

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 333

КОРРЕЛЯЦИЯ ОБЛАЧНОЙ И ДОЖДЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ПОЛНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН
СИСТЕМОЙ ОБЛАКО - ДОЖДЬ

В.В.Строганов

Нижеий Новгород 1991

С т р о г а н о в В. В.

КОРРЕЛЯЦИЯ ОБЛАЧНОЙ И ДОЖДЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН СИСТЕМОЙ ОБЛАКО - ДОЖДЬ // Препринт № 333.-
- Нижний Новгород: НИРФИ, 1991. - 17 с.

На основе экспериментальных данных показано различие времен
корреляции ослаблений миллиметровых волн в облачной и дождевой
частях системы облако - дождь и зависимость этого различия от
типа дождя. Установлено и объясняется наличие двух участков насы-
щения структурных функций ослабления миллиметровых волн в облаках
с моросью.

В работе /1/ предложено использовать для оперативной диагностики и краткосрочного прогноза ослаблений миллиметровых радиоволн на зенитных и наклонных трассах связи Земля - Космос в условиях выпадения дождя радиометрические данные по ослаблению волны 30 мм. Для решения этой задачи необходимо знание текущего распределения капель дождя по размерам, времени корреляции ослаблений и соотношения ослаблений в облачной и дождевой частях тропосферного гидрометеорообразования. Идентифицировать тип распределения капель в дожде по размерам можно путем измерений на горизонтальной трассе ослабления волны 1 мм /2/, сильно зависящего от типа распределения /3/, и приземной интенсивности осадков. Для пересчета ослабления волны 30 мм в ослабления миллиметровых волн нужно использовать кумулятивное соотношение ослаблений в облаке и дожде.

В работах /4, 5/ опубликованы предварительные данные по разделению вкладов облака и дождя в полное ослабление миллиметровых радиоволн гидрометеорообразованием методом многоволнового дистанционного радиозондирования тропосферы. Было отмечено, что эти соотношения имеют для случаев средних-сильных дождей интенсивность 10-40 мм/час близкие значения и плохо коррелирует между собой (коэффициент корреляции - 0,7, тогда как, например, коэффициент корреляции ослаблений двух волн: 4 и 8 мм - 0,95). Для установления кумулятивных соотношений облачной и дождевой составляющих ослабления необходимо проведение дополнительных экспериментов.

В работе /6, 7/ приводятся данные по корреляции интенсивности дождей и отмечается отсутствие связи между ними и типами дождя. Эти данные автоматически переносились на ослабления миллиметровых

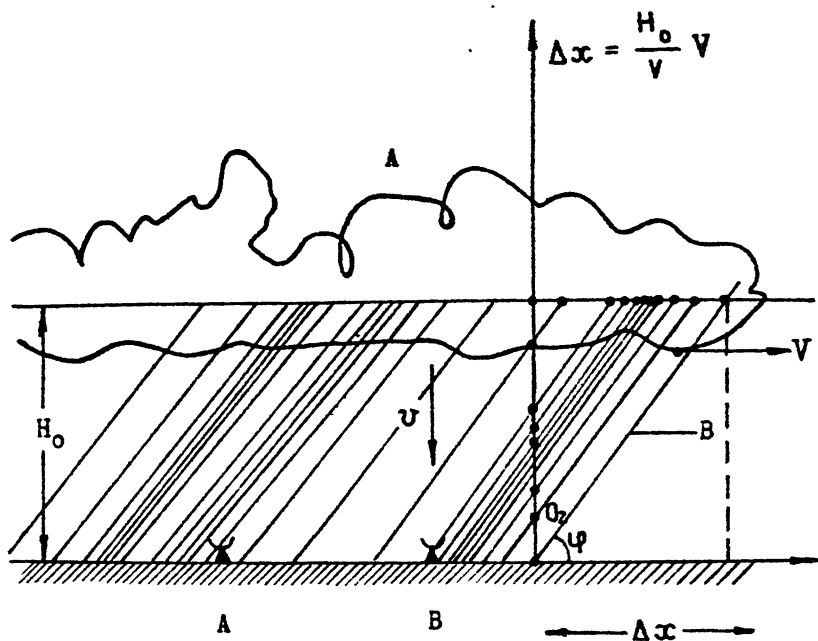
волн в дожде без учета влияния облака.

Измерения /8/ из разнесенных на расстояние 600 м наземных пунктов зенитных ослаблений миллиметровых радиоволн (см. рис.1) показывали, что времена и расстояния корреляции ослаблений волн 4, 8, 13,5 мм в облаках без осадков и с осадками в виде дождя лежат в пределах 3-35 минут и 2-20 км соответственно, не имея явной связи с интенсивностью дождя. Так, наблюдались времена корреляции в десятки минут для ослаблений в кучеводождевых без осадков облаках и грозовых облаках с сильным дождем. На рис.2 приведен типичный пример корреляционных и автокорреляционных кривых для ослаблений волн 4 и 8 мм на зенитной трассе в облаках без осадков и облаках с осадками. Как видно из приведенного рисунка, для данных случаев времена корреляции близки по значению. Таким образом, автокорреляционные кривые полных ослаблений миллиметровых волн не дают информации о связи интенсивности дождя с временами корреляции ослаблений.

В настоящей работе рассматривается вопрос о соотношении времен корреляции облачной и дождевой составляющих полного ослабления системой облако - дождь.

Для решения этой задачи были использованы экспериментальные данные синхронных многоволновых измерений ослаблений в облаках с осадками на зенитных трассах по методу дистанционного радиозондирования, проведенных совместно с ИРЭ АН СССР и ЦАО в Нижегородской области за период 1984-1989 гг. Измерения выполнялись синхронно в двух разнесенных на расстояние 600 м пунктах радиометрическими приемными устройствами на волнах 4, 8, 13, 5 и 30 мм и сопровождалась регистрацией интенсивности дождя челночными дождемерами и доплеровским радиолокатором.

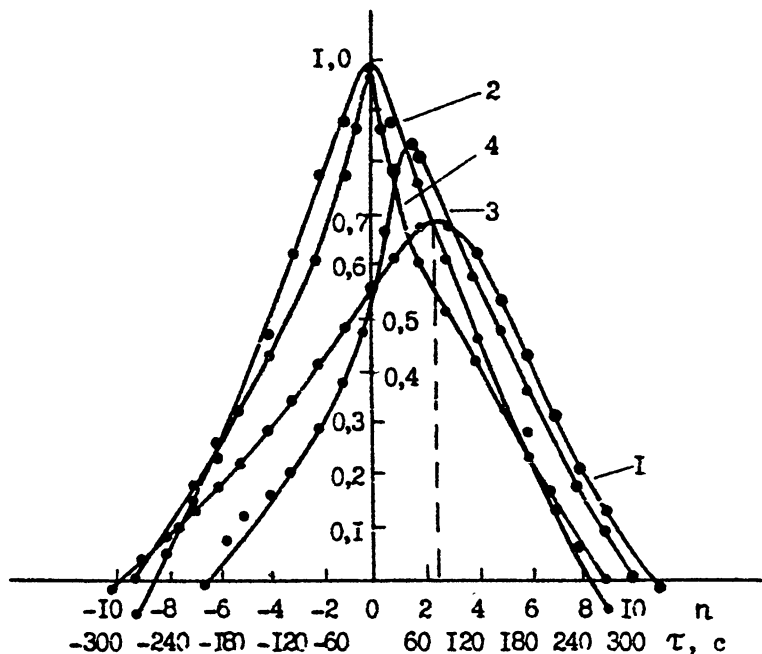
Техника эксперимента и методика обработки данных описаны в работах /1, 4, 5, 8, 9/. Здесь следует отметить лишь то обстоятельство, что радиометрические приемники находились в укрытиях, принимая собственное излучение тропосферы, отражаемое от расположенных вне укрытия зеркал. Коэффициент корреляции данных двух рядом расположенных миллиметровых радиометров, зеркало одного из которых поддерживалось сухим, имел наибольшее наблюдавшееся значение - 0,95, а автокорреляционные функции были идентичны. Это косвенным путем свидетельствует о том, что пленка воды на по-



Р и с. I

Схема расположения измерительных пунктов и объекта наблюдения
(облачность с осадками в виде дождя).

Расстояние между пунктами А и В - 600 м. H_0 - высота нулевой изотермы. Наклонные линии изображают траекторию падения каплей дождя. Плотность линий представляет интенсивность дождя. u - скорость падения капли, V - скорость перемещения облака с осадками. Время измерения 3+15 часов



Р и с. 2

Корреляционные и автокорреляционные кривые для ослаблений, измеренных в разнесенных пунктах А и В.

1 - кучеводождевые облака с грозой; сильный дождь интенсивность до 34 мм/час. Максимальное ослабление на волне 4 мм составило 15 дБ. Скорость перемещения дождя и облачности - 8 м/сек.

13 июня 1980 г. Расстояние корреляции - 2,6 км.

2 - автокорреляционная функция ослабления волны 4 мм для того же случая. Расстояние корреляции - 2 км.

3 - корреляционная кривая для случая кучеводождевой неразрывной облачности. Максимальное ослабление на волне 4 мм - 3,3 дБ. Скорость перемещения - 13 мм/с. Расстояние корреляции - 3,3 км 17 июня 1980 г.

4 - автокорреляционная функция ослабления волны 4 мм для того же случая. Расстояние корреляции - 3,5 км

верхности зеркала не искажает рассматриваемые далее корреляционные кривые.

Схема расположения измерительных станций и объекта наблюдений (облако с дождем) приведена на рис. I. Для рассмотрения взята упрощенная модель гидрометеообразования: неоднородности облака обусловлены его вертикальным развитием, время жизни облака много больше времени прохождения его относительно наблюдателя, интенсивность дождя — случайная функция от горизонтального расстояния, но не зависит от высоты, высота дождя равна высоте "нулевой" изотермы. Следует, однако, заметить, что при условии жесткой связи и выпадающих осадков с определенными участками облака на зенитной трассе в данный момент времени оказываются капли дождя, выпавшие из разных участков облака, входящих в область Δx . Это придает структуре дождя наклонный характер, часто наблюдаемый визуально, и уменьшает коэффициент корреляции облачной и дождевой составляющих полного ослабления.

Оценить Δx можно следующим образом. Для сильных-ливневых дождей интенсивностью 50-100 мм/час средний размер капель составляет величину 0,25 мм и ее установившаяся скорость падения равна 8 м/с /10/. При высоте дождя 3 км время падения капли составит 375 с. За это время ячейка дождя при скорости движения, допустим, 10 м/с переместится на расстояние 3 км. В случае морозящего дождя интенсивностью 0,25-1,25 мм/час средний размер капель равен 0,1 мм, а скорость ее падения — 4 м/с. В этом случае Δx имеет значение в два раза большее — 7 км.

Исходя из вышесказанного следует ожидать, что соотношение времен корреляции облачной и дождевой составляющих ослабления для морозящих дождей и сильных-ливневых дождей должны заметно различаться (разумеется, в случае одинаковой скорости ветра). Коэффициенты корреляции при этом отличаются в обратную сторону. Изменение скорости и направления ветра по высоте приводят в случаях морозящих дождей к еще большему падению коэффициента корреляции облачной и дождевой составляющих ослабления миллиметровых волн.

Ослабление миллиметровых волн на зенитной трассе складывается из молекулярного ослабления /II/

$$A_m = \int_0^{H_{\infty}} (\gamma_{H_2O}(h) + \gamma_{O_2}(h)) dh,$$

где γ_{O_2} и γ_{H_2O} (дБ/км) - коэффициенты поглощения в кислороде и паре соответственно; аэрозольного поглощения в облаке, $A_0 = \int_{H_1}^{H_2} \gamma_0(h) dh$, где γ_0 - погонное ослабление (дБ/км), H_1, H_2, H_∞ - граничные высоты; ослабления в дожде, которое принято представлять в виде аппроксимации $A_g(\lambda) = \alpha(\lambda) e^{b(\lambda)H}$, где $\alpha(\lambda), b(\lambda)$ - постоянные коэффициенты, зависящие от длины волны и распределения капель по размерам, H - высота дождя [3]. Для нахождения ослабления в облаке с дождем использовалась формула:

$$A_{0+g} = 4,34 \ln \left\{ \frac{[T_3 - T_1]}{[T_3 - T_2]} \right\},$$

где T_2, T_1 - яркостные температуры чистой и с неоднородностями атмосферы, T_3 - эффективная температура, близкая к температуре окружающей среды. При расчетах учитывались изменения температуры, влажности, оценивалось рассеяние волн на каплях дождя.

Чтобы воспользоваться данным методом, измерения проводились непрерывно и в облачности, и в разрывах облачности ("окнах").

Вариации измеряемой в зенит яркостной температуры гидрометеорообразования обусловлены его горизонтальным перемещением. Вычисляемое по яркостной температуре ослабление на данной волне λ /II/ представляет собой случайную функцию, содержащую две компоненты, обусловленные соответственно облаком и дождем:

$$A(\lambda) = A_0(\lambda, t) + A_g(\lambda, r),$$

где λ - длина волны, t - температура облака. Отношение облачной и дождевой составляющих $A_0(\lambda, t) / A_g(\lambda, r)$ имеет разный характер зависимости от длины волны в дождях разной интенсивности. Рассмотрим отношение составляющих ослаблений на волне относительно отношения на некоторой волне Π , например, 4 мм:

$$(A_0(\lambda) / A_g(\lambda)) / (A_0(4) / A_g(4)) = (A_0(\lambda) / A_0(4)) / (A_g(4) / A_g(\lambda)) = \alpha(t, T_0) / \beta(t, T_d, R),$$

где T_0 - температура облака (°C), T_d - температура капель дождя

(σ), B - интенсивность дождя (мм/час). Для облака отношение ослаблений для двух длин волн можно представить $/I_1, I_2/$ в виде

$$\alpha(\lambda) = \sigma(\lambda_1) / \sigma(\lambda_2) = \frac{\lambda_2^2 + 4\pi^2 c^2 \tau_p^2}{\lambda_1^2 + 4\pi^2 c^2 \tau_p^2},$$

где $\tau_p = \exp(7,6(273/T - 0,95)) \cdot 10^{-12}$, T - температура капель облака (оК).

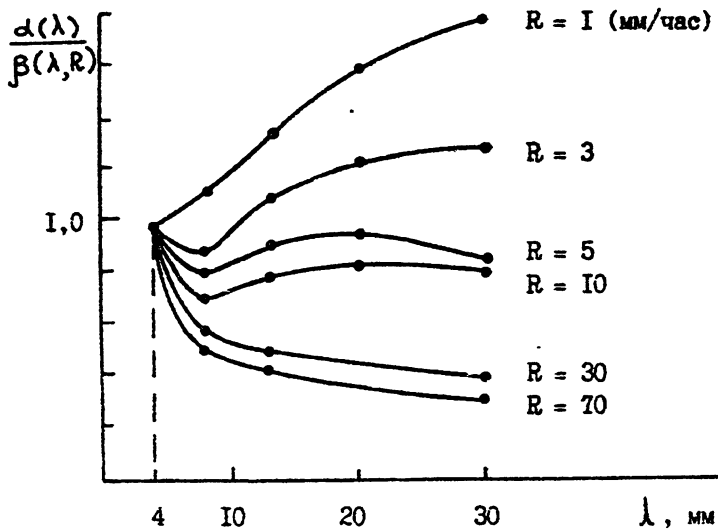
Отношение ослаблений для двух волн в дожде, можно представить, используя аппроксимирующую формулу /3/

$$\beta(\lambda) = A_g(\lambda_1) / A_g(\lambda_2) = (\alpha(\lambda_1) / \alpha(\lambda_2)) \cdot R^{-(b(\lambda_2) - b(\lambda_1))}$$

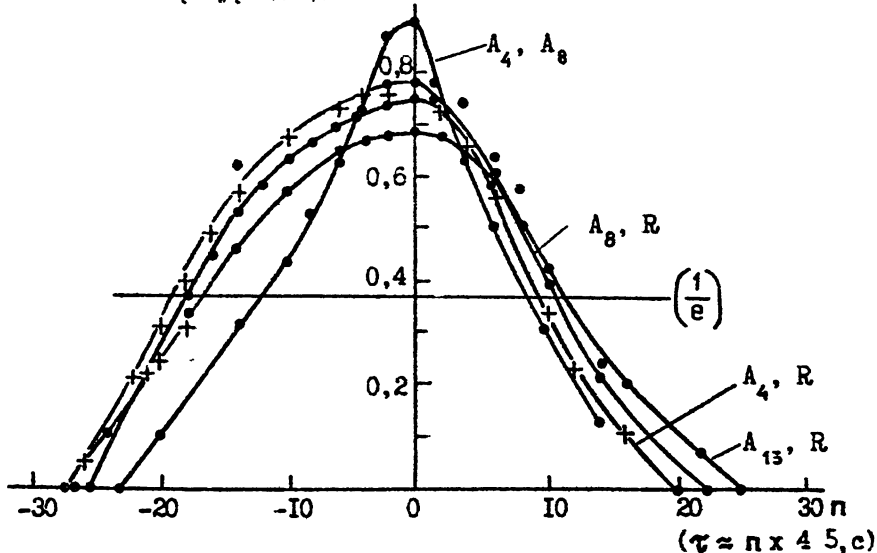
На рис.3 приведены кривые для нескольких значений интенсивности дождя; по ним видно, что роль дождя в ослаблении возрастает с ростом длины волны в случаях дождей большой интенсивности, но падает в случае морозящих дождей. Это иллюстрируют кривые рис.4, представляющие корреляцию интенсивности дождя и ослабления на волнах 4, 8, 13,5 или 30 мм для случаев морозящего и ливневого дождей. Видно, что в случае мороси коэффициент корреляции интенсивности дождя и ослабления на волне I растет с уменьшением длины волны λ , наоборот, падает в случае сильного-ливневого дождя. В последнем случае заметно меняется время корреляции, что говорит о различии времен корреляции ослаблений миллиметровых волн в дождевой и облачной частях гидрометеорообразований.

Более наглядны в этом отношении типичные корреляционные и автокорреляционные кривые рис.5-7, построенные для случаев сильного и морозящего дождей.

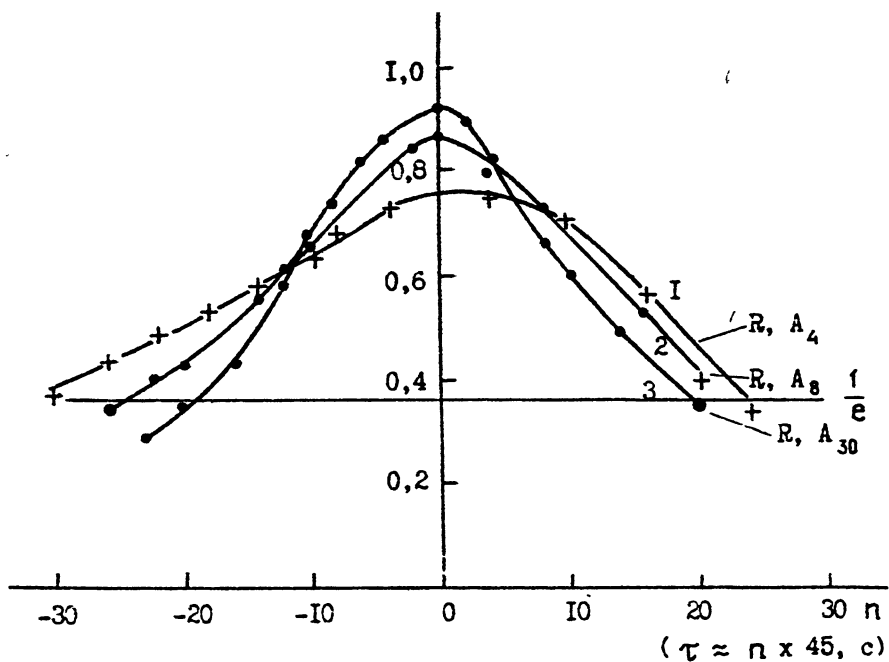
Для сильного дождя характерно совпадение автокорреляционных кривых интенсивности дождя и ослабления волны 30 мм (см.рис.6). Это объясняется тем, что в условиях сильных дождей вклад облака в ослабление волны 30 мм на зенитной трассе мал (-10%) по сравнению с вкладом дождя /5/. Очевидно, что время корреляции, найденное по этим двум кривым, может считаться временем корреляции дождя в о й



Р и с. 3 Зависимость от длины волны отношения облачной и дождевой составляющих ослаблений для различных значений интенсивности дождя R (мм/час). Средняя температура облака - 0°C , температура дождевых капель - 10°C



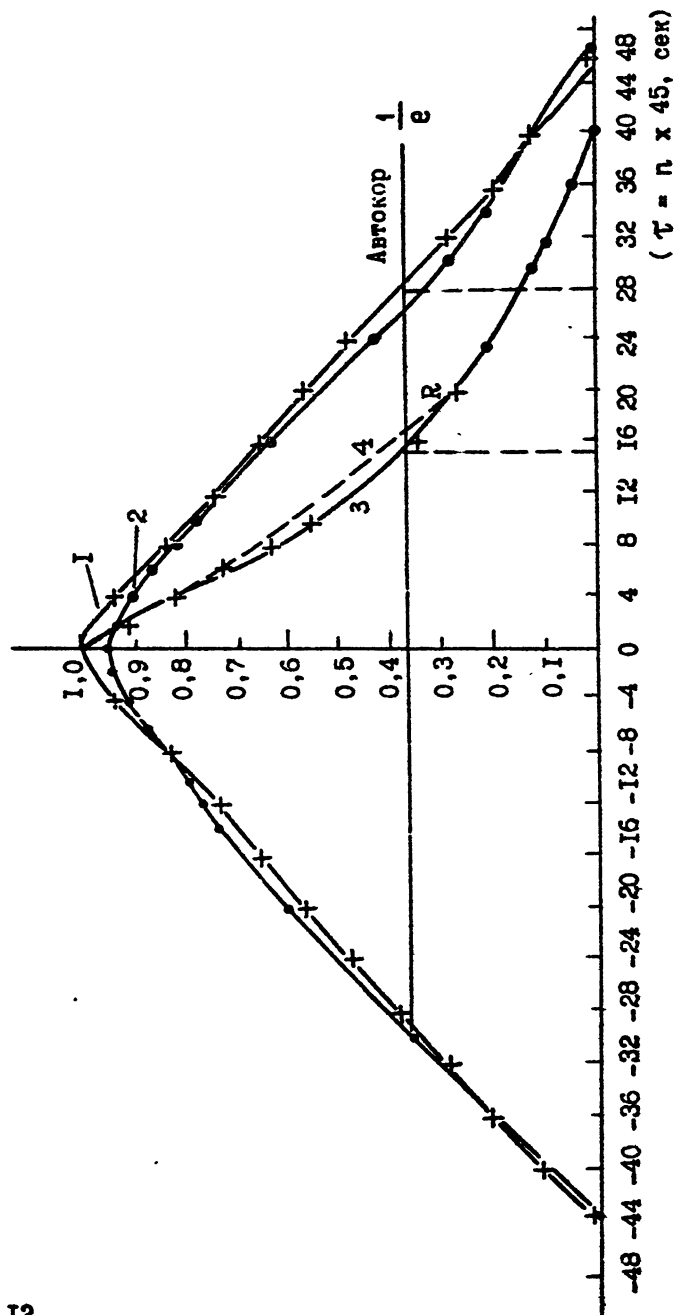
Р и с. 4 Функции корреляции интенсивности дождя и ослабления волны 4, 8 и 13,5 мм (кривые 1-3 соответственно). Функция корреляции ослаблений волн 4 и 8 мм (кривая 4). Морясь, интенсивность - $0,1+2,3$ мм/час. Время записи 12 часов 24 сентября 1984 г.



Р и с. 5

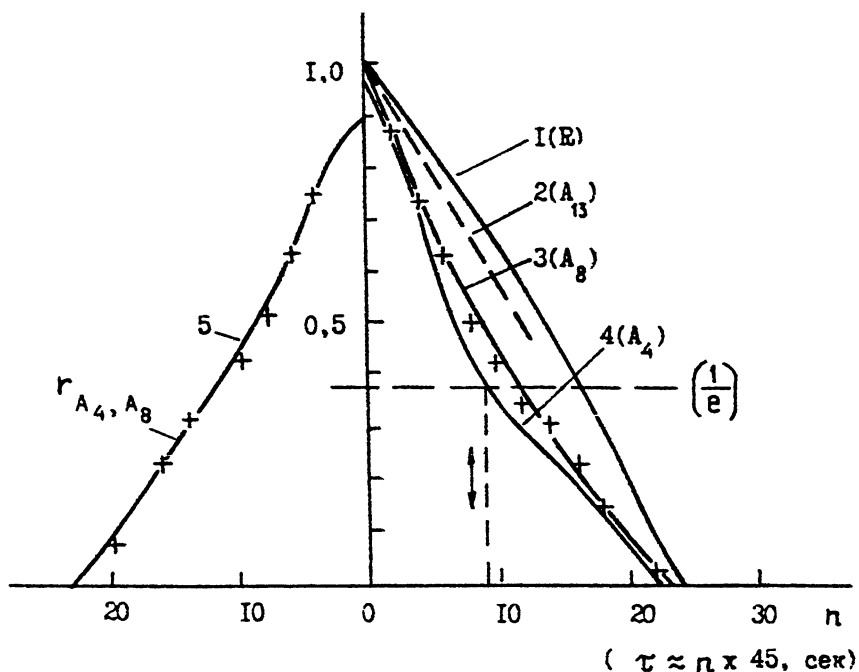
Функции корреляции интенсивности дождя и ослабления волн 4, 8 и 30 мм (кривые 1-3 соответственно).

Сильный ливневый дождь, интенсивности 3-70 мм/ч. Время записи массива данных 4 часа (начальный участок с ослаблением на волне 4 мм, большим 20 дБ и соответствующими значениями интенсивности дождя исключен) 11 июля 1984 г.



Р и с. 6 Корреляционные и автокорреляционные функции ослаблений волн 4, 8 и 30 мм и интенсивности дождя для случая сильного-ливневого дождя 11 июля 1984 г.

1 - корреляционная функция ослаблений волн 4 и 8 мм;
 2 - автокорреляционная функция ослабления волны 4 мм (8 мм);
 3 - автокорреляционная функция ослабления волн 30 мм;
 4 - автокорреляционная функция интенсивности дождя.



Р и с. 7

Корреляционные и автокорреляционные функции ослаблений волн 4, 8 и 13,5 мм и интенсивности дождя. Морось 24.09.1984 г.

- 1 - автокорреляционная функция интенсивности дождя;
- 2 - автокорреляционная функция ослабления волны 13,5 мм;
- 3 - автокорреляционная функция ослабления волны 8 мм;
- 4 - автокорреляционная функция ослабления волны 4 мм;
- 5 - корреляционная функция ослаблений волн 4 и 8 мм

составляющей Полного ослабления. Две другие кривые рис.7 представляют функции корреляции ослабления волн 4 и 8 мм и автокорреляции ослабления волны 4 мм (идентичной функции автокорреляции ослабления волны 8 мм). Эти кривые также практически совпадают, но время корреляции, найденное из них, превышает в два раза время корреляции, найденное по первым двум кривым. Это можно объяснить ролью облачности, а именно тем, что для случаев сильных дождей в время корреляции ослабления миллиметровых волн в облачной части гидрометеорообразования превышает (в данном случае в два раза) время корреляции ослабления в дождевой части.

В случаях морозящих дождей (см.рис.7) наблюдается противоположное явление: время корреляции ослабления волны 4 мм в два раза меньше времени корреляции интенсивности дождя, из чего можно сделать вывод, что во время корреляции ослабления в дождевой части данного гидрометеорообразования больше (в данном случае в два раза) времени корреляции ослабления этой волны в облачной части.

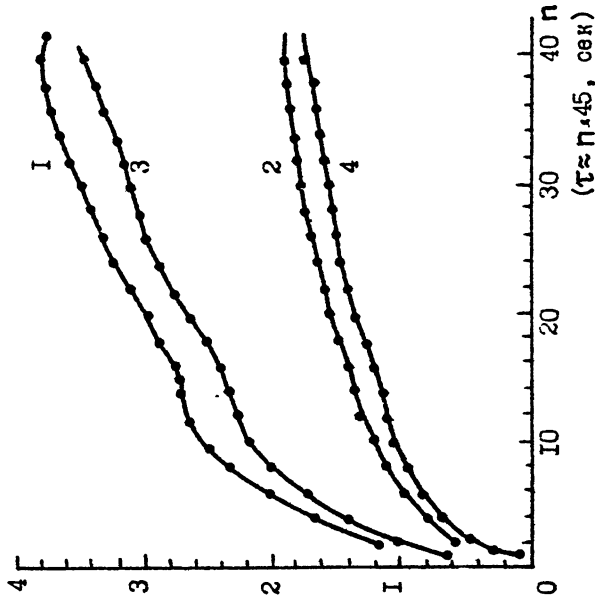
Обнаруженное различие времен корреляции ослаблений миллиметровых волн в дождевой и облачной частях системы облако - дождь позволяет объяснить наблюдаемое для всех случаев морозящих дождей двойное насыщение структурных функций ослабления миллиметровых волн.

На рис.8, 9 приведены типичные структурные функции ослаблений волн 4 и 8 мм, измерившихся синхронно из одного пункта для нескольких случаев морозящих дождей интенсивностью 0,1-2 мм/час, имевших место в разное время. На всех структурных функциях имеют место два участка насыщения, причем каждая пара структурных функций имеет свои времена насыщения.

Изложенное выше позволяет утверждать, что первое насыщение структурных функций обусловлено облачной частью, а второе - дождевой частью системы облако - дождь.

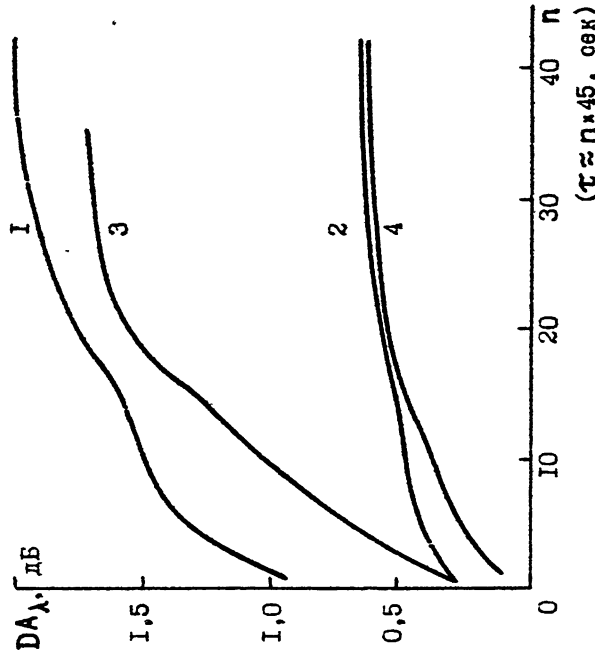
Основной вывод из рассмотренных материалов заключается в том, что время корреляции ослаблений миллиметровых волн в облачной части системы облако - дождь больше времени корреляции ослабления в дождевой части в случаях сильных дождей, но меньше в случаях морозящих дождей.

Физический смысл данного вывода заключается в том, что в случаях сильного дождя средние горизонтальные размеры неоднороднос -



Р и с. 8

Структурные функции ослаблений волн 4 и 8 мм (кривые 1, 2 - соответственно) для случая моросьевого дождя 23 сентября 1984 г. (19:45-23:09), приземные температура - 15°C, влажность - 80%, давление - 720 мм.рт.ст. в начале измерений) и то же для 24 сентября 1984 года (00:45-03:13; приземные температура - 15°C, влажность - 90%, давление - 710 мм.рт.ст. в конце измерений). 3-4 - соответствующие кривые. Интенсивность - 2 мм/ч.



Р и с. 9

Структурные функции ослаблений волн 4 и 8 мм для случая моросьевого дождя 14 сентября 1984 года (кривые 1, 2 - соответственно) и моросьевого дождя 1 октября 1984 года (кривые 3, 4 - соответственно). Интенсивность дождя - 2 мм/ч.

тей облачности больше, чем средние неоднородности дождя и, наоборот, в случаях моросящего дождя размеры неоднородностей облачности меньше размеров неоднородностей дождя.

В заключение автор искренне благодарит сотрудников ИРЭ АН СССР Ю.С.Бабкина, Е.В.Сухонина и сотрудников ЦАО А.В.Колдаева, Н.Ф.Буранбаева, А.С.Азарова, А.Ф.Миронова, участвовавших в измерениях, а также сотрудников НИРФИ С.А.Жевакина, А.П.Наумова и А.В.Троицкого, принявших участие в обсуждении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строганов В.В. - В кн.: Радиометеорология. Труды 7 Всесоюзного совещания. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - С.46.
2. Zavodi A.M., Harder B.N. Electronics Letters.- 1976.- V.12, N17.- P. 422.
3. Olsen R.L. IEEE Trans. on Antennas and Propagation.- 1978.- V.AP-26, N2.- P. 318.
4. Азаров А.С., Бабкин Ю.С., Буранбаев Н.Ф., Колдаев А.В., Мионов А.Ф., Сухонин Е.В., Строганов В.В.//Радиотехника. - 1987. - Т. , № 7. - С.73.
5. Строганов В.В. - В кн.: Тезисы 3-й школы по распространению ММ и СБММ волн в атмосфере. - Харьков, 1989. - С.86.
6. Сухонин Е.В., Бабкин Ю.С., Рукина А.П. - В кн.: Электромагнитные волны в атмосфере в космическом пространстве. - М. : Наука, 1986. - С.102.
7. Manabe T., Thada T., Awaka I. IEEE Trans.Ant.Prop.- 1987.- V.AP-35.- N11.- P. 1326.
8. Строганов В.В. - В отчете "Трамплин-3" - НИРФИ. Создание модели ослабления СМ и ММ волн, метода диагностики и прогнозирования состояния радиоканалов для различных метеословий на основе дистанционного зондирования атмосферы. Инв.№ 0287.0 08Г706, рук.НИР Жевакин С.А. - Горький, 1987. - С.56.
9. Строганов В.В. - В отчете "Теорема-АН" - НИРФИ. Экспериментальное исследование ослаблений ММ волн в толще земной ат -

мосферы при сильных дождях. Инв. № 0286.0 0053960, ун. НИР Строганов В.В. - Горький, 1985.

10. Medhurst R.G. IEEE Trans. Ant. Prop. - 1965. - V. AP-13, B4. - P. 550.
11. Андреев Г.А., Зражевский А.Ю., Кутуза Б.Г. и др. - В кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники. - М.: Наука, 1980. - С. 144-153.
12. Кутуза Б.Г. - В кн.: Труды 3 Всесоюзного совещания по радио - локационной метеорологии. - Л.: Гидрометеоиздат, 1968. - С. 1.

Дата поступления статьи

1 августа 1991 г.

Владислав Витальевич Строганов

КОРРЕЛЯЦИЯ ОБЛАЧНОЙ И ДОЖДЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ПОЛНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН
СИСТЕМОЙ ОБЛАКО - ДОЖДЬ

Подписано в печать 14.11.91 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,45 усл. п.л.
Заказ 5203. Тираж 120. Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте НИРФИ