

УДК 621.371.34

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

**Л. И. Федосеев, И. В. Кузнецов, А. А. Швецов**

**Институт прикладной физики РАН**

Получена 28 ноября 2011 г.

**Аннотация.** Описывается метод прогнозирования эффективности радиотеплолокационных систем, основанный на связи радиотепловых контрастов объектов с контрастообразующей разностью температур и на данных о ее статистике в различных регионах.

**Ключевые слова:** радиотепловые контрасты, контрастообразующая разность температур, миллиметровые волны, регионы.

**Abstract.** This article presents a method for prediction of millimeter wave radiometric systems efficiency. This method is based on connection between target radiometric contrast with contrast forming temperature difference and on its statistics in different regions.

**Keywords:** radiometric contrast, contrast forming temperature difference, millimeter waves, regions.

### **Введение**

Низкий потенциал радиотеплолокационных систем и систем радиометрического зондирования окружающей среды, а также сильная зависимость его в миллиметровом диапазоне от метеоусловий обосновывают постановку вопроса об эффективности работы упомянутых систем в тех или иных условиях. Этот вопрос неизбежно возникает при выборе средств решения задачи среди конкурирующих, при оптимизации рабочих диапазонов длин волн этих средств, при планировании технического обеспечения операций в новых регионах и т. д.

Оценивая эффективность, естественно, сначала не принимать во внимание технические отказы и ошибки операторов, т. к. это можно учесть отдельно. Поэтому в рассмотрении, не учитывающем такого рода отказы и ошибки, речь пойдет о предельно достижимой эффективности работы систем, определяемой количественно как вероятность существования таких внешних условий, при которых данные системы могут обеспечить заданный уровень выходных параметров, необходимый для решения задачи [1]. Для краткости ниже будем называть эту характеристику предельной эффективностью. Такая постановка предполагает, что алгоритм работы системы задан, и можно установить связь выходных параметров системы, как с характеристиками самой системы, так и с характеристиками объекта, по которому ведется работа, а также с условиями на трассе сигнала. Пользуясь этой связью, можно найти требуемые уровни характеристик объекта и условий на трассе, а, зная эти уровни, оценить вероятность их существования в тех или иных метеоусловиях. Ключевым моментом такого подхода является наличие зависимости главной радиометрической характеристики объекта – его яркостного контраста – от характеристик атмосферы и фона, зависимости, позволяющей свести задачу о предельной эффективности к прогнозированию условий существования и переноса требуемого контраста к радиометру в течение года, сезона и т.д. Сравнительно просто она может быть установлена для металлических объектов (танк, бронетранспортер, вертолет и т.п.), если задана их геометрия и имеется модель радиометрической обстановки.

Чтобы проиллюстрировать возможность введения и полезность использования понятия предельной эффективности, ограничимся задачей радиометрического обнаружения упомянутых выше объектов, которая, представляя самостоятельный интерес, является еще и первоначальным этапом любых других задач пассивной локации (самонаведения, определения координат цели и т.п.), но в отличие от некоторых из них решение ее сводится к достижению необходимой величины единственного параметра – отношения

сигнал / шум. Очевидно, что наибольшее значение этого параметра может быть достигнуто в случае работы обнаружителя на однородном фоне в режиме оптимальной фильтрации сигнала. Поэтому ниже мы остановимся на основных моментах оценки предельной эффективности именно в рамках этих предположений. При необходимости можно будет учесть и влияние фоновых неоднородностей.

Для решения поставленной задачи нам понадобится ввести радиометрическую модель объекта и фоновой обстановки и рассмотреть вопрос о возможности прогнозирования условий контрастообразования в различных физико-географических зонах. В заключение приведем пример оценки эффективности обнаружения танка с движущейся ракеты.

### 1. Обнаружение на однородном фоне

Напомним, что отношение сигнал / шум  $q$  связано с усредненным по видимому контуру удаленного объекта его яркостным контрастом  $\Delta T_y$ , с флуктуационным порогом чувствительности  $\delta T$  обнаружителя (постоянная времени 1 с), с отношением телесных углов объекта  $\Omega$  и главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны  $\Omega_a$  ( $\Omega < \Omega_a$ ) и с ослаблением сигнала на трассе длиной  $R$  до объекта  $e^{-\chi R}$  следующим соотношением:

$$q \leq \frac{1 - \beta}{2M} \frac{\Delta T_y}{\delta T} \frac{e^{-\chi R}}{\Omega_a} \frac{\Omega}{\Omega_a} \sqrt{t}, \quad (1)$$

где  $\beta$  - коэффициент рассеяния антенны вне ее главного лепестка;  $t$  - время, отведенное на просмотр одного элемента пространственного разрешения;  $M$  - множитель, зависящий от алгоритма работы системы, который при заданном алгоритме может быть вычислен в предположении оптимальной фильтрации сигнала.

Задавшись величиной  $q$ , алгоритмом работы системы и ее конкретными параметрами, можно определить из (1) требующуюся величину ослабленного

атмосферой контраста  $\Delta T_{\gamma} e^{-\chi R}$ , а затем оценить вероятность ее существования в тех или иных конкретных условиях наблюдений, исходя либо из модельных представлений, либо из достаточно представительной совокупности эмпирических данных, связывающих контраст конкретных объектов с характеристиками атмосферы и подстилающей поверхности.

## **2. Радиометрическая модель объекта и фоновой обстановки**

Радиоизлучение различных участков подстилающей поверхности и объектов складывается из их собственного теплового излучения и из переотраженного (рассеянного) излучения окружающей среды. Что касается металлических объектов, то их собственное излучение мало, а главная часть рассеянного определяется, прежде всего, излучением небосвода, которое в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах подвержено сильным погодным вариациям.

При заданной форме наблюдаемого объекта расчет величины его яркостного контраста с достаточной для практики точностью можно провести в приближении геометрической оптики, если заданы отражательно-излучательные характеристики объекта и распределение радиояркости окружающего его фона. Для описания излучения неба обычно пользуются плоскостной изотермической моделью атмосферы. Излучение же из нижней полусферы можно в зависимости от задачи смоделировать по-разному.

Так, еще в пятидесятых-шестидесятых годах прошлого столетия А.М.Стародубцевым были выполнены расчеты контраста корабля с использованием модели в виде набора плоских металлических листов различной ориентации, наблюдаемых на фоне гладкой диэлектрической поверхности под разными углами визирования. В [2] были получены (в двух поляризациях) зависимости эффективных температур и яркостных контрастов металлических объектов сложной конфигурации от угла визирования с использованием их моделей в виде идеально отражающих плоскости,

параллелепипеда, полусферы и плоской прямоугольной площадки с выпуклой полусферой посередине<sup>1</sup> - тоже на фоне гладкой подстилающей диэлектрической поверхности, а также шара, поднятого над ней.

Для приближенного описания контрастов объектов весьма сложной формы на фоне пересеченной местности в [5,6] была предложена модель изотропно рассеивающего объекта на фоне ортотропной матовой поверхности. В рамках этой модели яркостный контраст объекта с альбедо  $A$  описывается выражением:

$$\Delta T_{я} = \bar{T}_b - \bar{T}_s = -\frac{A}{2} (T_0 - \bar{T}_{sky}) + \left(1 - \frac{A}{2}\right) (T_0 - \bar{T}_s) , \quad (2)$$

где  $\bar{T}_b$  - средняя яркостная температура объекта,  $\bar{T}_s$  - средняя яркостная температура подстилающей поверхности,  $\bar{T}_{sky}$  - средняя яркостная температура небосвода,  $T_0$  - приземная температура воздуха. Из (2) следует, что контраст объекта примерно пропорционален величине  $T_0 - \bar{T}_{sky}$ . Если при этом подстилающая поверхность еще и “достаточно черная”, т.е.

$$T_0 - \bar{T}_s \ll T_0 - \bar{T}_{sky} , \quad (3)$$

то контраст изотропно рассеивающего объекта (а также и реального объекта весьма сложной формы, как правило, по своим характеристикам приближающегося к изотропно рассеивающему), на фоне такой поверхности выражается только через альбедо объекта и величину  $T_0 - \bar{T}_{sky}$ :

$$\Delta T_{я} = -\frac{A}{2} (T_0 - \bar{T}_{sky}) . \quad (4)$$

В связи с вышеизложенным величина  $\Delta T$ , равная

$$\Delta T = T_0 - \bar{T}_{sky} , \quad (5)$$

была названа в [5,6] контрастообразующей разностью температур.

<sup>1</sup> При этом были учтены переотражения в системе плоскость – полусфера. Предложенная в [2] модель «полусфера на плоскости» и результаты соответствующих расчетов были повторены в [3,4] без ссылок на [2].

В [5,6] было также отмечено, что в широком диапазоне значений полного вертикального ослабления, реализуемых в миллиметровых окнах прозрачности, средняя яркостная температура небосвода  $\bar{T}_{sky}$  в широком диапазоне значений  $\Gamma_0$  отличается от  $T_{sky}(30^\circ)$  - яркости неба под углом места  $30^\circ$  - не более чем на 18 % . Поэтому при ясном небе или равномерной облачности систематизация и прогнозирование яркости и контрастов объектов и участков местности с достаточной для практики точностью могут быть выполнены с использованием в качестве контрастообразующей разности температур  $\Delta T$  легко измеряемой (и легко рассчитываемой) величины

$$\Delta T \approx T_0 - T_{sky}(30^\circ) \approx T_0 e^{-2\Gamma_0} \quad (6)$$

(в условиях разрывной облачности можно воспользоваться значениями  $T_0 - T_{sky}(30^\circ)$ , усредненными по данным измерений при различных азимутах).

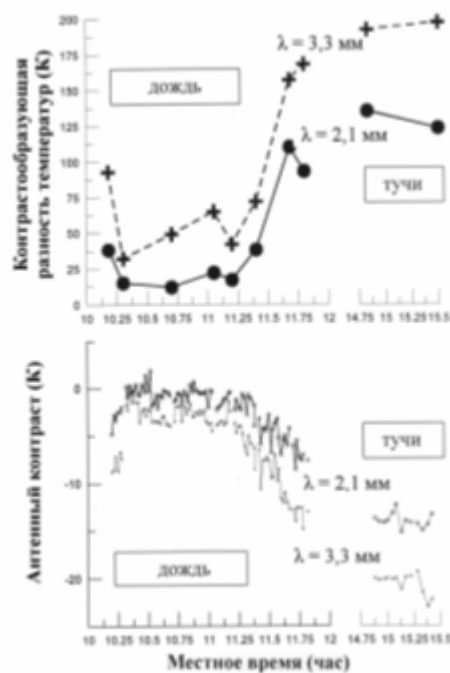


Рис.1.

Наличие связи контраста реального металлического объекта сложной формы и контрастообразующей разности температур можно проиллюстрировать с помощью уже приводившегося нами в [7] рис. 1, на

котором представлены результаты практически синхронных измерений антенного контраста танка  $\Delta T_A$  и контрастообразующей разности температур  $\Delta T = T_0 - T_{sky}(30^\circ)$  на двух длинах волн  $\lambda = 2,1 \text{ мм}$  и  $\lambda = 3,3 \text{ мм}$  во время сильно меняющихся метеоусловий. Хорошо видно, что с началом дождя резко падают как значения контрастообразующей разности температур, так и контраста объекта. При этом на волне  $\lambda = 2,1 \text{ мм}$ , которой соответствуют меньшие значения контрастообразующей разности температур, антенный контраст падает практически до нуля. После окончания дождя величины контрастообразующей разности температур существенно увеличиваются. Одновременно возрастают и абсолютные значения контраста объекта.

Более того, как показали теоретические оценки [5-7], подтвержденные многочисленными данными одновременных измерений в двухмиллиметровом и в трехмиллиметровом диапазонах длин волн в различных полевых условиях [6,8], яркостный контраст широкого класса реальных металлических объектов (танк, бронемашина, тягач, автомашина), казалось бы, заметно отличающихся от изотропно рассеивающих, также приближенно можно описать простым соотношением (7):

$$\Delta T_{я} \approx -a_i \Delta T \approx -a_i [T_0 - T_{sky}(30^\circ)], \quad (7)$$

где  $a_i$  - коэффициенты контраста, зависящие как от угла наблюдения, формы объекта и его ракурса, так и от состояния его поверхности и поверхности фона, а также от метеоусловий. Последнее в выражении (7) отмечено индексом "i":  $i = 1$  - осадков нет, ясно, облачно;  $i = 2$  - дождь;  $i = 3$  - снегопад).

Так, например, в условиях средней полосы Европейской территории России (ЕТР) для наблюдаемого на фоне горизонта танка (вид спереди) коэффициент  $a_1$  (осадков нет) согласно [6,8] при контрастообразующей разности температур  $\Delta T = T_0 - T_{sky}(30^\circ) \leq 180 \text{ К}$  равен

$$a_1 \approx 0,48 \pm 0,06. \quad (8)$$

При контрастообразующей разности температур, превышающей  $180\text{ K}$ , в среднем наблюдается прекращение роста контраста с ростом  $\Delta T$ , сопровождающееся увеличением разброса значений  $\Delta T_y$  и

$$\Delta T_y \approx (-86 \pm 15)\text{ K}. \quad (9)$$

Это, скорее всего, связано с тем, что в миллиметровом диапазоне значения  $T_0 - T_{sky}(30^\circ) \geq 180\text{ K}$  реализуются, как правило, зимой при наличии снежного покрова, эффективная температура излучения которого  $\bar{T}_s$  зависит от состояния этого покрова и бывает существенно меньше  $T_0$  [9]. При этом может нарушаться условие "черноты" подстилающей поверхности (3).

Далее, во время дождя -

$$a_2 \approx 0,24 \pm 0,05. \quad (10)$$

При снегопаде и  $\Delta T \leq 170\text{ K}$  -

$$a_3 \approx 0,1 \pm 0,02. \quad (11)$$

Если при снегопаде  $\Delta T \geq 170\text{ K}$ , то такой случай следует отнести к рубрике «облачно».

Объекты типа бронемашин, тягача и им подобные характеризуются несколько меньшими значениями коэффициентов контраста, но с тем же стандартом отклонения. Последнее в значительной мере связано, с влиянием пригоризонтных фоновых неоднородностей.

Вариации ракурса и наклона объектов на приземных трассах при углах визирования до  $-2^\circ$  приводят к вариациям контрастов на величину, как правило, не превышающую  $\pm 15\text{ K}$ .

Заметим, что полученные из измерений только что приведенные значения коэффициентов контраста для танка на фоне горизонта практически совпадают с вычисленными на основе его трехкомпонентной модели [10], включающей в себя следующие составляющие: отражающую полусферу, занимающую примерно 25 % телесного угла объекта, такого же углового размера наклонный лобовой бронелист, отражающий излучение неба под



углом  $\approx 30^\circ$ , и совокупность остальных частей ( $\approx 50\%$ ), посылающих в сторону наблюдателя излучение с температурой, близкой к  $T_0$ , не создающее контраста. На наклонных трассах коэффициенты контраста в зависимости от характера подстилающей поверхности и угла визирования могут оказаться в 1,5 – 2 раза больше [2,8]. Уменьшение же при этом уверенно отмечается, если цель наблюдается на фоне ровных искусственных покрытий (асфальт, бетон), а также - водной поверхности.

Располагая упомянутыми коэффициентами контраста подлежащих локации объектов и статистикой контрастообразующей разности температур, можно проводить прогнозирование предельной эффективности радиотеплолокационных систем.

### 3. Контрастообразование в различных регионах

Вероятность существования тех или иных значений контрастообразующей разности температур  $\Delta T$  в конкретном климатическом регионе можно оценить, опираясь на достаточно представительные ряды измерений излучения неба (см., например, [11-13]), либо путем расчета при наличии опять-таки достаточно представительной статистики вертикальных профилей метеоданных, характеристик облачности, тумана, осадков в интересующем регионе. В настоящее время существуют надежные методики инженерного расчета молекулярного поглощения и ослабления в осадках [14-18], которые могут быть использованы для расчета яркостной температуры атмосферы.

Пример кумулятивных распределений вероятности значений контрастообразующих температур  $\Delta T = T_0 - T_{sky}(30^\circ)$  в трех миллиметровых окнах прозрачности, построенный по данным годового цикла измерений [11-13] в одном из центральных районов ЕТР (в Нижнем Новгороде) приведен на рис.2. Представление о сезонном ходе  $\Delta T$  на волнах  $\lambda = 2,09$  мм и  $\lambda = 3,34$  мм в этом же районе дает рис.3, на котором показаны также и среднемесячные значения

температуры воздуха  $T_0$  и абсолютной влажности  $\rho$  в приземном слое воздуха, реализовавшиеся в период с января 1979 г. по январь 1980 г. включительно.

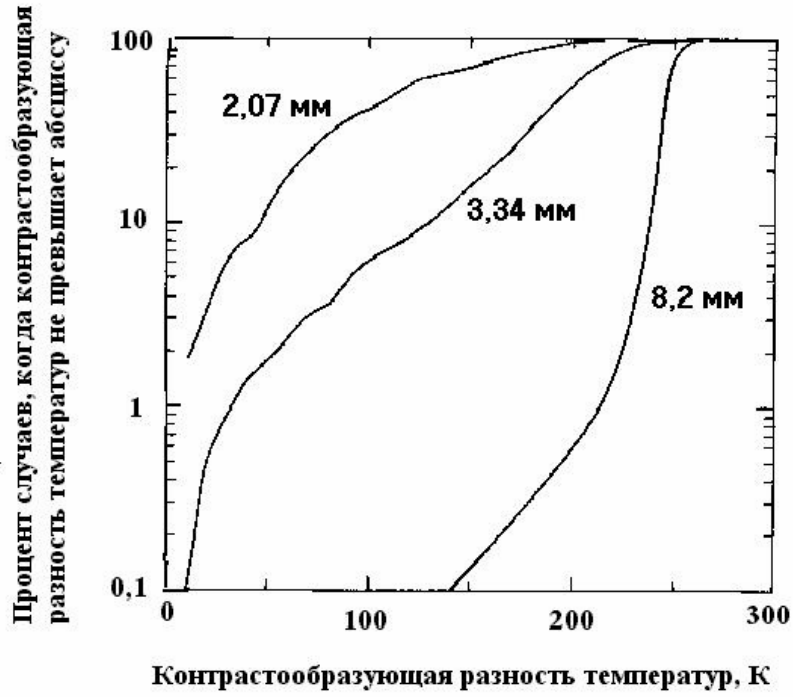


Рис.2.

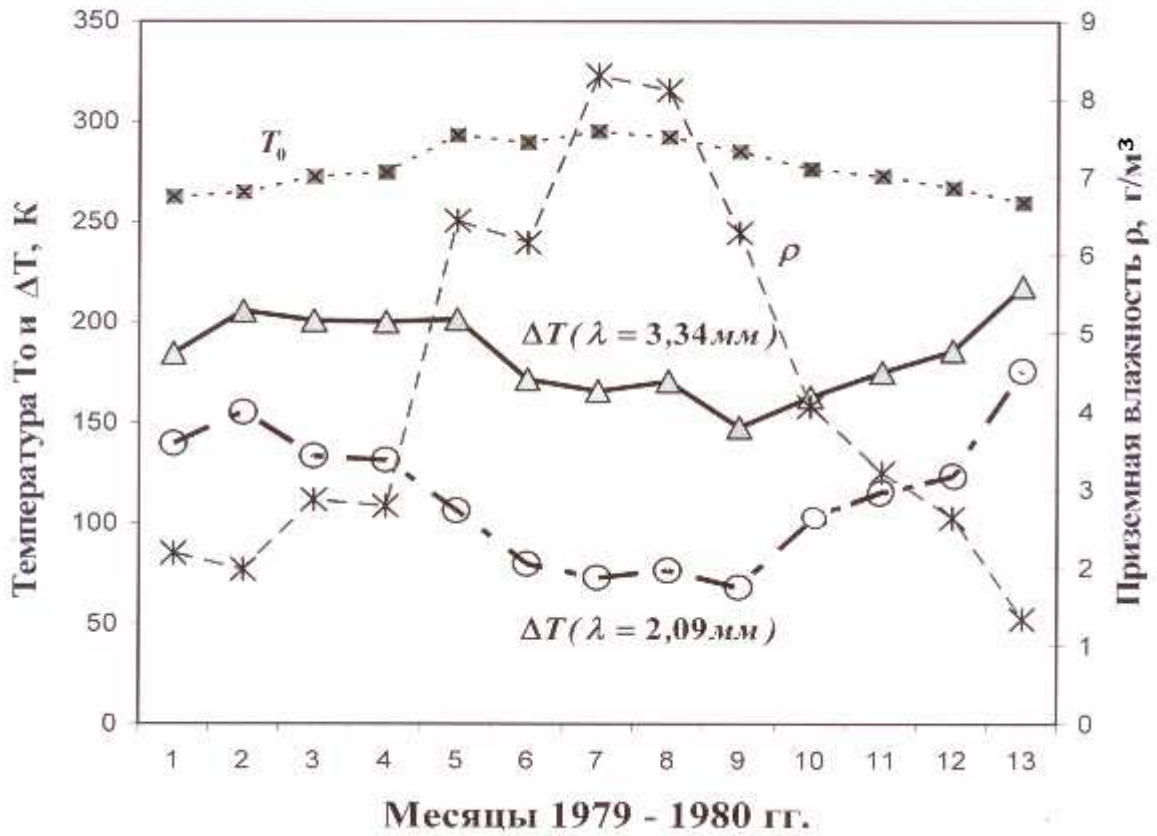


Рис.3.

Приведенные на рис. 2 и рис. 3 данные свидетельствуют о том, что в 2–мм окне прозрачности атмосферы условия формирования контрастов значительно более тяжелые по сравнению с условиями в 3–мм и тем более в 8–миллиметровом.

Полученные в ходе измерений [11,12] статистические данные о метеобстановке и контрастообразующей разности температур  $\Delta T$  в условиях средней полосы ЕТР, а также измеренные в 2-мм и в 3-мм диапазонах волн коэффициенты контраста танка  $a_i$  были использованы в [8] для получения соответствующих упомянутому региону годовых кумулятивных распределений яркостного контраста танка  $\Delta T_y$ , приведенных на рис. 4.

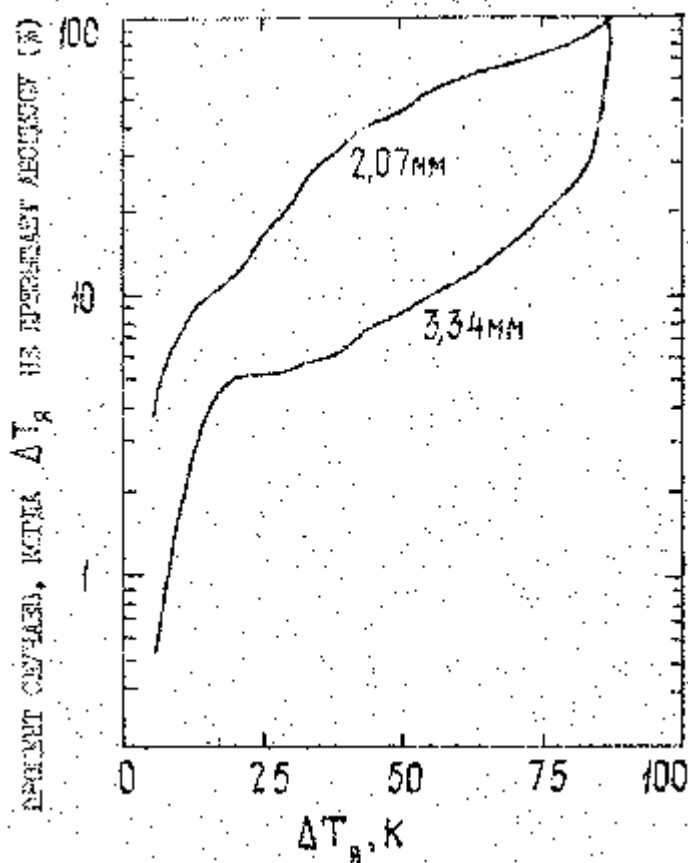


Рис.4.

Очевидно, что в различных регионах, отличающихся друг от друга по своим климатическим условиям, должны отличаться и условия контрастообразования. Это можно проиллюстрировать с помощью рис. 5. На нем показаны относящиеся к трехмиллиметровому окну прозрачности

атмосферы кумулятивные распределения вероятности существования контрастообразующей разности температур  $\Delta T$ , полученные в 1974 – 1989 г.г. на различных широтах, охватывающих зоны полярной пустыни, Заполярья, Северо-Западного региона, Крыма и туркменской пустыни [19]. Во всех случаях проводится сопоставление с данными, полученными в соответствующие календарные сроки 1979 г. в Горьком (пунктир).

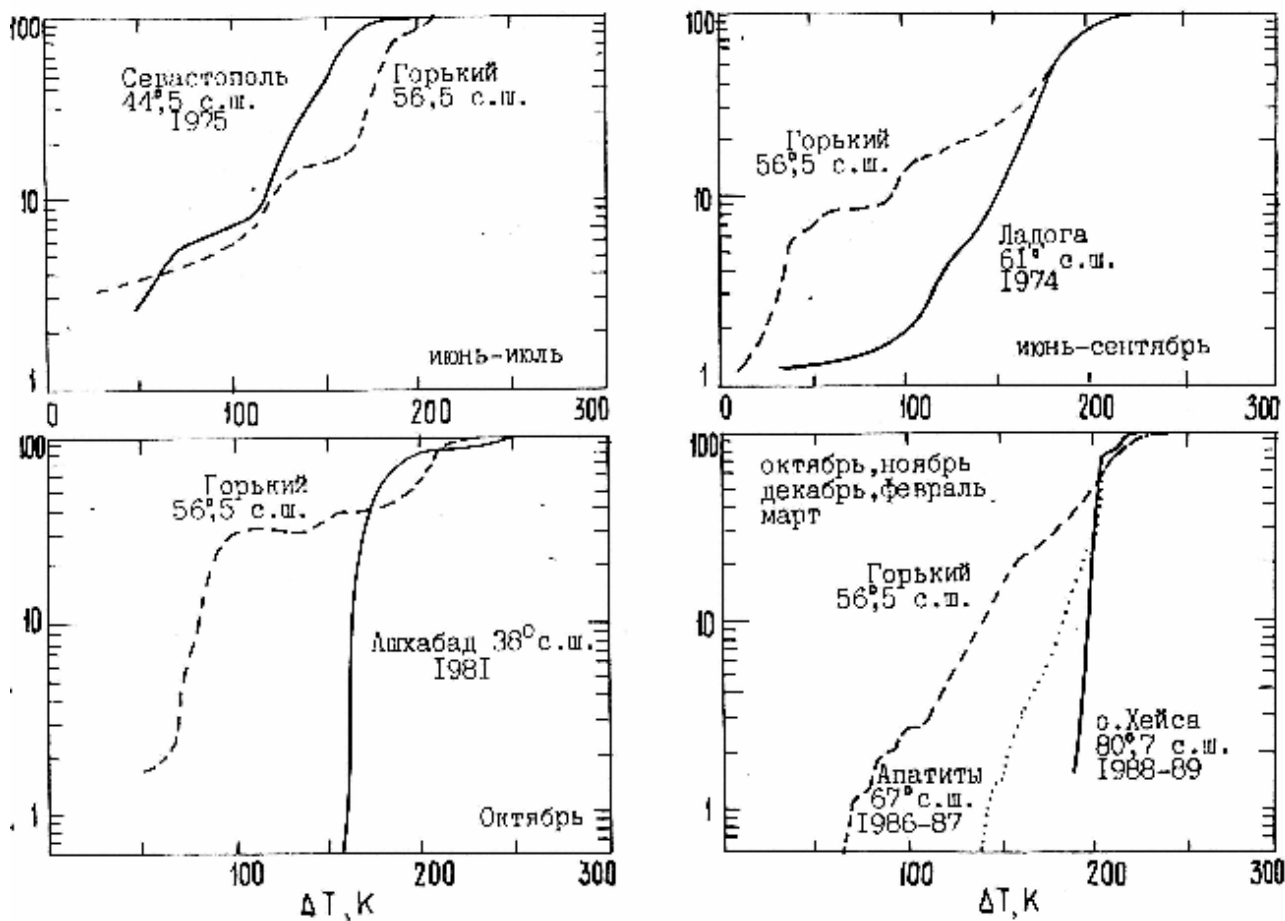


Рис.5.

Из рис. 5, как и ожидалось, следует, что хорошо известные климатические особенности рассмотренных регионов четко проявляются при формировании контрастообразующей разности температур.

#### 4. О возможности экспресс-прогнозирования

Приведенные выше примеры показывают, что существует насущная потребность разработки районированной, статистически обеспеченной модели атмосферы, которая позволила бы прямо находить реализующиеся в заданных

регионах вероятности существования значений контрастообразующей разности температур  $\Delta T$  или величин, по которым она может быть вычислена (например, температуры зенита  $T_{sky}(90^\circ)$  или полного вертикального ослабления  $\Gamma_0$ ) на требуемых частотах. В этом отношении нельзя не отметить работу [20], в которой по данным многолетней статистики метеорологических приземных и радиозондовых данных рассчитаны кумулятивные распределения вероятности значений температуры неба в зените  $T_{sky}(90^\circ)$  на частотах  $f = 10, 18, 32, 44$  и  $90$  ГГц для 13 регионов континентальной и приморской части США, а также для Аляски и Гавайских островов.

В основу упомянутого разделения территории США на регионы в [20] было положено, прежде всего, их различие по характеру облачности, которая в подавляющем числе регионов существует не менее 50 % времени года, тогда как время выпадения осадков занимает обычно не более 5 – 8 %.

Приведенные в [20] региональные кумулятивные распределения температуры зенита и соответствующие среднегодовые значения температуры воздуха были использованы в [21, 22] для перехода в рамках плоскостной изотермической модели атмосферы к региональным кумулятивным распределениям контрастообразующей разности температур  $\Delta T$  и полного вертикального поглощения  $\Gamma_0$ , а также проведен анализ следующих из [20] значений  $\Gamma_0(n\%)$ , которые в течение  $n\%$  времени года превышаются полным вертикальным ослаблением атмосферы. В результате показано, что

- в окнах прозрачности атмосферы для заданного уровня вероятности  $n\%$  (по крайней мере, в пределах  $30\% \leq n \leq 70\%$ ) на данной частоте  $f$  значения  $\Gamma_0(f, n\%)$  линейно связаны с суммарным годовым количеством дождевых осадков  $W$

$$\Gamma_0(f, n\%) = A(f, n\%) + B(f, n\%) W ; \quad (12)$$

- параметры  $A(f, n\%)$  и  $B(f, n\%)$  различны в континентальных и прибрежных регионах.

Пример построенной по данным работы [20] зависимости  $\Gamma_0(50\%)$  от  $W$  для трех частот (90 ГГц, 44 ГГц и 32 ГГц) в континентальных регионах США приведен на рис. 6 (темные и светлые кружки, а также треугольники соответствуют штатам Аризона, Техас, Айдахо, Монтана, Колорадо, Миннесота, Мичиган, Арканзас). График, соответствующий частоте 32 ГГц, дополнен взятыми из [23] экспериментальными данными («плюсы»), относящимися к Греции (Афины), Швеции (Стокгольм), Германии (Штутгарт), Австрии (Грац) и Финляндии (Йокиойнен), а частоте 90 ГГц – данными измерений [11,12] – «ромб».

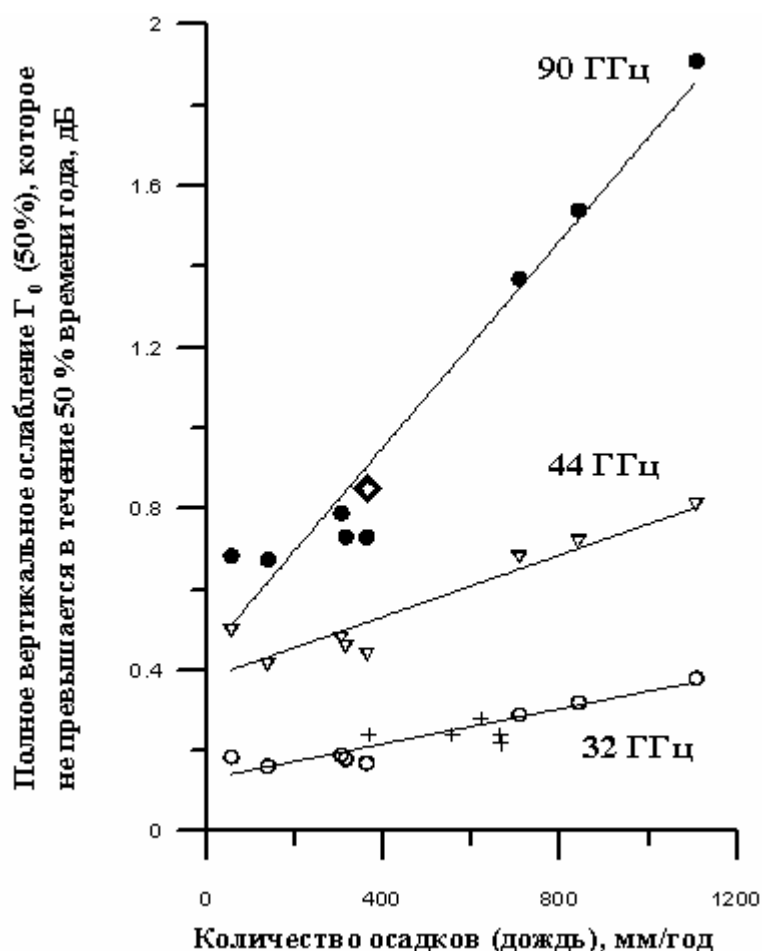


Рис.6.

Хорошее согласие полученных в широком диапазоне частот экспериментальных данных [11, 12, 23] с данными, следующими из [20] (светлые и темные кружки, треугольники и аппроксимирующие прямые на рис.6 и рис.7), позволяет проводить в континентальных регионах экспресс-

прогнозирование полного вертикального поглощения  $\Gamma_0$  и контрастообразующей разницы температур  $\Delta T$  (см. рис.7) **только по одному параметру  $W$**  (имеется в виду, что для перехода от  $\Gamma_0$  к  $\Delta T$  в данном регионе можно использовать среднегодовые значения температуры  $T_0$ ). Аналогичные зависимости наблюдаются и в приморских регионах, но там данных меньше и имеет место больший разброс.

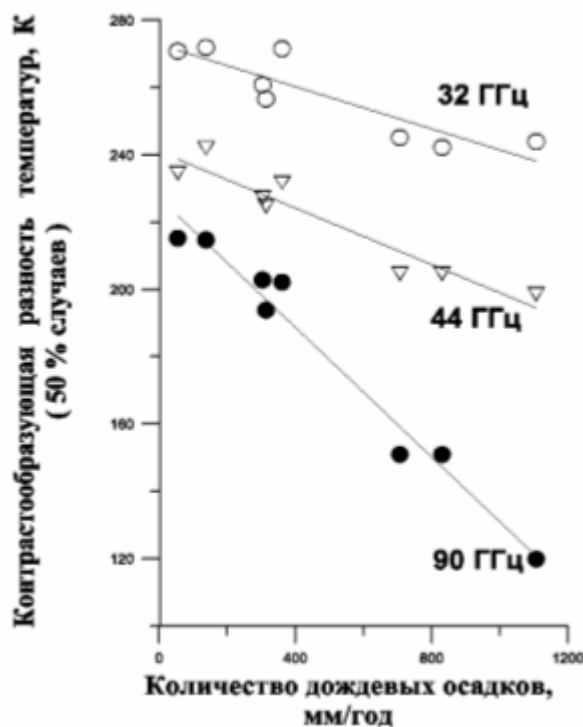


Рис.7.

В заключение этого раздела подчеркнем, что прогнозирование предельной эффективности обнаружения в континентальных областях через получаемые описанным выше способом значения  $\Gamma_0$  и  $\Delta T$  без привлечения дополнительных сведений возможно только в двух случаях:

- 1) зондирование через всю толщу атмосферы (практически с высоты в несколько километров);
- 2) зондирование в условиях, когда можно пренебречь ослаблением сигнала на трассе до объекта.

Во всех других случаях необходимо привлекать сведения об ослаблении сигнала на трассе зондируемый объект – приемная антенна или делать соответствующие оценки.

Ниже приводится пример, относящийся к последнему случаю.

### 5. Оценка эффективности обнаружения танка с подвижного носителя

Рассмотрим возможности обнаружения цели (танк) находящейся в точке  $X_0$  отрезка  $(-L;L)$  на рис.8. Радиотеплолокатор располагается на борту ракеты, которая движется горизонтально со скоростью  $V$  по оси  $Y$ , проходящей через начало координат, так что ее расстояние до центра отрезка  $(-L;L)$  меняется со временем по закону

$$r(t) = r_H - Vt, \quad (13)$$

где  $r_i$  - начальное расстояние ( $2Z_2$  – на Рис.7), с которого начинается процесс обнаружения, заканчивающийся в точке  $Z_2$  на расстоянии  $r_e$ . Ось диаграммы направленности антенны шириной  $\Theta_0$  (по нулевому уровню) периодически сканируется по пилообразному закону от некоторого начального положения, смещенного от направления на начало отрезка  $-L$  на угол, равный ширине диаграммы направленности  $\Theta_0$ , влево, до положения, смещенного от направления на конец отрезка  $L$  на угол  $\Theta_0$  вправо.

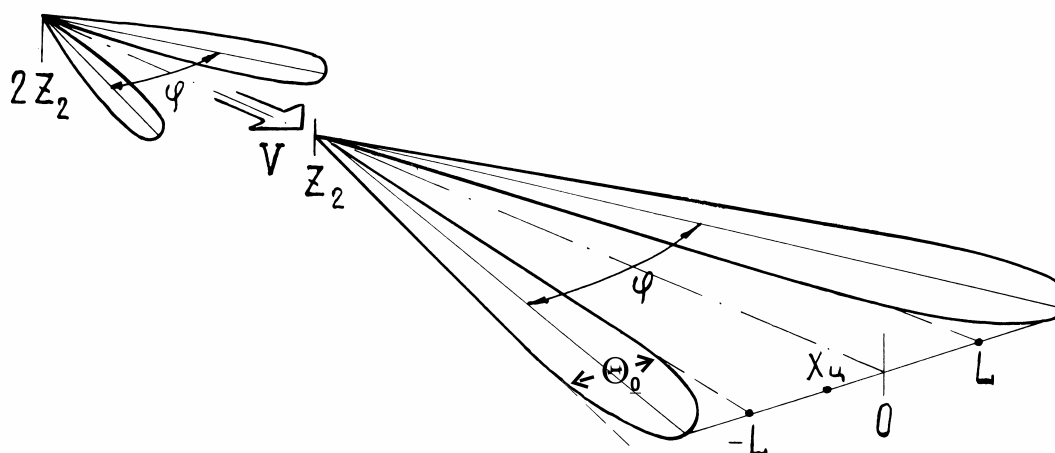


Рис.8.



Если сканирование осуществляется таким образом, что продолжительность каждого скана одна и та же, а угловая скорость смещения луча возрастает по мере уменьшения расстояния до цели вследствие увеличения сектора обзора, то, как было показано в [24], чтобы получить требуемое для дальнейшей коррекции траектории ракеты отношение сигнал/шум  $q$  необходимо обеспечить выполнение условия (14). Оно связывает яркостный контраст цели  $\Delta T_{я}$ , площадь ее сечения  $S_0$  и эффективную величину  $e^{-\bar{\chi R}}$  - поглощения сигнала на трассе с пороговой чувствительностью приемника  $\Delta T_{\min}$ , параметрами антенны ( $\Omega_{\bar{a}\bar{e}}$  - телесный угол антенны,  $\beta_{\bar{a}\bar{e}}$  - коэффициент рассеяния вне главного лепестка,  $\Theta_0$  - ширина главного лепестка по нулевому уровню) и координатно-скоростными параметрами ( $r_i, r_k, L, V$ ):

$$\Delta T_{я} e^{-\bar{\chi R}} \geq \frac{2\sqrt{2} k(r_n, r_k) q \Delta T_{\min} \Omega_{zл} \sqrt{LV} r_k}{(1 - \beta_{zл}) S_0 \sqrt{1 - \frac{\Theta_0 r_k}{L} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Theta_0 r_k}{L} \right)^2} \lg \left( 1 + \frac{2L}{\Theta_0 r_k} \right)}. \quad (14)$$

Воспользовавшись этой формулой, можно провести численные оценки яркостного контраста танка  $\Delta T_{я}$ , необходимого для его обнаружения радиометром с пороговой чувствительностью  $\Delta T_{\min} = 0,05 K$  (постоянная времени 1 секунда) и антенной диаметром 100 мм, установленными на ракете, движущейся со скоростью  $V = 260$  м/с, при прохождении расстояния с  $r_i \cong 0,36$  км до  $r_k \cong 0,18$  км до цели<sup>2</sup>, находящейся в секторе  $\pm 17$  м.

Что касается вклада поглощения на трассе, то, как показывают проведенные оценки, оно при указанных выше начальном и конечном расстояниях практически не отличается от потерь на трассе длиной  $\approx 0,3$  км. Наибольший вклад при этом вносится каплями дождя. Величина этого ослабления может быть найдена путем вычитания из данных измерений полного вертикального поглощения молекулярной части поглощения (по данным измерений приземной температуры и влажности) и деления на

<sup>2</sup> При упомянутых расстояниях до цели  $k(r_n, r_k) \cong 1,1$ .

приведенную эффективную высоту дождя [15,16,18]. Проведенные с учетом сказанного оценки показали, что при расчете эффективности обнаружения в большинстве континентальных регионов из-за сравнительно малой части занятого дождями времени года (5 – 8 %) и годовым количеством дождевых осадков  $W \approx 300 - 500$  мм можно прямо пользоваться годичными кумулятивными распределениями контраста типа полученных в [8] (см. рис.4).

В соответствии с только что сказанным для достижения 10-кратного превышения сигнала над шумом упомянутого выше ракетного обнаружителя необходимо, чтобы в 2-миллиметровом окне прозрачности яркостный контраст  $\Delta T_{\text{я}}$  танка составлял не менее 30,5 К, а в 3-миллиметровом – не менее 53,5 К. Таким значениям контраста соответствуют вероятности обнаружения не менее, чем в 75% и 90% времени года, соответственно. Осенью же вероятность обнаружения в 2-миллиметровом падает до  $\approx 60\%$ , а в 3-миллиметровом – только до  $\approx 80\%$ , т.е. использование радиотеплолокационного обнаружителя 3-миллиметрового диапазона гораздо более перспективно. Еще более это превосходство должно подчеркнуться в условиях пониженной почти в 1,5 контрастообразующей разности температур штатов Мичиган, Арканзас, где должна заметно ухудшиться обнаружительная способность и в 3-миллиметровом диапазоне. Не исключено, что в связи с этим в головках самонаведения противотанковых ракет фирмы Rockwell диаметр антенны был увеличен до 150 мм [25].

### Заключение

Показано, что основываясь на связи контрастов реальных металлических объектов с контрастообразующей разностью температур (или с полным вертикальным ослаблением) и на данных о ее статистике, можно проводить прогнозирование предельной эффективности радиотеплолокационных систем в различных регионах. При этом в континентальных регионах экспресс-прогнозирование таких важных параметров как полное вертикальное

поглощение и контрастообразующая разница температур можно проводить только по одному параметру - годовому количеству дождевых осадков.

Авторы благодарят Ю.В.Лебского за помощь в оформлении статьи.

### Литература

1. *Fedoseev L.I.* Prediction of maximum efficiency of millimeter wave radiometric systems. – International Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves”. June 7 – 10, 1994. Kharkov, Ukraine. Conference Proceedings, vol. IV, pp.713 – 715.
2. *Стародубцев А.М., Федосеева Т.Н.* Расчет эффективных температур металлических отражателей в миллиметровом диапазоне волн. – Всесоюзный симпозиум по приборам, технике и распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. 25 - 27 октября 1976. Москва. Тезисы докладов и сообщений. С. 216 - 217.
3. *Быстров Р.П., Краснянский А.Д., Новиков С.С., Потапов А.А., Соколов А.В.* Пассивные радиолокационные системы скрытного обнаружения наземных объектов. – Электромагнитные волны и электронные системы. 1996. № 1. С. 64 - 71.
4. *Борзов А.Б., Быстров Р.П., Дмитриев В.Г., Засовин Э.А., Потапов А.А., Соколов А.В., Чусов И.В.* Научно-технические достижения и проблемы развития техники миллиметрового диапазона радиоволн. – Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 4. С. 18 – 80.
5. *Федосеев Л.И., Швецов А.А.* К описанию радиотепловых контрастов. – II Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. 13 – 15 сентября 1978. Харьков. Тезисы докладов. Т. II. С. 170 - 171.
6. Экспериментальное исследование радиотепловых контрастов объектов на сложном фоне (заключительный отчет по НИР "Шлюпка-РВО", № Гос.

- регистрации В-56073, научный руководитель – Федосеев Л.И.). Горький. ИПФ РАН. 1977.
7. *Федосеев Л.И., Швецов А.А.* Формирование радиотепловых контрастов объектов в миллиметровом диапазоне длин волн. – Журнал радиоэлектроники. 2010. № 7. (ISSN 1684-1719), Иденф. № ФГУП НТЦ 0421000114/0028.
  8. *Федосеев Л.И., Кузнецов И.В., Куликов Ю.Ю., Лебский Ю.В., Мальцев В.А., Швецов А.А., Шкаев А.П., Штанюк А.М., Быстров Р.П.* Экспериментальное исследование радиотепловых контрастов объектов в миллиметровом диапазоне длин волн. IV Всероссийская конференция «Радиолокация и связь» - ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г. Сборник докладов. С.301 – 314.
  9. *Кузнецов И.В., Федосеев Л.И., Швецов А.А.* Радиометрия снежного покрова в коротковолновой части миллиметрового диапазона. - Известия ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т. 40. С. 1113 - 1125.
  10. *Федосеев Л.И., Швецов А.А.* Многочастотное радиометрическое зондирование объектов. Материалы XIV отраслевого координатного семинара по СВЧ технике. 2005. С. 209 – 213. Нижегородская обл., п. Хахалы.
  11. *Кузнецов И.В., Федосеев Л.И.* Сравнительное исследование контрастообразующей разности температур в 2- и 3-миллиметровом окнах прозрачности атмосферы. – III Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. 22 – 24 сентября 1980. Горький. Тезисы докладов. Т. I. С. 291 – 292.
  12. *Fedoseev L.I., Kuznetsov I.V.* Synchronous measurement of the sky radio emission in the 2- and 3-millimeter wave lengths regions. – Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1980. Vol. 1. No. 3. P. 373 – 387.
  13. *Бабкин Ю.С., Сухонин Е.В., Чернышев В.И.* Исследование ослабления на волне 8,2 мм в толще земной атмосферы. - III Всесоюзный симпозиум по

- миллиметровым и субмиллиметровым волнам. 22 – 24 сентября 1980. Горький. Тезисы докладов. Т. I. С. 271 – 272.
14. *Liebe H.J.* MPM – atmospheric submillimeter waves propagation model. – Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1989. Vol. 10. No 6. P. 633 - 650.
  15. *Бабкин Ю.С., Сухонин Е.В., Чернышев В.И.* К вопросу о прогнозе ослабления миллиметровых волн в атмосфере. - III Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. 22 – 24 сентября 1980. Горький. Тезисы докладов. Т. I. С. 273 – 274.
  16. *Akira Ishimaru, Cheng R.L.-T.* Multiple – scattering effect on radiometric determination of rain attenuation at millimeter wavelengths. – Radio Sci. 1980. V. 15. No. 3. P. 507 – 516.
  17. *Лубяко Л. В.* Влияние снегопада на угловое распределение радиоизлучения атмосферы в миллиметровом диапазоне волн. – Сб. Статистические методы и системы обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды. 1989. С. 76 – 77.
  18. *Сухонин Е.В.* К вопросу о прогнозировании ослабления радиоволн в дожде. – Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 8. С. 934 – 938.
  19. *Борисов О.Н., Кузнецов И.В., Куликов Ю.Ю., В.Г.Рыскин, Федосеев Л.И., Швецов А.А.* Сравнение условий контрастообразования в некоторых физико-географических зонах. – IV Всесоюзная школа по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. 1991. Нижний Новгород. Тезисы докладов. С. 94 – 95.
  20. *Slobin S.D.* Microwave noise temperature and attenuation of clouds: Statistics of effects at various sites in the United States, Alaska, and Hawaii. – Radio Science, 1982. V. 17. No 6. P. 1443 – 1454.
  21. *Федосеев Л.И.* К прогнозированию условий дистанционного зондирования в миллиметровом диапазоне радиоволн. – Приборы, техника и распространение ММ, СММ волн. Тезисы межведомственной

- научно-технической конференции. С. 121. 30 июня – 3 июля 1992 г. Харьков.
22. *Федосеев Л.И.* О возможности прогнозирования годовых кумулятивных распределений вероятности оптической толщи атмосферы в миллиметровых окнах прозрачности. – XVII конференция по распространению радиоволн. Ульяновск. 21 – 24 сентября 1993 г. Тезисы докладов. Секции 2а, 2б. С.25.
23. *Salonen E., Karhu S., Jokela P., Zhang W., Uppala S., Aulamo H., Sarkkula S.,* Study of Propagation Phenomena for Low Availabilities. - Final Report for the European Space Agency under TSTEC Contract 8025/88/NL/PR. 1990.
24. *Федосеев Л.И., Кузнецов И. В., Швецов А.А.* Прогнозирование предельной эффективности радиотеплолокационных систем миллиметрового диапазона длин волн. - Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Тезисы докладов. С.75. Нижний Новгород. 2007.
25. *Тартаковский А.Б.* Разработка средств наведения и радиолокации миллиметрового диапазона. – Радиоэлектроника за рубежом. 1980. № 6. С.8.