

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ФЛЮКТУАЦИЙ САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*A. B. Мень, С. Я. Брауде, В. И. Горбач*

Описывается результаты экспериментального исследования фазовых флюктуаций радиоволн десятисантиметрового диапазона над морем. Приводится классификация результатов наблюдений в зависимости от различных характеристик флюктуаций, а также сопоставление их с метеорологическими измерениями.

Распространение радиоволн в реальной среде обычно сопровождается амплитудными и фазовыми флюктуациями. Эти флюктуации обусловлены изменениями диэлектрической проницаемости, связанными с пространственной неоднородностью среды и с нестабильностью ее свойств во времени. Экспериментальные исследования флюктуаций радиосигналов могут быть использованы для изучения физических процессов, протекающих в тропосфере и определяющих особенности распространения в ней радиоволн.

В ранее проведенных работах основное внимание уделялось амплитудным флюктуациям. Менее подробно изучались фазовые флюктуации — в основном над сушей в пределах зоны прямой видимости [1-3]. Измерения над морем посвящено небольшое число работ, проведенных к тому же в специфических условиях [4,5]. В то же время исследования флюктуаций в морских условиях представляют особый интерес, поскольку сложность и многообразие земного рельефа обычно существенно затрудняют анализ основных закономерностей над сушей.

1. В настоящей работе приводятся основные результаты экспериментального измерения флюктуаций фазовых фронтов при распространении вертикально поляризованных радиоволн сантиметрового диапазона ( $f \approx 3000 \text{ мгц}$ ) над морем\*. Опыты проводились при различных метеорологических условиях в летне-осенний (июль — сентябрь) и осенне-зимний (октябрь—декабрь) периоды на чисто морской трассе длиной 33 км. В исследованиях использовалась дифференциальная методика, позволяющая путем измерения пульсаций разностей фаз ЭДС, которые наводятся в разнесенных антенах, определять интенсивность и степень декорреляции фазовых флюктуаций в различных точках волнового фронта. Для устранения погрешностей, связанных с изменением геометрического положения приемно-передающих пунктов и нестабильностью частоты, опыты проводились на фиксированной трассе при неподвижных передающих и приемных антенах, причем приемные антенны располагались вдоль прямой, перпендикулярной к направлению распространения. Для ослабления влияния береговой рефракции использовавшиеся шесть приемных систем были установлены вдоль береговой черты в 15–20 метрах от берега на фиксированных расстояниях в 2, 5, 10, 30 и 100 м по отношению к первой (опорной) антенне. Высота подъема приемных антенн (около 4 м над уровнем моря) также оставалась неизменной во время опытов.

\* Краткое изложение некоторых результатов этой работы см. в [8].

Для изучения высотной зависимости проводилось переключение антенн передатчика, установленных на различных высотах (35, 18 и 9 м) над уровнем моря, что соответствовало при стандартной рефракции переходу из „освещенной“ зоны в область „полутени“ и „тени“.

Измерение флюктуаций разностей фаз проводилось всегда относительно первой приемной системы, причем одновременно для двух различных расстояний между приемными антеннами, так что при каждом последующем измерении имелась возможность дублировать одно из расстояний предыдущего. Такая методика позволяла учитывать влияние нестационарности исследуемых процессов на результаты измерений, не прибегая к громоздкому методу одновременных измерений на всех высотах и расстояниях между антеннами. Длительность каждого такого измерения составляла 5–10 минут, так что измерения на всех фиксированных расстояниях между приемными антеннами проводились за 30 минут для каждой из трех высот передатчика.

С целью выявления зависимости фазовых флюктуаций от высоты проводились также опыты с быстрой сменой высот антенн передатчика при различных неизменных расстояниях между приемниками.

Во время экспериментов велась как визуальная индикация, так и автоматическая запись данных на фотопленку и ленту. Погрешность измерения флюктуаций разностей фаз составляла не более  $\pm 1^\circ$  при изменении амплитуд принимаемых сигналов до 60 дБ и частотной нестабильности  $\sim 10^{-3}$ . Долговременная нестабильность аппаратуры учищалась путем фазовой калибровки и регулярной проверки амплитудно-фазовых и частотно-фазовых характеристик системы.

Использованная аппаратура позволяла воспроизводить спектр фазовых флюктуаций в интервале частот от 0,01 Гц до 100 Гц. Кроме того, для анализа влияния степени воспроизведения спектра на измеренные характеристики предусматривалась возможность отфильтровывания и раздельной индикации низкочастотных (менее 0,3 Гц) и высокочастотных (более 0,3 Гц) спектральных составляющих, называемых ниже „медленными“ и „быстрыми“ флюктуациями.

Проведенные измерения показали, что за редким исключением отклонения разностей фаз  $\varphi^\circ$  относительно средних значений при всех высотах передатчика  $h_1$  и расстояниях между антennами  $d$  распределены по нормальному закону. На рис. 1 приведены типичные интегральные распределения флюктуаций разностей фаз (по модулю) для одного из опытов летнего периода в масштабе, линеаризующем нормальное распределение\*. Как следует из рисунка, экспериментальные данные в этом масштабе практически совпадают с прямыми, соответствующими нормальному распределению с различной дисперсией. Данные рисунка относятся к измерениям с воспроизведением полного спектра флюктуаций („комплексные“ флюктуации); однако аналогичные результаты имеют место и при раздельной индикации „медленных“ и „быстрых“ флюктуаций.

Следует отметить, что наблюдаемым

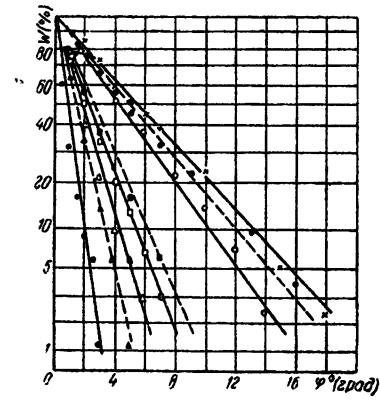


Рис. 1. Интегральное распределение флюктуаций разностей фаз (по модулю) при различных расстояниях между приемными антеннами  $d$  ( $h_1 = 35$  м,  $h_2 = 4$  м,  $r = 33$  км,  $\lambda = 10$  см); экспериментальные данные —  $d = 2$  м,  $\triangle$  —  $d = 5$  м,  $\square$  —  $d = 10$  м,  $\bigcirc$  —  $d = 30$  м,  $\times$  —  $d = 100$  м.

\* На рис. 1  $W$  — вероятность превышения флюктуациями (по модулю) величины  $\varphi^\circ$ , где  $\varphi^\circ$  — отклонение разности фаз от среднего значения.

случайным флюктуациям при измерениях в пяти-десятиминутных интервалах была свойственна некоторая нестационарность (особенно „медленным“ флюктуациям при максимальных высотах и разносах между антеннами). Спектры флюктуаций, сконцентрированные в области весьма низких частот, в отличие от стационарных случайных процессов, характеризовались неравномерностью и непостоянством во времени спектральной плотности.

Пример текущих спектров для „медленных“ флюктуаций приведен на рис. 2, где приведены зависимости отношения  $\Phi^2/\Delta\varphi^2$  от частоты  $F$  ( $\Phi^2$  — „мощность“ флюктуаций в полосе частот 0,005 Гц,  $\Delta\varphi^2$  — среднеквадратичное значение — полная „мощность“ флюктуаций).

Отмечались различные случаи флюктуаций фаз сигналов как по интенсивности, так и по степени их декорреляции в пространстве. Однако анализ проведенных измерений показал наличие определенных тенденций в характеристиках флюктуаций: например, зависимость интенсивности флюктуаций разности фаз от расстояния между приемными антеннами сохранялась качественно подобной практически во всех опытах\*. Значительно большее разнообразие наблюдается в зависимости интенсивности флюктуаций от высоты подъема антенн передатчика над поверхностью раздела. Вследствие этого высотная зависимость может быть положена в основу классификации опытов. В зависимости от этой характеристики, а также степени нестационарности все измерения могли быть разделены на четыре основные группы: а, б, в, г.

а) Опыты с квазистационарными стандартными характеристиками фазовых флюктуаций. К этому типу, характеризуемому монотонным уменьшением интенсивности флюктуаций с ростом высоты (в среднем обратно пропорционально высоте), могут быть отнесены ряд летне-осенних и большинство весенне-зимних опытов. Можно показать [7], что подобную высотную зависимость для зоны прямой види-

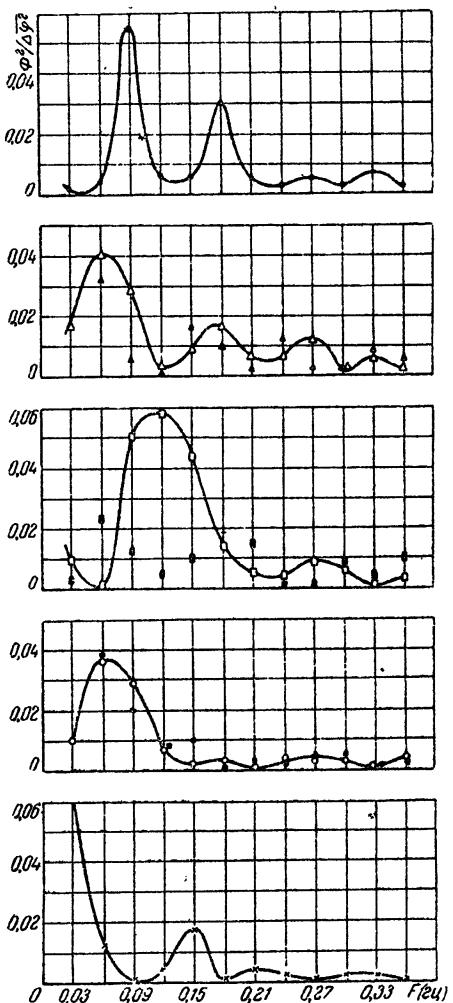


Рис. 2. Нормированные энергетические текущие спектры „медленных“ флюктуаций разности фаз при различных расстояниях между приемными антennами  $d(h_1 = 9 \text{ м}, h_2 = 4 \text{ м}, r = 33 \text{ км}, \lambda = 10 \text{ см})$ ; экспериментальные данные: · —  $d = 2 \text{ м}$ ,  $\Delta\varphi^2 - d = 5 \text{ м}$ ,  $\square \blacksquare - d = 10 \text{ м}$ ,  $\circ \bullet - d = 30 \text{ м}$ ,  $\times - d = 100 \text{ м}$

мости можно представить в виде:

$$\left( \frac{\Phi^2}{\Delta\varphi^2} \right)^{1/2} \sim 1/h_1^a \quad (a \ll 1). \quad (1)$$

\* Эта характеристика флюктуаций  $(\Delta\varphi^2)^{1/2} = f(d)$  для сокращения называется в дальнейшем корреляционной, поскольку она определяет функцию пространственной корреляции флюктуаций.

Эта зависимость должна иметь место при распространении над поверхностью раздела в локально изотропной среде (тропосфере).

Этим измерениям свойственна относительная стационарность интенсивности флюктуаций и их временных (например, спектральных) характеристик. Типичные для этого случая зависимости, полученные в одном из опытов летнего периода, приведены на рис. 3. На всех высотах увеличение расстояния между приемными антеннами вначале сопровождается пропорциональным возрастанием флюктуаций (эффективных значений); однако затем происходит все большее замедление роста флюктуаций. При больших расстояниях ( $d > 10 \pm 30$  м) эти зависимости стремятся к „насыщению“ (рис. 3а). Отсутствие дальнейшего роста свидетельствует о значительной декорреляции флюктуаций фаз сигналов, принятых в разнесенных антенах. При этом

$$\overline{\Delta\varphi^2} = (\varphi_1 - \varphi_i)^2 = 2\varphi_1^2(1 - R_{1i}) \leq 2\varphi_1^2 \quad (2)$$

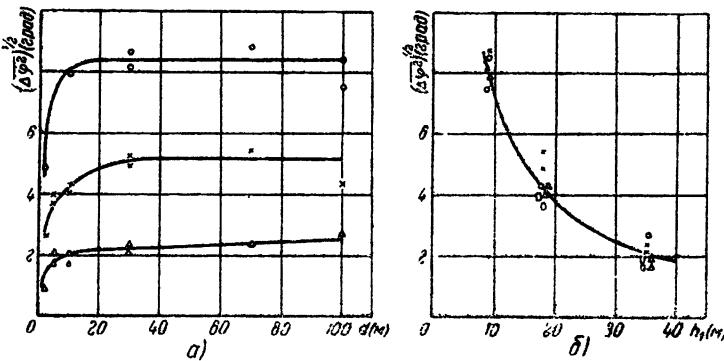


Рис. 3. Зависимость эффективных значений флюктуаций разностей фаз  $(\overline{\Delta\varphi^2})^{1/2}$  от расстояния между приемными антеннами  $d$  и высоты передатчика  $h_1$  ( $r = 33$  км,  $h_2 = 4$  м,  $\lambda = 10$  см); экспериментальные данные: а)  $\circ - h_1 = 9$  м,  $\times - h_1 = 18$  м,  $\triangle - h_1 = 35$  м; б)  $\circ - d = 100$  м,  $\times - d = 30$  м,  $\triangle - d = 10$  м,  $\square - d = 5$  м.

в предположении статистической изотропности среды, когда в различных точках пространства, равноудаленных от источника (при одинаковой высоте этих точек над поверхностью раздела)

$$\varphi_1^2 \simeq \varphi_i^2. \quad (3)$$

Здесь  $\varphi_1, \varphi_i$  — флюктуации абсолютных фаз сигналов в первой и  $i$ -ой антенне,  $R_{1i}$  — коэффициент корреляции флюктуаций фаз в этих антенах. Таким образом, эта зависимость, нормированная к ее значению при максимальном расстоянии между антennами  $d_{\max}$ , полностью определяет коэффициент корреляции флюктуаций:

$$\frac{\overline{\Delta\varphi^2}}{\Delta\varphi_{\max}^2} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_i)^2}{(\varphi_1 - \varphi_n)^2} = \frac{1 - R_{1i}}{1 - R_{1n\min}} \sim 1 - R_{1i}, \quad (4)$$

где  $n$  — ая антenna соответствует расстоянию  $d_{\max}$ .

Данные рис. 3 относятся к измерениям с воспроизведением полного спектра частот флюктуаций („комплексные“ флюктуации). Аналогичные результаты имеют место и при раздельном измерении „медленных“ и „быстрых“ флюктуаций. На рис. 4 приводятся результаты такого опыта. В этом случае так же, как и в предыдущем, наблюдается сравнительно небольшой разброс данных ( $\sim 5 \pm 10\%$ ) при всех

повторных измерениях. Характерно, что при таких измерениях декорреляция „медленных“ флюктуаций наступает всегда значительно позже, чем „быстрых“\*. Это показывает, что флюктуации в области более быстрых частот определяются в основном мелкомасштабными неоднородностями тропосфера, пространственная корреляция между которыми исчезает быстрее, чем в случае „медленных“ флюктуаций, обусловленных, по-видимому, более крупными образованиями. Вследствие этого влияние высокочастотной части спектра фазовых флюктуаций наиболее существенно при небольших расстояниях между антеннами ( $d \leq 2 \div 10$  м), где основная „энергия“ флюктуаций определяется этими частотами. При больших расстояниях между антеннами, как правило, доминируют „медленные“ флюктуации. Этот вывод подтверждается также и непосредственным определением спектров флюктуаций для разных  $d$  при комплексных измерениях и свидетельствует о деформации спектра флюктуаций разностей фаз при изменении расстояния между приемными антеннами. Изменение спектрального состава происходит также при смене высот передатчика  $h_1$  (см., например, соотношение „быстрых“ и „медленных“ флюктуаций на рис. 4), что объясняется более резким ростом „быстрых“ флюктуаций при приближении к поверхности раздела по сравнению с „медленными“\*\*.

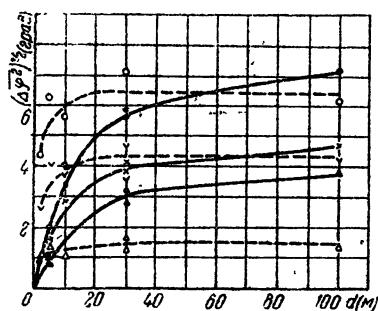


Рис. 4. Зависимость эффективных значений „медленных“ и „быстрых“ флюктуаций от расстояния  $d$  и высоты  $h_1$  ( $r=33$  км,  $h_2=4$  м,  $\lambda=10$  см); экспериментальные данные: а) „медленные“ флюктуации (—  $h_1=9$  м,  $\times - h_1=18$  м,  $\blacktriangle - h_1=35$  м); б) „быстрые“ флюктуации (○  $- h_1=9$  м,  $\vee - h_1=18$  м,  $\Delta - h_1=35$  м),

Рассчитанные по экспериментальным данным „текущие“ спектры (см., например, рис. 2) и автокорреляционные функции показывают, что уменьшение расстояния  $d$  и высоты подъема приводит к относительному расширению спектров флюктуаций разностей фаз. Во всех случаях имеется тенденция резкого уменьшения спектральной плотности с увеличением частоты флюктуаций. 90  $\div$  95% „энергии“ флюктуаций обычно распределено в полосе частот до 10 гц.

б) *Нестационарные опыты со стандартными характеристиками фазовых флюктуаций.* Эти измерения отличались резкой нестационарностью флюктуаций. Отмечается существенное изменение качественного характера и интенсивности фазовых пульсаций при повторных измерениях в смежных десятиминутных интервалах и даже в течение длительности одного измерения. Однако основные зависимости и характеристики фазовых флюктуаций качественно такие же, как и в первом случае.

Следует подчеркнуть, что примененная методика в опытах этого типа позволяла определять в основном приближенный, усредненный ход характеристик флюктуаций, поскольку точные данные в условиях

\* Отметим, что при „комплексных“ измерениях отмечается промежуточный ход корреляционной зависимости с более быстрым ростом, чем для „медленных“ флюктуаций, но более медленным, чем в случае „быстрых“ флюктуаций.

\*\* Это согласуется с теоретическими расчетами, проведенными для плоской поверхности раздела [7].

резкой нестационарности могут быть получены лишь при одновременных, параллельных измерениях на всех высотах и расстояниях между антеннами. Такие опыты встречались только в течение летне-осенного периода; отметим, что измерения типа а) и б) охватывали около 70% летних и более 90% зимних опытов.

*в) Аномальный тип характеристик флюктуаций разностей фаз.* Измерения этой группы характеризовались резко отличающейся от стандартного типа высотной зависимостью, когда интенсивность флюктуаций монотонно увеличивалась с ростом высоты или проходила через максимум. Такие результаты наблюдались как при одновременных („комплексных“), так и при раздельных измерениях „медленных“ и „быстрых“ флюктуаций; однако аномальность высотной характеристики была наиболее выражена в „медленных“ флюктуациях. Характеристики „быстрых“ флюктуаций отличались, как правило, более высокой стабильностью. Данные одного из таких опытов при измерении „медленных“ флюктуаций приведены на рис. 5. Аномальность зависимости флюктуаций от высоты в этом опыте наиболее резко выражена при максимальных расстояниях  $d$  (см. рис. 5б), когда существенная часть „энергии“ флюктуаций обусловлена большими неодн-

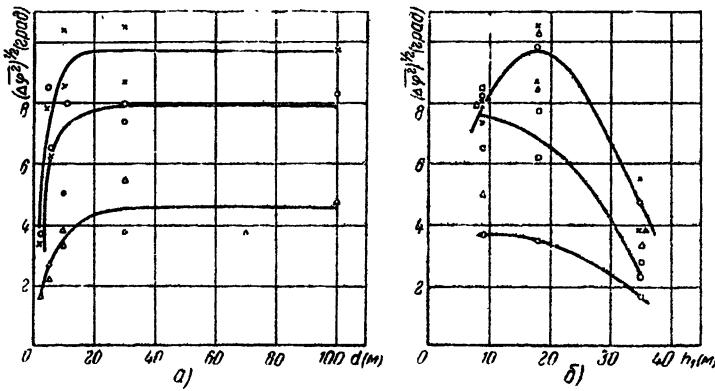


Рис. 5. Характеристики „медленных“ фазовых флюктуаций при аномальной высотной зависимости ( $r = 33$  км,  $h_2 = 4$  м,  $\lambda = 10$  см); экспериментальные данные: а)  $\circ$  —  $h_1 = 9$  м,  $\times$  —  $h_1 = 18$  м,  $\triangle$  —  $h_1 = 35$  м, б)  $\circ$  —  $d = 100$  м,  $\times$  —  $d = 30$  м,  $\triangle$  —  $d = 10$  м,  $\square$  —  $d = 5$  м,  $\cdot$  —  $d = 2$  м.

родностями; с уменьшением  $d$  характер высотной зависимости приближается к стандартному. Характерно также, что при этих измерениях высотная зависимость для „быстрых“ флюктуаций была близка к стандартной. Опыты с резко выраженной высотной аномалией встречались сравнительно редко (менее 10% летних и осенних измерений). Значительно чаще (около 20% опытов) наблюдались случаи со слабо выраженной либо явно отсутствующей высотной зависимостью, являющиеся переходными формами от измерений предыдущих двух видов к опытам типа в). Результаты одного из таких опытов при „комплексных“ измерениях флюктуаций приведены на рис. 6. Следует отметить, что разрушение нормальной высотной зависимости в некоторых случаях начиналось при наибольших значениях  $d$ : отмечен ряд случаев с аномальной высотной зависимостью при больших  $d$  и нормальной—при минимальных  $d$ . Все эти факты, по-видимому, связаны с тем, что вертикальная анизотропия нижних слоев тропосферы, которая может вызывать наблюдаемые изменения зависимости интенсивности фазовых флюктуаций от высоты, в основном определяется крупномасштабными

неоднородностями. При опытах этого типа обычно резко выраженная аномальность сопровождалась большой нестационарностью флюктуаций. Измерения промежуточного типа встречаются как нестационарные, так и квазистационарные.

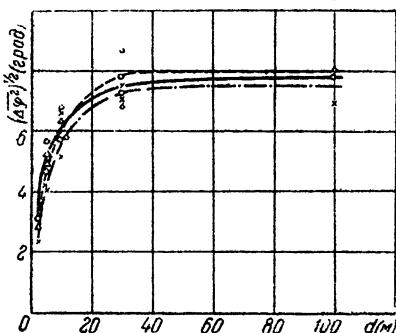


Рис. 6. Характеристики „комплексных“ флюктуаций при слабо выраженной высотной зависимости; экспериментальные данные:  $\circ - h_1 = 9 \text{ м}$ ,  $\times - h_1 = 18 \text{ м}$ ,  $\triangle - h_1 = 35 \text{ м}$ .

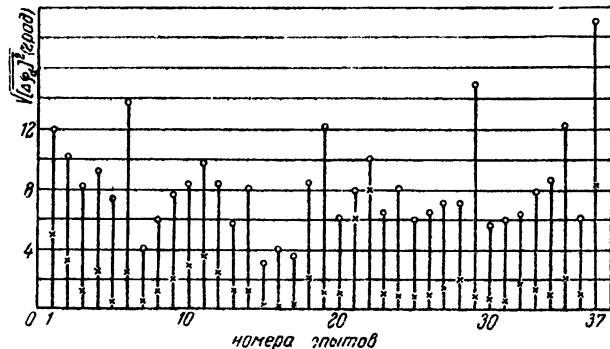
г) *Флюктуационные „вспышки“*. В нескольких опытах летнего периода отмечалось кратковременное, но необычайно резкое увеличение интенсивности флюктуаций разностей фаз, названное „флюктуационными вспышками“. Этому явлению обычно предшествуют большие и нестационарные флюктуации. В течение нескольких минут флюктуации быстро возрастили ( $\Delta\phi \sim 2\pi$ ), сопровождаясь глубокими и частыми замираниями амплитуды. Продолжительность такого состояния, как правило, не превышала нескольких десятков минут, после чего восстанавливалась обычная картина. Удовлетворительное объяснение этого явления не может быть дано в рамках теорий, развитых для неограниченной неоднородной среды [8–13], так как в этом случае остается предположить (если не учитывать влияния поверхности раздела) увеличение пульсаций диэлектрической проницаемости среды на трассе в сотни и тысячи раз по сравнению с обычными условиями, что практически исключается. Учет поверхности раздела [1] при распространении в неоднородной среде приводит к выводу, что причиной такого аномального возрастания флюктуаций может являться при обычной нестабильности среды (пульсациях диэлектрической проницаемости) изменение средней рефракции на трассе, приводящее к интерферционному минимуму в месте приема.

2. В измерениях всех рассмотренных типов наряду с изменением качественного характера флюктуационных зависимостей от опыта к опыту отмечались колебания величины интенсивности флюктуаций, причем наибольшим изменениям (не учитывая явления „вспышек“) были подвержены флюктуации разностей фаз при минимальных расстояниях между приемными антеннами. Для иллюстрации на рис. 7 приведены изменения интенсивности „медленных“ флюктуаций для летне-осенне-го периода при расстояниях между приемными антеннами  $d = 2$  и  $d = 100 \text{ м}$  и высоте передатчика 9 м.

Наблюдавшаяся в опытах над поверхностью раздела повышенная изменчивость интенсивностей флюктуаций при небольших расстояниях между приемными антennами, по-видимому, должна иметь место и при измерениях в неограниченной неоднородной среде, поскольку при этом флюктуации определяются более сложной зависимостью от свойств неоднородной среды (т. е. от корреляционной функции, описывающей пульсации коэффициента преломления в ней), чем для случая больших  $d$ . При малых  $d$  интенсивность флюктуаций разностей фаз определяется как флюктуациями абсолютных фаз сигналов, так и степенью

декорреляции между ними ( $R_{11} \gg 0$ , см. соотношение (2)), в то время как при больших  $d$  корреляция этих флюктуаций несущественна ( $R_{11} \rightarrow 0$ ). Как показано в [8, 10], интенсивность флюктуаций абсолютных фаз определяется лишь масштабом корреляционной функции  $I^*$  и  $n^2$  ( $n$ —показатель преломления), т. е. практически не зависит от точного вида этой функции.

Рис. 7. Изменение интенсивности „медленных“ флюктуаций в опытах летне-осеннего периода ( $r = 33$  км,  $h_1 = 9$  м,  $h_2 = 4$  м,  $\lambda = 10$  см); экспериментальные данные:  $\times$  —  $d = 2$  м,  $\circ$  —  $d = 100$  м.



Отмеченное в опытах изменение интенсивности фазовых флюктуаций целесообразно сопоставить с состоянием среды, непосредственно определяющей наблюдавшиеся флюктуации. Некоторые результаты такого сопоставления радиоизмерений для  $d = 10$  м и  $h_1 = 9$  м со средней метеорологической обстановкой на трассе приведены на рис. 8—10. Как следует из анализа данных, полученных для различных расстояний и высот подъема антенных систем, установить непосредственную, функциональную связь между величиной флюктуаций и усредненными метеоданными не представляется возможным. Однако можно отметить, что увеличение скорости ветра, независимо от его направления, и рост волнения моря (см. рис. 8, 9) обычно сопровождались понижением интенсивности флюктуаций. Уменьшение флюктуаций отмечалось также, как правило, при повышенной радиорефракции вплоть до  $a_{\text{экв}} \rightarrow \infty^{**}$  (см. рис. 10) и при пасмурной и дождливой погоде.

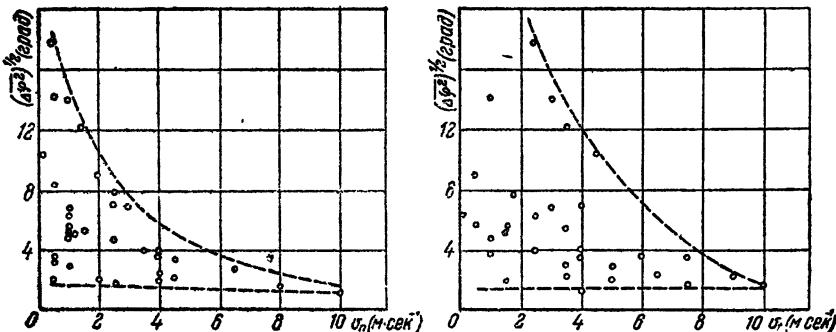


Рис. 8. Интенсивность флюктуаций разностей фаз при ветре различной силы (по измерениям летне-осеннего периода;  $r = 33$  км,  $h_1 = 9$  м,  $h_2 = 4$  м,  $d = 10$  м,  $\lambda = 10$  см);  $v_n$ —составляющая ветра поперек трассы,  $v_f$ —составляющая ветра вдоль трассы.

\* Т. е. расстоянием, на котором происходит существенное убывание корреляции пульсаций неоднородностей среды.

\*\* Эквивалентный радиус Земли  $a_{\text{экв}}$  для оценки степени рефракции определялся по величине среднего поля на основании дифракционных формул В. А. Фока,

Указанная зависимость от волнения моря, а также тот факт, что наибольшие флюктуации наблюдались при безветренной солнечной погоде и в отсутствие волнения моря, показывают, что в приведенных измерениях состояние морской поверхности не оказывало существенного влияния на фазовые флюктуации\*.

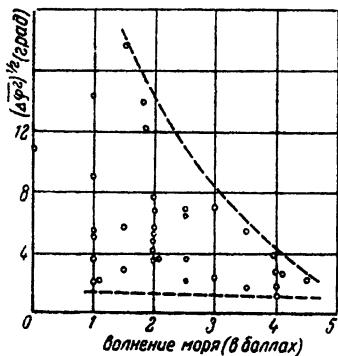


Рис. 9.

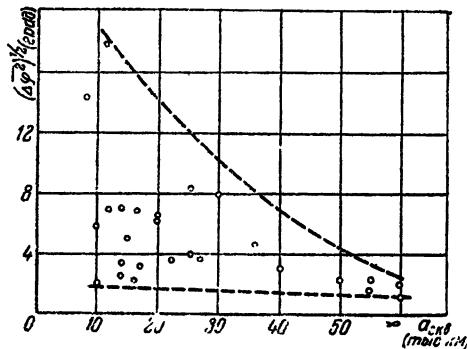


Рис. 10.

Рис. 9. Интенсивность флюктуаций разностей фаз при различных волнениях моря (по измерениям летне-осеннего периода;  $r = 33$  км,  $h_1 = 9$  м,  $h_2 = 4$  м,  $d = 10$  м,  $\lambda = 10$  см).

Рис. 10. Фазовые флюктуации при различной степени радиорефракции (по измерениям летне-осеннего периода;  $d = 10$  м,  $h_1 = 9$  м,  $h_2 = 4$  м,  $r = 33$  км,  $\lambda = 10$  см).

В заключение отметим, что проведенные измерения позволяют оценить радиусы пространственной корреляции фазовых флюктуаций („масштабы“ неоднородностей) путем сопоставления экспериментальных данных с известными теоретическими исследованиями распространения радиоволн в локально-изотропной среде [8–13]. Один из типичных примеров такого сопоставления представлен на рис. 11, где сплошны-

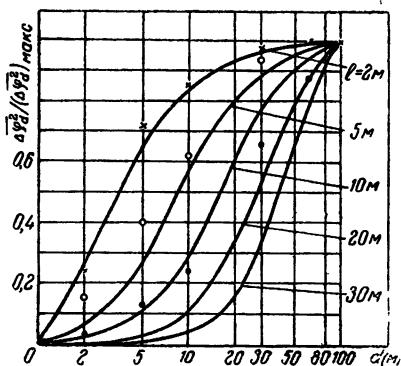


Рис. 11. Зависимость нормированных среднеквадратичных значений флюктуаций разностей фаз от расстояния  $d$  между приемными антennами ( $h_1 = 18$  м,  $h_2 = 4$  м,  $r = 33$  км,  $\lambda = 10$  см); экспериментальные данные:  $\circ$  — „комплексные“ измерения,  $\times$  — „быстрые“ флюктуации,  $\bullet$  — „медленные“ флюктуации.

ми линиями приведены расчетные зависимости средних квадратов флюктуаций разности фаз  $\Delta\phi_d^2$  от расстояния между приемными антennами  $d$  при различных значениях „масштаба“ тропосферных неоднородностей  $l$ . Величины  $\Delta\phi_d^2$  нормированы к максимальным значениям ( $\Delta\phi_{d_{\max}}^2$ ), соответствующим  $d_{\max}$ :

\* На это также указывает качественное совпадение результатов, полученных при измерениях над сушей (см., например, [2]).

$$\frac{\Delta \varphi_d^2}{(\Delta \varphi_{d_{\max}}^2)} = \frac{1 - (\sqrt{\pi} l / 2d) \operatorname{erf}(d/l)}{1 - (\sqrt{\pi} l / 2d_{\max}) \operatorname{erf}(d_{\max}/l)}. \quad (5)$$

Отметим, что соотношение (5) справедливо в случае неограниченного пространства, а также, как показано в [14], при распространении над поверхностью раздела в неоднородной среде, описываемой пространственной функцией корреляции пульсаций коэффициента преломления  $n$  вида:

$$\overline{n_1 n_2} = \overline{n^2} \exp(-\rho^2/l^2),$$

где  $n_1, n_2$  — пульсации коэффициента преломления в разнесенных точках пространства,  $\rho$  — расстояние между этими точками,  $l$  — параметр корреляционной функции („масштаб“ неоднородностей). Однако аналогичные результаты, как показано в [10], имеют место при различных видах корреляционной функции, когда корреляция пульсаций коэффициента преломления монотонно убывает с увеличением  $d$ .

Как следует из полученных данных, для „медленных“ флюктуаций значение  $l$  оказалось порядка  $10 \pm 30$  м, для „быстрых“  $-1 \div 3$  м. В случае, когда воспроизводился весь спектр флюктуаций, отмечался промежуточный вид зависимости интенсивности флюктуаций от расстояния  $d$ , и параметр  $l$  составлял  $3 \div 10$  м, несколько увеличиваясь с подъемом антенн передатчика.

Таким образом, сужение спектра флюктуаций, имеющее место при инерционных измерениях, существенно не нарушая в большинстве опытов высотной характеристики, вызывает всегда значительное снижение скорости нарастания интенсивности флюктуаций при увеличении расстояния  $d$ . Это обстоятельство при теоретической интерпретации эксперимента сводится к необходимости увеличения параметра  $l$ . Кроме того, раздельное измерение флюктуаций в нескольких интервалах частот спектра приводит к ряду значений „масштаба“ неоднородностей, обуславливающих эти флюктуации.

Авторы выражают благодарность В. Ф. Шульге, О. М. Лебедевой и Б. Ф. Веберу, принявшим участие в проведении измерений.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. W. Herbstreit, M. C. Thompson, Proc. IRE, **43**, 1437 (1955).
2. A. P. Deam, B. M. Fannin, Proc. IRE, **43**, 1402 (1955).
3. W. M. Sharpless, Proc. IRE, **34**, 837 (1946);  
A. B. Crawford, W. M. Sharpless, Proc. IRE, **34**, 845 (1946).
4. A. W. Straiton, J. R. Gerhardt, Proc. IRE, **36**, 916 (1948).
5. A. W. Straiton, Proc. IRE, **37**, 808 (1949).
6. А. В. Мень, С. Я. Брауде, В. И. Горбач, Докл. АН СССР, **125**, 1019 (1959).
7. А. В. Мень, В. И. Горбач, С. Я. Брауде, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **2**, 388 (1959).
8. А. М. Обухов, Изв. АН СССР, сер. геофиз., **17**, 155 (1953).
9. Л. А. Чернов, Докл. АН СССР, **98**, 953 (1954).
10. R. B. Mischmoge, A. D. Wheelon, Proc. IRE, **43**, 1437 (1955).
11. A. D. Wheelon, R. B. Mischmoge, Proc. IRE, **43**, 1450 (1955).
12. В. Н. Каравайников, Акуст. ж., **3**, 165 (1957).
13. Л. А. Чернов, Распространение волн в среде со случайными неоднородностями, изд. АН СССР, М., 1958.
14. Ф. Г. Басс, Э. А. Канер, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **2**, 565 (1959).

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
26 июня 1959 г.

<sup>1</sup> Когда расстояние  $d$  между приемными антennами проводится вдоль линии, параллельной поверхности раздела (перпендикулярно к направлению распространения), и при больших высотах подъема либо обоих концов трассы, либо одного из них ( $h_1, h_2 \gg l$  или  $h_1 \gg l, h_2 \ll l$ ).