

УДК 537.86

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА

*Б. Г. Барабашов* \*, *А. С. Огарь*, *О. Ю. Пелевин*, *Л. П. Радио*

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

По результатам продолжительных измерений на среднеширотных калиброванных радиотрассах сделано заключение, что процессы, ответственные за энергетические характеристики поля высокочастотных волн, обладают инерционными свойствами. Медленные (в течение часа) абсолютные изменения среднего уровня сигнала и эффективного уровня шума в дневные и ночные часы не превышают 2,0 дБ. Аналогичные изменения средних уровней сигнала в сумеречные часы после удаления тренда, обусловленного суточным ходом ионосферных характеристик, также ниже 2,0 дБ. Анализ поведения во времени относительной частоты появления ошибок при передаче бинарных последовательностей с амплитудной манипуляцией показал, что при усреднении результатов приёма за 20 мин эта частота меняется в течение часа в пределах 20÷75 %.

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях сильной изменчивости условий распространения радиоволн в ионосфере в течение суток и года, при планировании сеансов связи необходимо иметь оперативный прогноз характеристик радиоканала непосредственно перед установлением связи и во время сеансов. Согласно рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ) 889-2 [1], такой прогноз позволит обеспечить высококачественную высокочастотную связь даже при неблагоприятных условиях распространения, что делает её достойной альтернативой спутниковой связи.

При прогнозировании качества передачи дискретных сообщений традиционно рассчитывается ожидаемая зависимость вероятности ошибки от среднего отношения сигнал/шум. При оперативном прогнозе важной составляющей является информация о кратковременной стабильности найденной зависимости. Именно стабильность определяет упреждение (время действия прогноза) — промежуток времени, на который распространяется прогноз. Понятно, что упреждение зависит от временной стабильности энергетических характеристик канала: среднего уровня сигнала и среднего эффективного уровня помехи.

Наиболее достоверные сведения о кратковременной стабильности этих характеристик могут быть получены только на основании измерений на трассах. Однако следует отметить, что в литературе практически отсутствуют надёжные эмпирические данные по стабильности энергетических характеристик высокочастотного канала. В единичных публикациях по этой тематике, в частности в работе [2], на основании продолжительных наблюдений за динамикой напряжённости поля сигналов на радиотрассах с различной протяжённостью было указано на определённую инерционность характеристик узкополосного ионосферного канала, но, к сожалению, без её количественных оценок.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований на калиброванных среднеширотных радиотрассах, позволившие для энергетических характеристик узкополосного канала — среднего уровня сигнала и среднего эффективного уровня помех — оценить их стабильность в пределах часа. Полученные результаты являются дополнением и расширением эксперименталь-

\* barabashov@aaanet.ru

Таблица 1. Характеристики баз экспериментальных данных

№	Протяжённость трассы, км	Азимут трассы, градусы	Частота, МГц	Мощность излучения, кВт	Время наблюдения, годы	Продолжительность измерений, часы
1	396	184,0	5,10	2,0	1980–1983	1 600
2	1 050	30,4	9,70; 13,60	0,5	2013	4 000
3	990	351,0	8,50; 10,90	1,0	2009–2010	
4	950	355,0	4,99; 9,99	5,0; 8,0	2010	
5	2 286	97,0	4,60	1,0	2014	
6	551	102,0	2,50; 5,00	2,5; 10,0	2004–2005	1 150
7	1 021	30,4	9,50; 13,60	0,5	2013	360

ных данных, приведённых ранее в [3]. Помимо перечисленных характеристик в работе исследуется поведение во времени относительной частоты появления ошибок при передаче бинарных сигналов с амплитудной манипуляцией.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Измерения проводились на среднеширотных трассах с протяжённостью  $400 \div 2\,300$  км. Характеристики трасс приведены в табл. 1. Измерения велись в дневные и ночные часы суток и охватывали различные сезоны.

Для сбора данных применялись измерительные стенды, в состав которых входили активные штыревые антенны, расположенные на высоте  $10 \div 15$  м; специализированные цифровые приёмники с динамическим диапазоном 60 дБ; компьютеры. Управляющие программы позволяли в автоматическом режиме регистрировать сигналы на рабочих частотах по заданному списку.

На частотах 4,99; 9,70; 9,99, 13,60 МГц принимался немодулированный сигнал на несущей частоте, на частоте 4,6 МГц — сигнал с частотной модуляцией. На частотах 8,5 и 10,9 МГц принималась бинарная последовательность с амплитудной манипуляцией и длительностью элементарной посылки 200 мс. Таким образом, в этом случае длительность битовой посылки информационного сигнала превышала максимальные межмодовые задержки.

С выхода усилителя промежуточной частоты приёмника сигнал оцифровывался с частотой дискретизации 10 кГц и далее фильтровался цифровым фильтром с полосой 3,0 кГц. Полученный таким образом цифровой поток передавался в компьютер и непрерывно записывался на жёсткий диск.

Далее сигнал и шум обрабатывались отдельно. Для выделения сигнала и шума использовался цифровой фильтр с полосой 100 Гц. Смещение (отстройка) центральной частоты шума от аналогичной частоты сигнала составляла 300 Гц.

Во всех случаях для передачи сигнала применялись слабонаправленные антенны с известными диаграммами направленности. Мощность передатчиков постоянно контролировалась, периодически проводилась калибровка приёмного тракта. Приём сигналов в узкой полосе частот позволял существенно увеличить отношение сигнал/шум. Случаи, когда отношение сигнал/шум было менее 20 дБ, исключались при обработке. В результате инструментальная погрешность определения напряжения сигнала на входе приёмника составила не более 2 дБ.

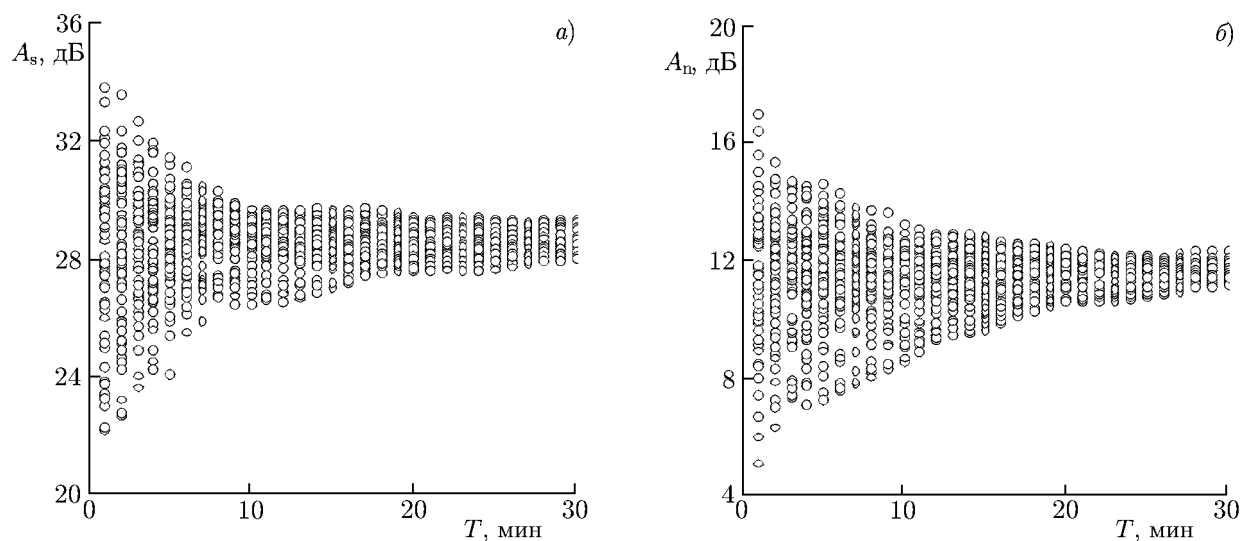


Рис. 1. Средний уровень сигнала  $A_s$  (а) и шума  $A_n$  (б) при различном времени усреднения  $T$

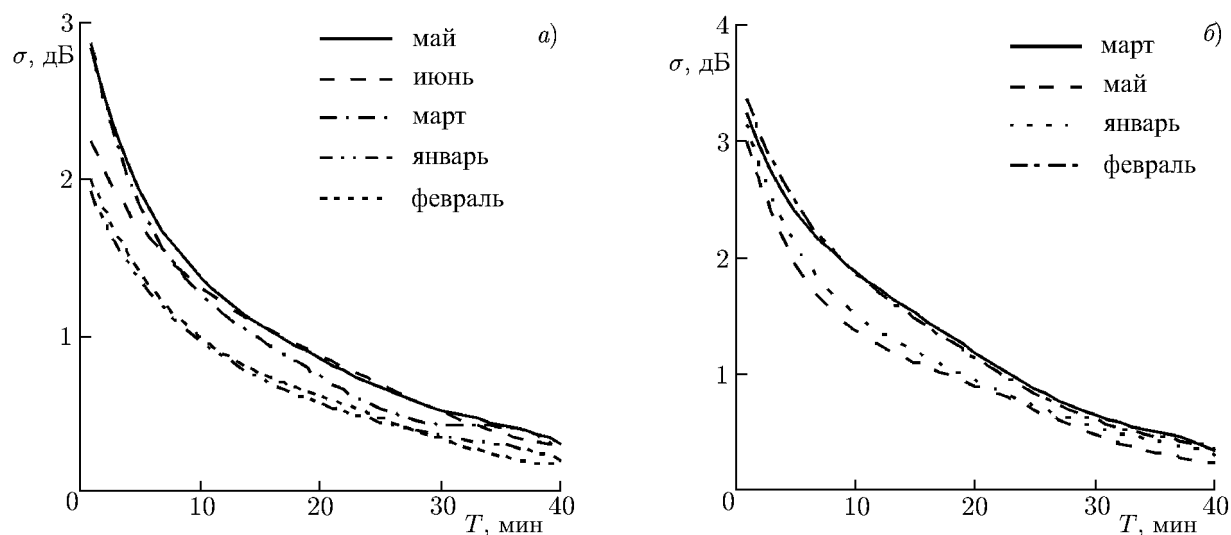


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной ошибки определения среднего уровня сигнала от времени усреднения в дневные часы для частоты сигнала 8,5 МГц (а) и 10,9 МГц (б)

## 2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для оценки кратковременной стабильности поля сигнала была принята следующая последовательность обработки. Прежде всего удалялся тренд, описывающий регулярные суточные изменения уровня сигнала. Для этого методом, изложенным в работах [4, 5], рассчитывался прогнозируемый суточный ход уровня сигнала для периодов наблюдения. После чего в начале каждого обрабатываемого часа проводилась калибровка прогнозируемого уровня по измеренным значениям. Далее временной ряд мгновенных значений уровня сигнала сглаживался скользящим средним со временем (окном) усреднения 20 мин.

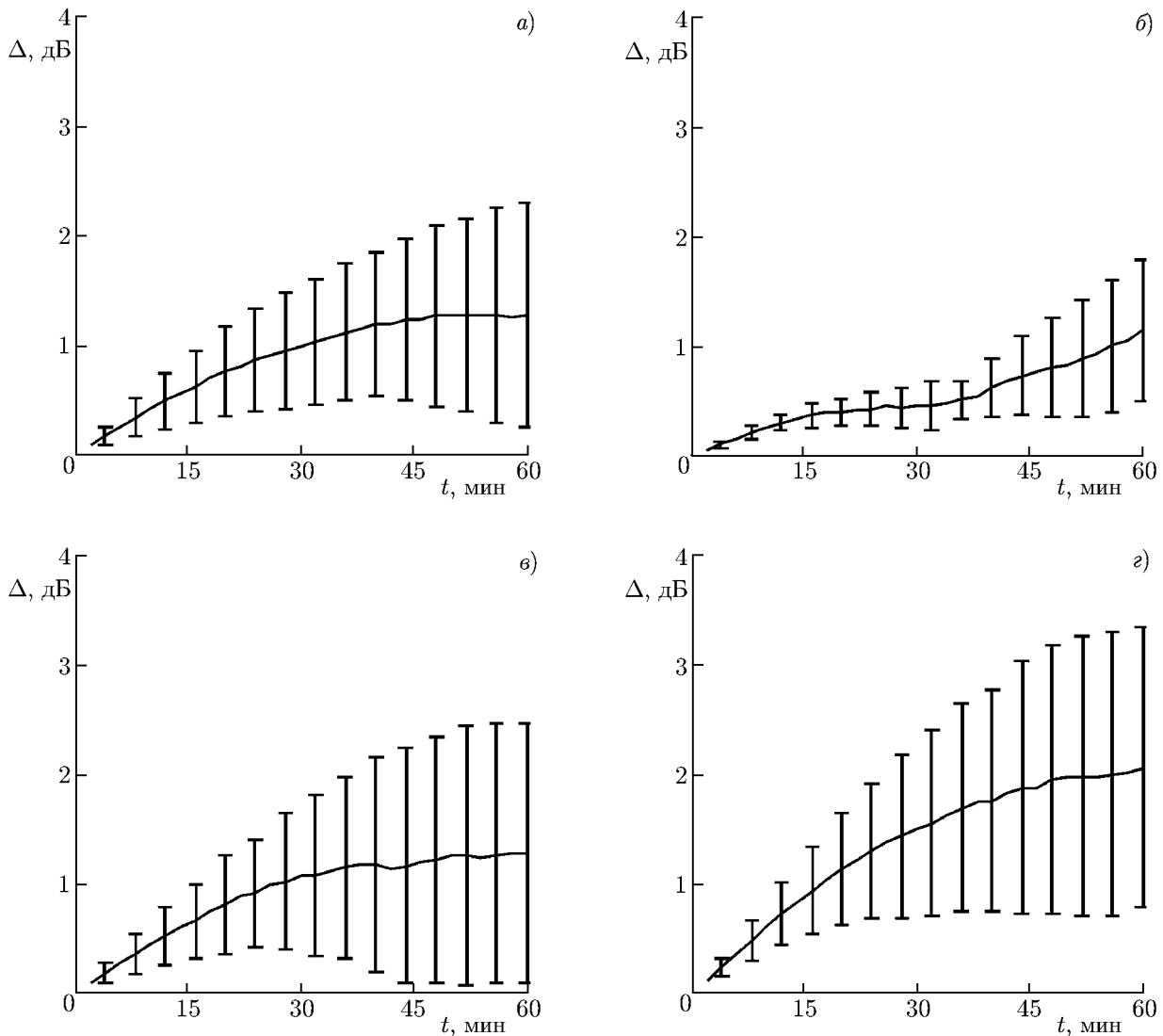


Рис. 3. Изменение  $\Delta$  уровня сигнала в течение часа на частотах 8,5 (а, б, май 2010 года) и 10,9 МГц (в, г, июль 2010 года) в дневные (а, в) и ночные (б, г) часы

На выборе времени усреднения следует остановиться отдельно. Энергетические свойства канала при известной мощности излучения зависят от потерь при распространении волны. Основные виды потерь следующие: ионосферное поглощение, пространственное ослабление, поляризованное рассогласование, потери при отражении от земли. Средние величины этих видов потерь медленно меняются во времени, и для их корректной экспериментальной оценки необходимо исключить быстрые флуктуации поля. В узкополосном высокочастотном канале быстрые флуктуации — результат интерференции лучей. Временная зависимость амплитуды суммарного электрического поля представляет собой нестационарный случайный процесс. Время локальной стационарности сигнала редко превышает несколько десятков секунд, интервал корреляции имеет примерно такой же порядок величины. Для исключения быстрых флуктуаций время усреднения должно быть много больше интервала корреляции. На практике это  $10 \div 30$  мин.

В подтверждение приведём типичный пример зависимости среднего уровня сигнала и шума от ширины окна усреднения  $T$  при  $T = 1 \div 30$  мин для измерений на трассе с протяжённостью

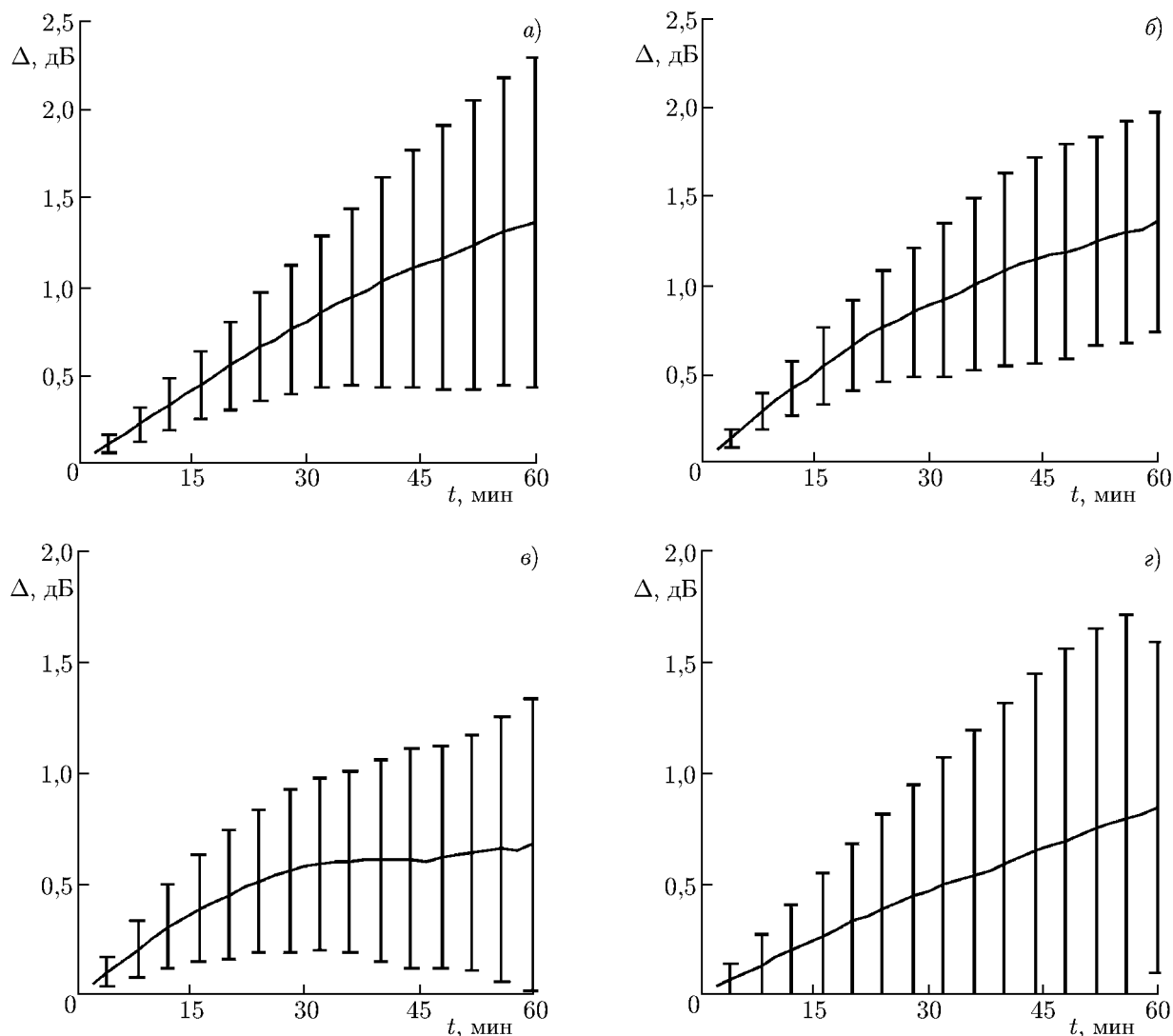


Рис. 4. Изменение  $\Delta$  эффективного уровня шума в течение часа в мае 2010 года на частотах 8,5 (а, б) и 10,9 МГц (в, г) в дневные (а, в) и ночные (б, г) часы

990 км. На рис. 1 приведён пример такой зависимости для одного часа одного дня измерений.

Далее для каждого интервала  $T$  можно рассчитать среднеквадратичное отклонение скользящего среднего уровня сигнала (при ширине окна  $T$ ) от среднего уровня за час и усреднить полученные величины за месяц. На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости указанного отклонения.

Из рис. 1 и 2 следует, что для корректной оценки средних уровней сигнала и шума, характеризующих энергетические свойства высокочастотного канала, время усреднения должно составлять не менее 15÷20 мин.

В нашем случае для сглаживания временных рядов мгновенных значений сигнала и шума было принято скользящее среднее с окном усреднения 20 мин. При таком времени усреднения ошибка оценки средних уровней, как следует из рис. 2, не превышает 1 дБ. Данные таким образом сглаживались на 60-минутных записях путём перемещения окна по ряду с постоянным шагом 2 мин, после чего из каждой точки сглаженного ряда вычиталась его исходная точка (начало

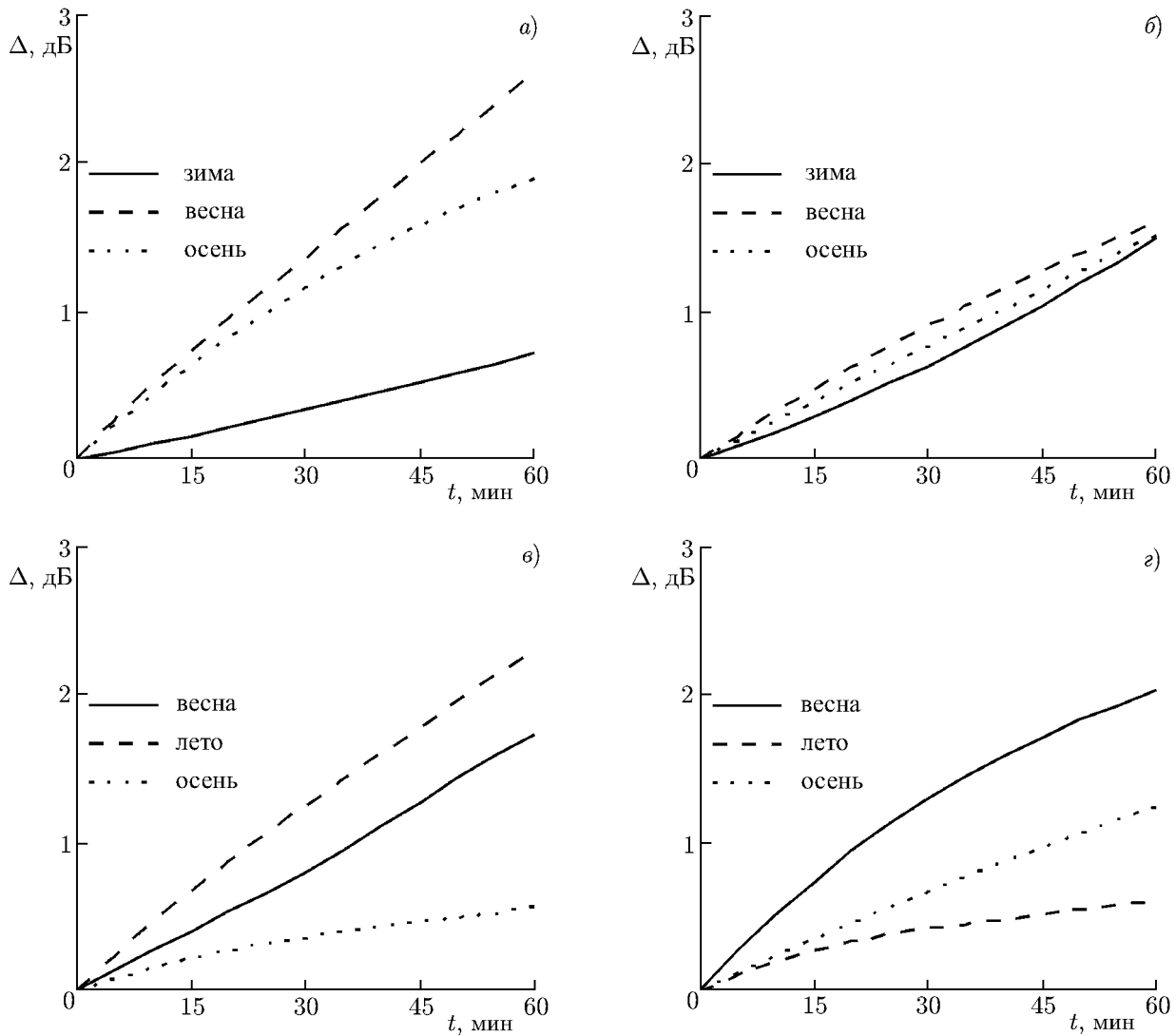


Рис. 5. Изменение  $\Delta$  уровня сигнала в течение часа на частотах 8,5 (а, б) и 10,9 МГц (в, г) в утренние (а, в) и вечерние (б, г) часы

часа), и полученное в результате отклонение  $\Delta$  усреднялось за месяц.

На рис. 3 (частоты 8,5 и 10,9 МГц) приведены типичные зависимости абсолютного изменения среднего уровня сигнала  $\Delta$  от времени, полученные на трассе с протяжённостью 990 км в дневные и ночные часы. На рис. 4 — зависимости абсолютного изменения эффективного уровня шума от времени, полученные на той же трассе. На графиках по горизонтальной оси отложено время в минутах, по вертикальной — изменение уровня в дБ; сплошные кривые соответствуют результатам усреднения за месяц, вертикальные линии — среднеквадратичным отклонениям от среднемесячных значений.

Примеры зависимостей кратковременных изменений уровня сигнала в сумеречные часы для разных сезонов приведены на рис. 5. Считалось, что именно они характеризуют не связанные с движением терминатора кратковременные изменения уровня.

Из-за почти полного подобия аналогичные зависимости для других трасс на рисунках не представлены. Обобщённые результаты (трасса с протяжённостью 990 км) для средних отклоне-

Таблица 2. Изменение  $\Delta$  (в дБ) среднего уровня сигнала и шума в течение часа

Период наблюдения	Частота, МГц	День		Ночь		Сумеречные часы
		сигнал	шум	сигнал	шум	сигнал
весна 2009	10,9	1,3	1,2	—	—	—
лето 2009	10,9	1,1	—	—	—	—
осень 2009	8,50	1,1	1,4	—	1,9	1,3
зима 2010	10,9	1,1	1,0	—	2,3	—
	8,50	1,4	1,0	1,4	1,7	1,0
весна 2010	10,9	1,7	1,1	1,6	1,6	1,9
	8,50	1,4	0,8	2,3	0,9	2,1
лето 2010	10,9	1,2	1,0	1,9	1,7	1,2
	8,50	—	0,7	—	0,8	—
осень 2010	10,9	1,4	0,7	—	0,9	0,8
	8,50	1,7	0,7	—	1,5	1,5
средние значения	10,9	1,3	1,0	1,7	1,5	1,2
	8,50	1,4	0,9	1,8	1,3	1,4

ний  $\Delta$  в дБ за час помещены в табл. 2.

Из рис. 3, 4 и табл. 2 можно составить представление о возможных изменениях уровней сигнала и шума в течение часа. В подавляющем большинстве случаев эти изменения не превышали 2 дБ. Нет также заметной зависимости от сезона, времени суток и протяжённости трассы.

### 3. АНАЛИЗ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОШИБОК

При передаче цифровой информации по ионосферному каналу средний уровень сигнала или отношение сигнал/шум не являются однозначным индикатором качества линии связи [1]. Более полноценный способ описания канала основан на определении относительной частоты появления или отсутствия ошибки. Поскольку частота появления ошибок не постоянна в различные периоды времени, то, как и в случае отношения сигнала/шум, при определении её среднего значения необходимо проводить усреднение за время  $T$ , достаточное для получения заданной точности.

Представление о зависимости относительной частоты появления ошибок от времени усреднения  $T$  дают зависимости на рис. 6 — типичные для эксперимента на трассе с протяжённостью 990 км. На графиках по вертикали отложена относительная частота появления ошибок (относительное число ошибок за время усреднения), по горизонтали — местное время наблюдения. Рабочая частота составляла 7,0 МГц; среднее отношение сигнал/шум за 20 мин — примерно 20 дБ, средняя за час относительная частота  $P_{cp} = 0,009$ . Здесь  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение относительной частоты.

Было проведено детальное исследование инерционных свойств частоты появления ошибок, т. е. способности канала сохранять статистические характеристики на некоторое время вперёд.

Применялась методика обработки, аналогичная описанной выше. Трёхчасовой сеанс наблюдения разбивался на 20-минутные отрезки. Сдвиг между отрезками составлял 2 мин. На каждом отрезке находилось среднее значение относительной частоты появления ошибок. Для распознавания правильно или ошибочно принятой битовой посылки применялась решающая схема с переменным порогом. Затем определялось изменение относительной частоты  $\delta$  появления ошибки на каждом отрезке по отношению к её значению на начало обрабатываемого часа. Таким образом,

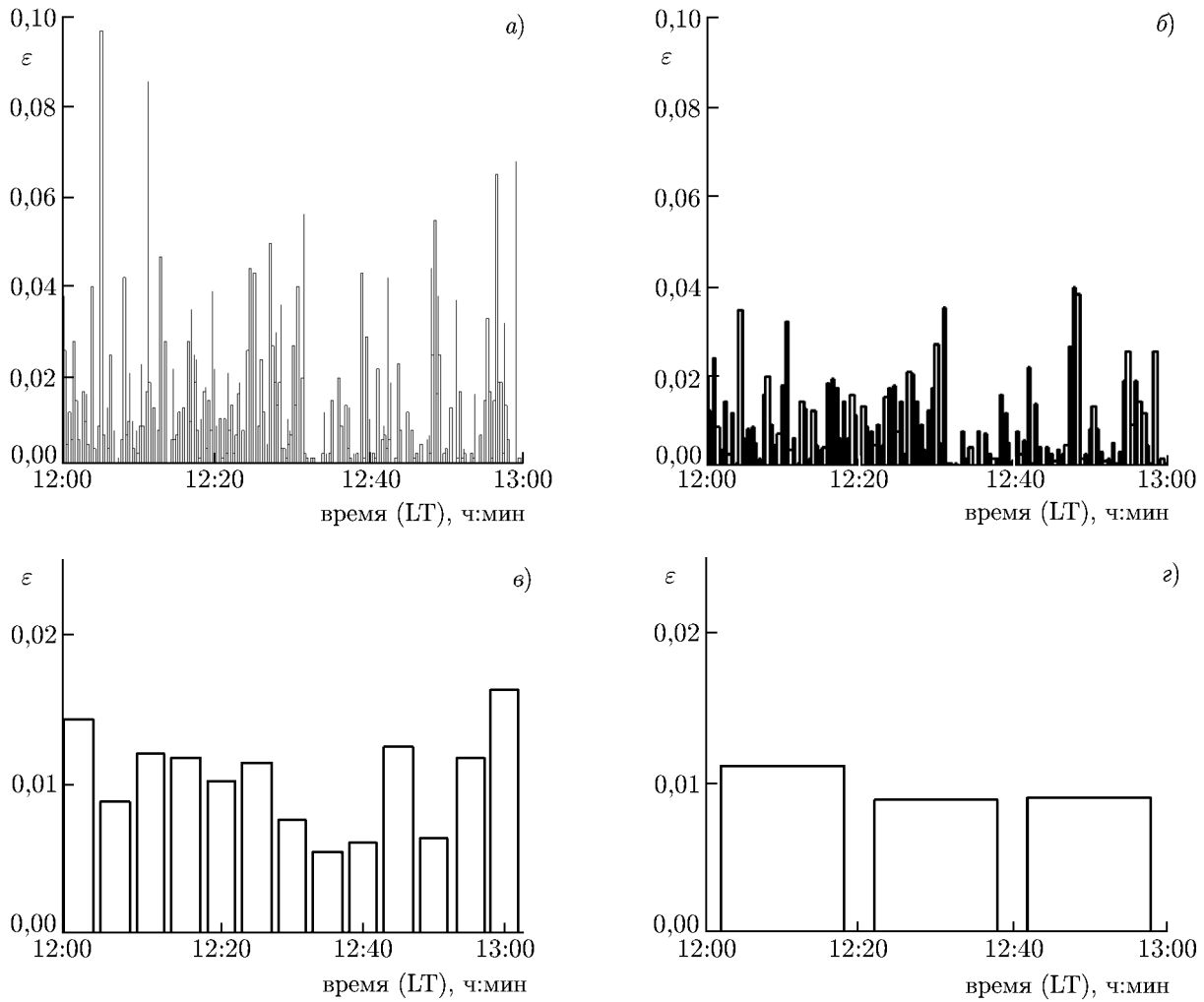


Рис. 6. Относительная частота появления ошибок  $\varepsilon$  в течение часа при различном времени усреднения:  $T = 10$  с,  $\sigma/P_{cp} = 1,48$  (а);  $T = 30$  с,  $\sigma/P_{cp} = 0,94$  (б);  $T = 5$  мин,  $\sigma/P_{cp} = 0,31$  (в);  $T = 20$  мин,  $\sigma/P_{cp} = 0,13$  (г)

были получены изменения усреднённой относительной частоты во времени. Примеры типичных изменений приведены на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что изменение относительной частоты появления ошибок в пределах до 50 %, которое во многих случаях можно считать приемлемым, происходит за время приблизительно до  $15 \div 30$  мин.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты продолжительных измерений на среднеширотных калиброванных трассах с малой и средней протяжённостью позволили заключить, что процессы, ответственные за энергетические характеристики поля высокочастотных волн (как сигнала, так и помехи), обладают инерционными свойствами, что обеспечивает сохранение их статистических характеристик без существенных отклонений на некоторое время вперёд. На протяжении всего времени наблюдений (более 7000 ч) медленные (в течение часа) абсолютные изменения среднего уровня сигнала и среднего эффек-



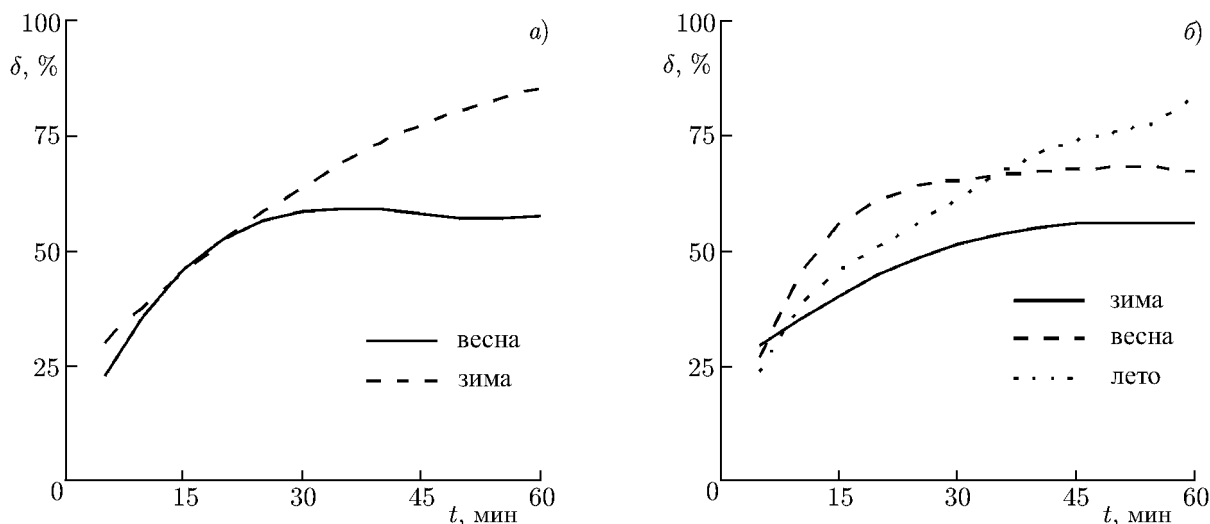


Рис. 7. Изменение относительной частоты появления ошибок в течение часа днём для частоты сигнала 8,5 МГц (а) и 10,9 МГц (б)

тивного значения шума за час в дневные и ночные часы не превышали 2,0 дБ, т. е. были ниже инструментальной погрешности измерений. Аналогичные изменения средних уровней сигнала в сумеречные часы после исключения тренда, обусловленного суточным ходом ионосферных характеристик, также были ниже 2,0 дБ. Средний уровень шума изменялся более медленно, чем сигнал. Именно эти обстоятельства позволяют строить оперативный прогноз на время упреждения до часа.

Проведённые исследования изменения во времени относительной частоты появления ошибок при передаче бинарных последовательностей с амплитудной манипуляцией показали, что усреднённая частота появления ошибок в интервале 20 мин меняется в течение часа в пределах 20÷75 %.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методик оперативного прогнозирования качества работы различных систем высокочастотной связи. Они будут полезны при выборе режимов работы адаптивных систем связи и средств текущей диагностики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Real-time channel evaluation of HF ionospheric radio circuits: ITU-R Rec. Rep. 889-2. ITU-R, 1990.
2. Жданов Б. Б. // Электросвязь. 2000. № 10. С. 37.
3. Барабашов Б. Г., Огарь А. С., Радио Л. П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 5. С. 41.
4. Varabashov B. G., Anishin M. M., Pelevin O. Y. // Radio Sci. V. 44. Art. no. RS0A18.
5. Барабашов Б. Г., Анишин М. М. // Техника радиосвязи. 2013. Вып. 1 (19). С. 25.

Поступила в редакцию 24 июля 2014 г.; принята в печать 17 сентября 2014 г.

**A STUDY OF THE SHORT-TERM STABILITY OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF IONOSPHERIC RADIO CHANNEL**

*B. G. Barabashov, A. S. Ogar, O. Yu. Pelevin, and L. P. Radio*

On the basis of the results of the long-term measurements on the calibrated mid-latitude high-frequency paths, it is concluded that the processes responsible for the energy characteristics of the high-frequency wave field have inertial properties. Slow (during an hour) absolute variations in the average signal and effective-noise levels in the daytime and the night-time hours do not exceed 2.0 dB. Similar variations in the average signal levels in the twilight hours after removal of the trend, which is caused by the diurnal variation in the ionospheric characteristics, are also below 2.0 dB. Analysis of the time behavior of the relative error-appearance frequency during transmission of the binary sequences with the amplitude manipulation indicates that the above frequency varies in the range 20–75% during an hour if the reception results are averaged for 20 min.