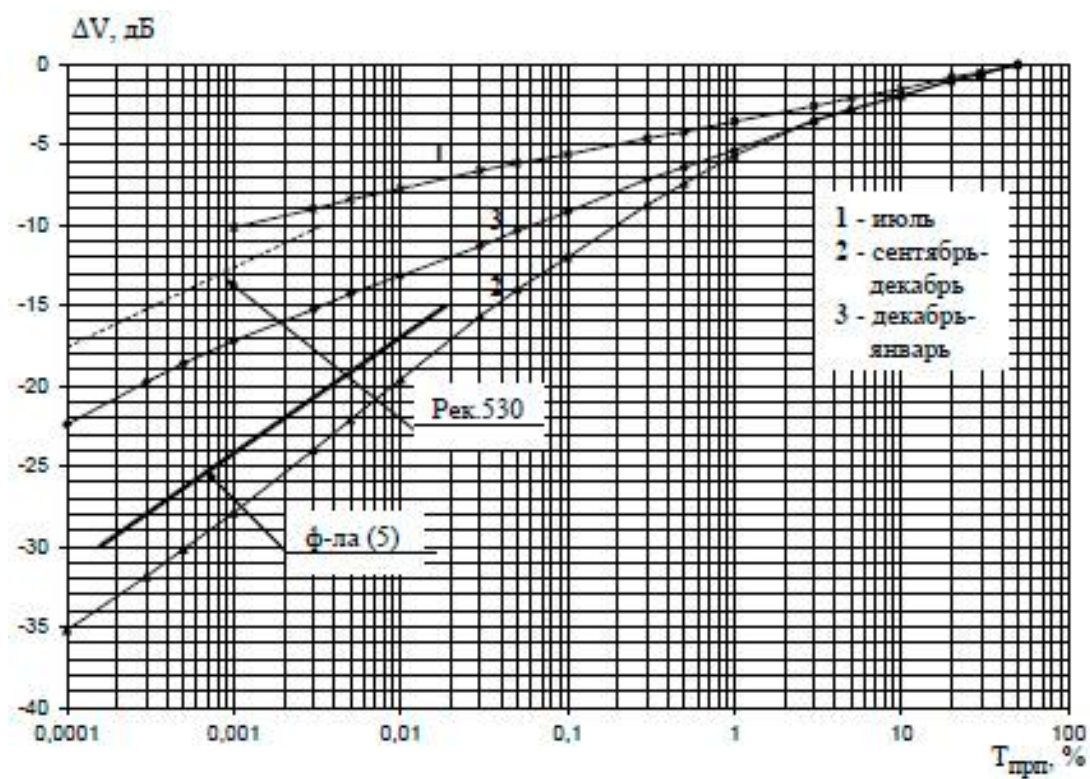


Рисунок 7 – Распределения глубины замираний на интервале Ала-Мышик – Дюдюмель при ПРП

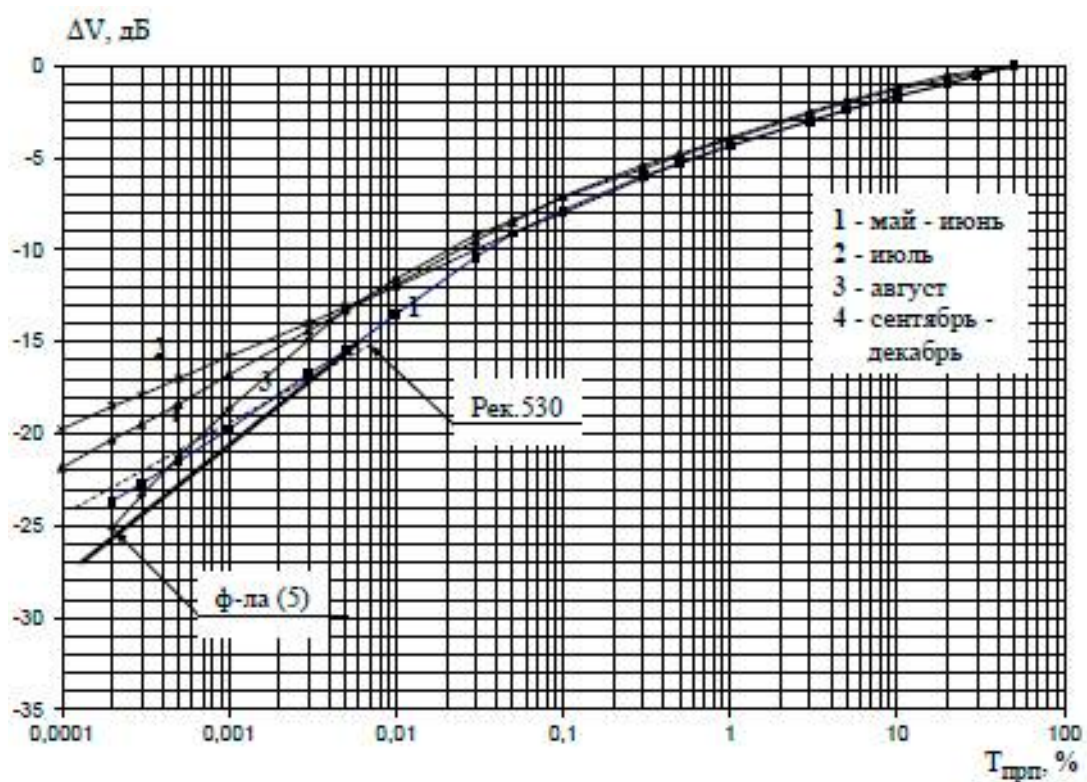


Рисунок 8 – Распределения глубины замираний на интервале Бишкек – Восточная при ПРП

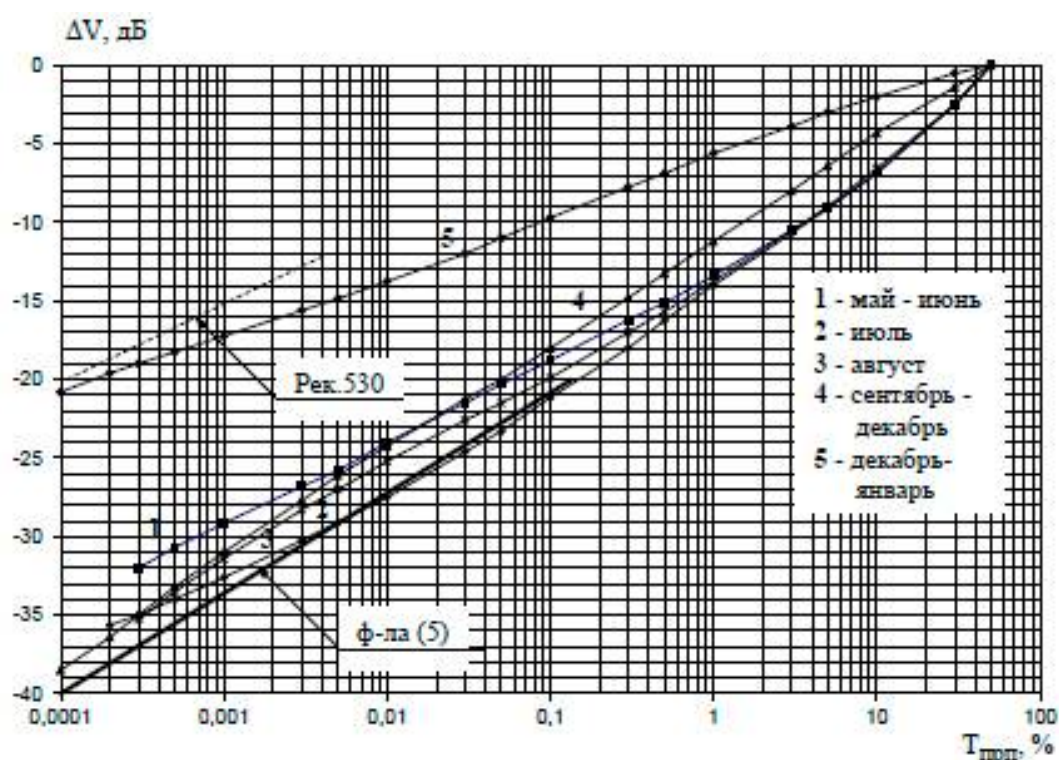


Рисунок 9 – Распределения глубины замираний на интервале Чолпон-Ата – Оргочор при ПРП

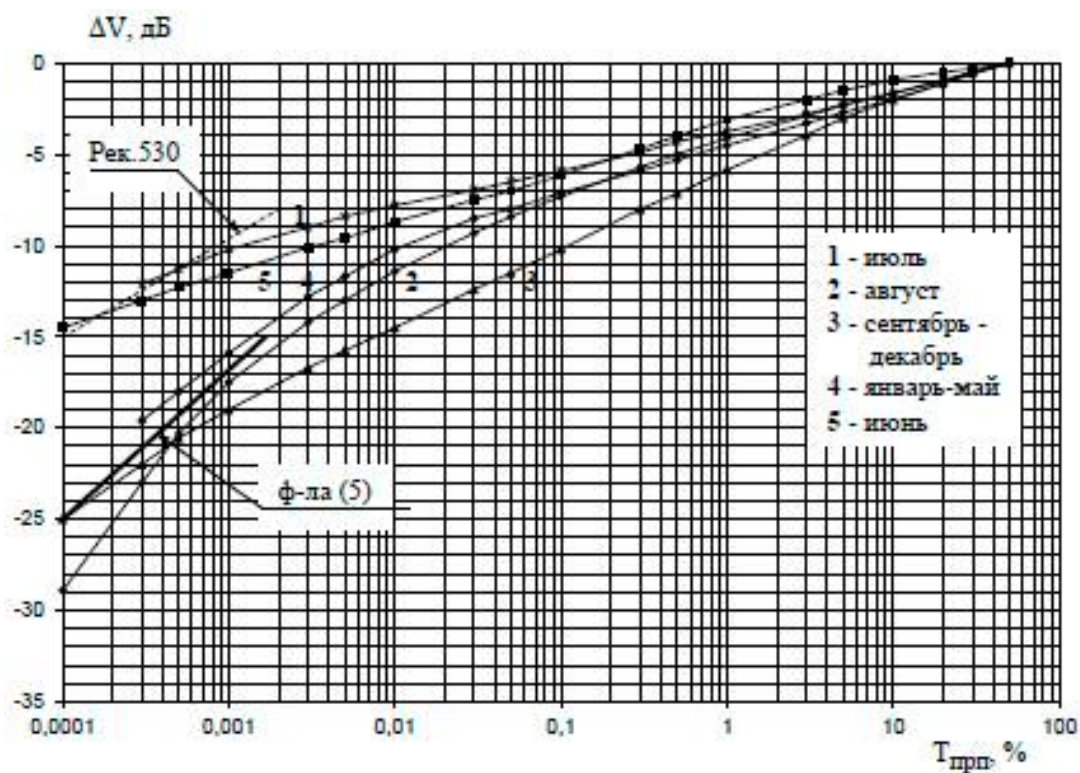


Рисунок 10 – Распределения глубины замираний на интервале Сары-Кыр – Узген при ПРП

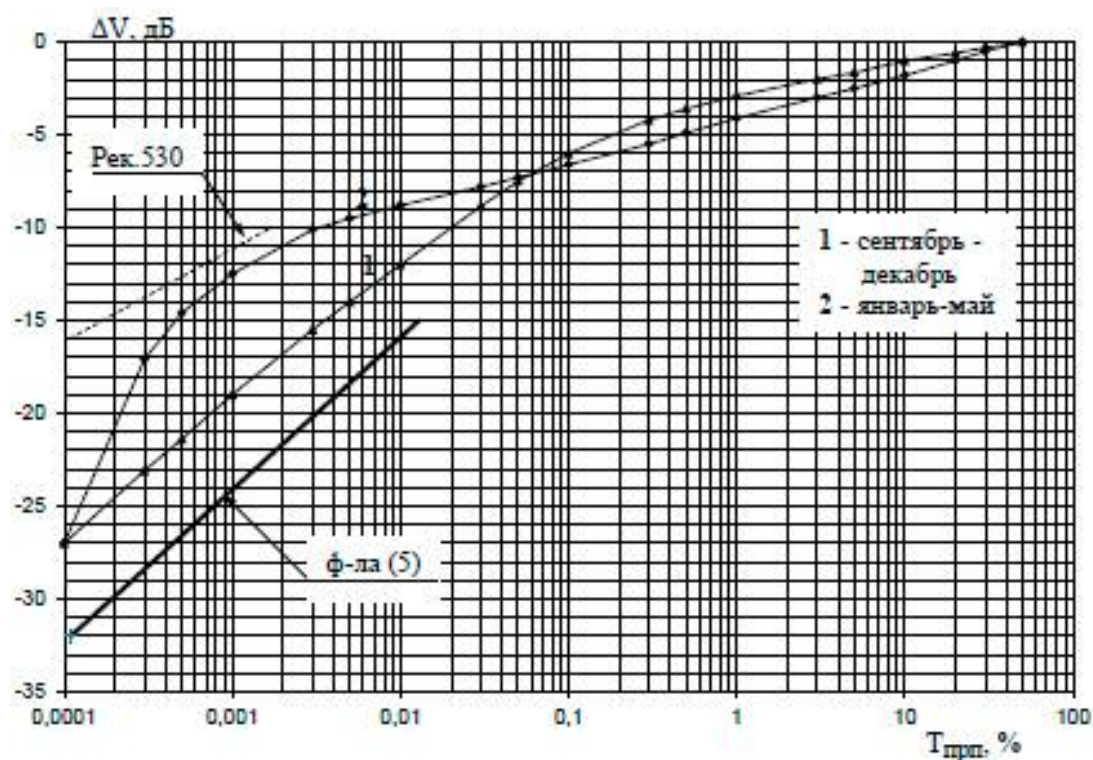


Рисунок 11 – Распределения глубины замираний на интервале Майли-Суу – Кербен при ПРП

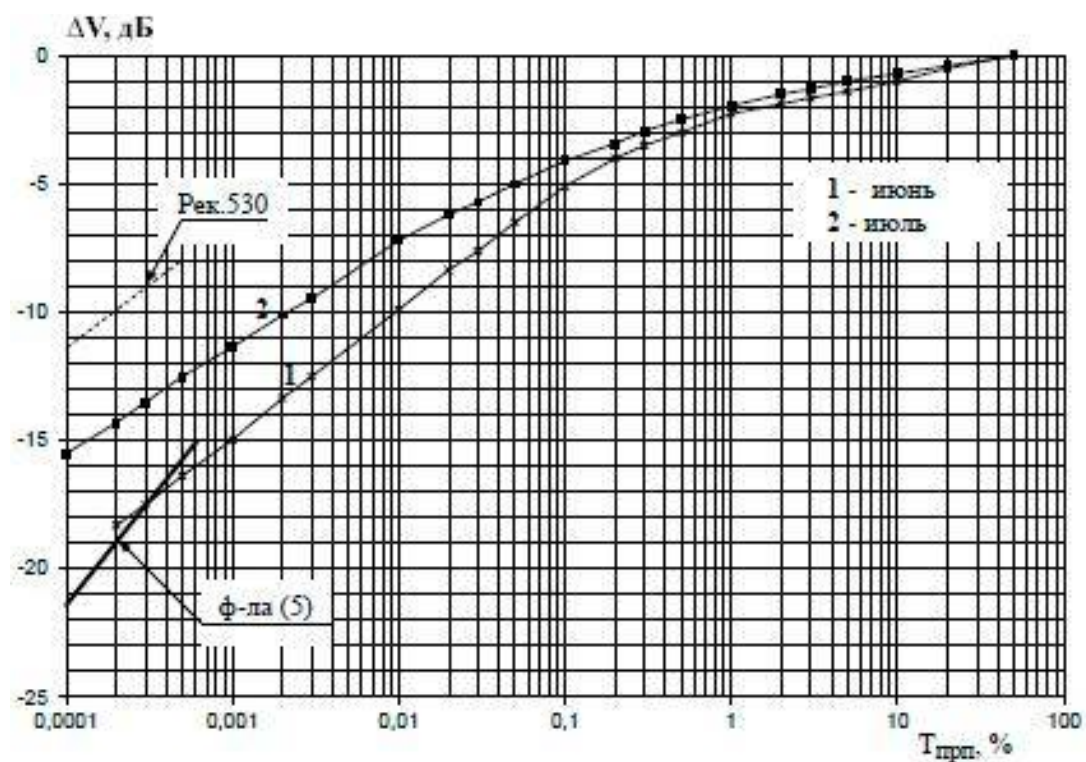


Рисунок 12 – Распределения глубины замираний на интервале Дюдюмель – Сары-Кыр при ПРП

Результаты проведенного анализа показывают следующее.

1. Расчет по Рек. МСЭ-Р Р.530 [19] дает значения, сильно отличающиеся от статистики замираний при ПРП для условий наихудшего месяца. Наихудшими с точки зрения условий распространения радиоволн месяцами являются месяцы с жаркой влажной погодой (для Кыргызской Республики это май-июнь и сентябрь-ноябрь). Как известно, методы расчета предполагают оценку статистики замираний за усредненный наихудший месяц.

2. Расчет по методу, предлагаемому в настоящей работе, является более предпочтительным, так как дает более близкие результаты к условиям наихудшего месяца.

Оценка точности предлагаемого метода расчета значений $T(\Delta V)_{npr}$, произведенная в соответствии с требованиями Рек. МСЭ-Р Р.311 [18], приводится в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка точности предлагаемого метода расчета статистики глубины замираний при ПРП

$T(\Delta V)_{npr}, \%$	Статистика ошибок	
	Среднее значение, %	Стандартная девиация, %
0,0005	0,38	10,26
0,001	2,74	12,50
0,003	-4,20	15,70
0,005	0,24	15,40
0,01	-0,09	14,90
0,03	-6,97	4,53
0,05	-5,50	4,80

В заключение необходимо отметить, что при проектировании ЦРРЛ был произведен расчет ПРП с учетом состояния готовности цифрового тракта. Это соответствует параметру качества SESR, который сравнивается с нормируемым значением распределения предельных расчетных норм на показатели ошибок по участкам тракта. Расчет произведен по формуле:

$$SESR_{npr} = T(\Delta V_{мин})_{npr} \tau < 10\text{с} = \nu \times C_{\Delta h} \times 10^{-2} \times [T(\Delta V_{мин})]^2 \times \varphi_{\tau}, \% \quad (9)$$

где значения $T(\Delta V)_{npr}$ подставляются в формулу (9) в процентах. Затем по формуле (10) рассчитывается

$$T(\Delta V) = KQ \times F(\bar{h}) \times R^{2,5} \times f^{1,5} \times (1 + |\alpha|)^{-1,2} \times 10^{\Delta V/10}, \% \quad (10)$$

где ΔV определяет глубину замираний относительно медианного уровня и рассчитывается по формуле (11)

$$\Delta V(T) = P(T)_{\text{пм}} - P_{\text{пм}}, \text{дБ}, \quad (11)$$

где $P_{\text{пм}}$ – мощность принимаемого сигнала, дБм;

KQ – климатический коэффициент, также учитывающий характер подстилающей поверхности;

φ_{τ} – коэффициент готовности тракта ЦРРЛ в условиях замираний для высокогорных интервалов.

Выводы. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований получены статистические распределения глубины замираний при ПРП на семи высокогорных интервалах ЦРРЛ. Также произведена оценка выигрыша по глубине замираний при применении ПРП с величиной разнесения $\Delta h \approx (100 \div 340)\lambda$.

Предложен метод расчета глубины замираний при ПРП для высокогорных интервалов РРЛ. Точность предложенного метода значительно увеличена по отношению к «Рекомендации МСЭ-530» для интервалов данного типа.

Библиографический список

1. Абрамова Л. В. Развитие телемедицины в Архангельской области и НАО / Л. В. Абрамова, А. В. Абрамова // Управление инновационным развитием Арктической зоны Российской Федерации : сборник избранных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Архангельск : КИРА, 2017. – С. 313–316.
2. Бобин А. А. О классификации РРС прямой видимости / А. А. Бобин // Век качества. НИИ Экономике, связи и информатики «Интерэкомс». – Москва, 2009. – № 6. – С. 15–17. – Режим доступа: <http://www.agequal.ru>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 02.03.2019).
3. Вишневский В. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей / В. Вишневский, С. Фролов, И. Шахнович // Электроника: НТБ. – 2011. – № 1. – С. 90–97.

4. Зимин И. В. Анализ целесообразных технических решений для обеспечения услуг связи в труднодоступных населенных пунктах Кыргызской республики / И. В. Зимин, К. Б. Нурматов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 1 (41). – С. 103–116.
5. Иволгин А. А. Алгоритм автоматизированного проектирования радиорелейных линий связи в радиотехнической промышленности / А. А. Иволгин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/695/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 02.03.2019).
6. Кирик Ю. М. Тенденции в развитии городской радиорелейной связи / Ю. М. Кирик // Электро-связь. – 2009. – № 3. – С. 11–13.
7. Козлов А. А. Применение адаптивных цифровых радиорелейных линий при построении транспортной подсистемы беспроводных сетей 3G и 4G / А. А. Козлов // Современные проблемы телекоммуникаций СибГУТИ : материалы научно-технической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 182–186.
8. Коновалов Л. М. Основные тенденции развития радиорелейной связи в современных условиях / Л. М. Коновалов // Теория и техника радиосвязи. – 2015. – № 1. – С. 59–63.
9. Лукьянов А. С. Анализ и преимущества радиорелейных систем от проводных линий связи / А. С. Лукьянов, С. А. Петров, М. Н. Рыкунов // Символ науки. – 2016. – № 10-2. – С. 60–62.
10. Методика расчета трасс аналоговых и цифровых РРЛ прямой видимости. – Москва : НИИР, 1987. – 181 с.
11. Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц. – Москва : ЗАО «Инженерный центр» и НИИР, 1998. – 233 с.
12. Миркин В. В. Эволюция отечественных систем радиорелейной связи / В. В. Миркин // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 372. – С. 120–125.
13. Онуфриенко Р. В. Расчет энергетических характеристик радиорелейной линии (интервала) связи / Р. В. Онуфриенко, Р. М. Сазанов // Молодой ученый. – 2017. – № 38. – С. 35–39.
14. Петренко А. А. Перспективы применения радиорелейных линий в новых частотных диапазонах 60–80 ГГц / А. А. Петренко, Ю. М. Кирик // Технологии информационного общества. – 2013. – № 9. – С. 120–122.
15. Пищин О. Н. Анализ моделей распространения радиоволн над водной поверхностью и их использование при расчетах уровней электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи / О. Н. Пищин, Н. В. Бестаева, А. Д. Зубова, А. А. Орлова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 3. – С. 121–130.
16. Слюсар В. Современные тренды радиорелейной связи / В. Слюсар // Технологии и средства связи. – 2014. – № 4. – С. 32–36.
17. Троицкий В. Н. Дальнее распространение сантиметровых, дециметровых и метровых радиоволн : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В. Н. Троицкий. – Москва, 1986.
18. Rec. ITU-R P.311-15. ITU-R Recommendations. Radiowave propagation. Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric.
19. Rec. ITU-R P.530-17. ITU-R Recommendations. Radiowave propagation. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.

References

1. Abramova L. V., Abramova A. V. Razvitiye teleditsiny v Arkhangel'skoy oblasti i NAO [The development of telemedicine in the Arkhangelsk and NAO regions]. *Upravlenie innovatsionnym razvitiem arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii : sbornik izbrannykh trudov po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Management of innovative development the Arctic zone of the Russian Federation : proceedings of the Russian scientific-practical conference with international participation]. Arkhangelsk, 2017, pp. 313–316.
2. Bobin A. A. O klassifikatsii RRS pryamoy vidimosti [About classification of line-of-sight radio relay stations]. *Vek kachestva. NII ekonomiki, svyazi i informatiki «Interekoms»* [A century of quality. Institute of Economics, Communications and Informatics "Interecom"]. Moscow, 2009, no. 6, pp. 15–17. Available at: <http://www.agequal.ru> (accessed 02.03.2019).
3. Vishnevskiy V., Frolov S., Shakhnovich I. Radioreleynye linii svyazi v millimetrovom diapazone: novyye gorizonty skorostey [Microwave radio relay lines in the millimeter band: new horizons of speeds]. *Elektronika: NTB* [Electronics: Science, Technology, Business], 2011, no. 1, pp. 90–97.
4. Zimin I. V., Nurmatov K. B. Analiz tselesoobraznykh tekhnicheskikh resheniy dlya obespecheniya uslug svyazi v trudnodostupnykh naselennykh punktakh Kyrgyzskoy Respubliki [Creation of opportunities for communication services delivering to hard reachable settlements in Kyrgyz Republic]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2018, no. 1 (41), pp. 103–116.
5. Ivolgin A. A. Algoritm avtomatizirovannogo proektirovaniya radioreleynykh liniy svyazi v radio-tekhnicheskoy promyshlennosti [Algorithm of automated design of radio relay communication lines in the radio engineering industry]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/695/> (accessed 02.03.2019).
6. Kirik Yu. M. Tendentsii v razvitiy gorodskoy radioreleynoy svyazi [Trends in the development of urban radio relay communication]. *Elektrosvyaz* [Telecommunication], 2009, no. 3, pp. 11–13.

7. Kozlov A. A. Primenenie adaptivnykh tsifrovyykh radioreleynykh liniy pri postroenii transportnoy podsistemy besprovodnykh setey 3g i 4g [Using of adaptive digital radio-relay lines when building the transport subsystem of 3G and 4G wireless networks]. *Sovremennyye problemy telekommunikatsiy SibGUTI : materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Modern problems of telecommunications SibSUTI : materials of the scientific-technical conference]. Novosibirsk, 2015, pp. 182–186.
8. Kononov L. M. Osnovnye tendentsii razvitiya radioreleynoy svyazi v sovremennykh usloviyakh [The main trends in the development of radio relay communication in modern conditions]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Theory and technics of radio communication], 2015, no. 1, pp. 59–63.
9. Lukyanov A. S., Petrov S. A., Rykunov M. N. Analiz i preimushchestva radioreleynykh sistem ot provodnykh liniy svyazi [Analysis and advantages of radio relay systems from wired communication lines]. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, no. 10-2, pp. 60–62.
10. *Metodika rascheta trass analogovykh i tsifrovyykh RRL pryamoy vidimosti* [The method of calculating the routes of analog and digital line-of-sight radio relay links]. Moscow, 1987. 181 p.
11. *Metodika rascheta trass tsifrovyykh RRL pryamoy vidimosti v diapazone chastot 2-20 GGts. ZAO «Inzhenernyy tsentr» i NIIR* [The method of calculating routes of digital line-of-sight radio relay links in the frequency band 2-20 GHz. CJSC “Engineering Center” and SRIR], 1998. 233 p.
12. Mirkin V. V. Evolyutsiya otechestvennykh sistem radioreleynoy svyazi [Evolution of domestic radio relay communication systems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2013, no. 372, pp. 120–125.
13. Onufrienko R. V., Sazanov R. M. Raschet energeticheskikh kharakteristik radioreleynoy linii (interval) svyazi [Calculation of the energy characteristics of radio relay links (intervals)]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2017, no. 38, pp. 35–39.
14. Petrenko A. A., Kirik Yu. M. Perspektivy primeneniya radioreleynykh liniy v novykh chastotnykh diapazonakh 60-80 GGts [Prospects for the use of radio-relay links in the new frequency bands 60-80 GHz]. *Tekhnologii informatsionnogo obshchestva* [Information Society Technologies], 2013, no. 9, pp. 120–122.
15. Pishchin O. N., Bestaeva N. V., Zubova A. D., Orlova A. A. Analiz modeley rasprostraneniya radiovoln nad vodnoi poverhnostyu i ih ispolzovanie pri raschetah urovnei elektromagnitnogo polya v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi [Analysis of models of radiowave propagation over water surface and use of them while calculating level of electromagnetic field in the mobile radio communication systems]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 3, pp. 121–130.
16. Slyusar V. Sovremennyye trendy radioreleynoy svyazi [Modern trends of radio relay communication]. *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Technologies and means of communication], 2014, no. 4, pp. 32–36.
17. Troitskiy V. N. *Dalnee rasprostranenie santimetrovykh, detsimetrovykh i metrovykh radiovoln* [Further propagation of centimeter, decimeter and meter radio waves]. Moscow, 1986.
18. *Rec. ITU-R P.311-15. ITU-R Recommendations. Radiowave propagation. Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric.*
19. *Rec. ITU-R P.530-17. ITU-R Recommendations. Radiowave propagation. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.*