

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЯСНОГО НЕБА В ДИАПАЗОНЕ 35 ГГц

© 2021 г. В. В. Стерлядкин<sup>а</sup>\*, К. В. Куликовский<sup>а</sup>, В. М. Калмыков<sup>б</sup>, Д. В. Ермилов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,  
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

<sup>б</sup>Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,  
ул. Демонстрации, 36, Тула, 300034 Российская Федерация

\*E-mail: sterlyadkin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

После доработки 16.09.2020 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Рассмотрен опыт эксплуатации ветрового профилемера, работающего на частоте 35 ГГц. Особое внимание уделено радиолокационным отражениям от ясного неба (ангелам), которые удается регистрировать до уровня –60 дБЗ. Показано, что в некоторых случаях сигналы от ясного неба невозможно интерпретировать в рамках традиционной теории отражений от турбулентных неоднородностей. Статистически обосновывается невозможность интерпретации полученных сигналов как отражений от насекомых или от крупных аэрозолей. Рассмотрены различные предполагаемые источники отражений от ясного неба в данном диапазоне длин волн.

DOI: 10.31857/S0033849421090163

### ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные отражения от чистой безоблачной атмосферы (их иногда называют “ангелами”) являются наименее изученным явлением в радарной метеорологии и статистической радиофизике. Особенно это относится к миллиметровому диапазону длин волн, который начал широко использоваться в метеорологических целях лишь в последние 10–15 лет. Первые метеорологические радиолокационные измерения, проводимые в 50–60-х годах XX в. показали, что радиоэхо формируется не только от осадков или облаков, но нередко от визуально прозрачной чистой атмосферы [1–3]. В процессе исследований выявлено, что источниками таких отражений могут быть визуально ненаблюдаемые рассеиватели: птицы, насекомые, семена растений, увлекаемые потоками воздуха, крупные аэрозоли, а также неоднородности показателя преломления воздуха [3, 4]. Последние можно условно разделить на слоистые горизонтально протяженные образования, на границах которых формируются градиенты показателя преломления [5, 6]. Другой вид отражений связывают с турбулентными неоднородностями, которые распределены по объему пространства [6, 7]. Слоистые неоднородности обычно формируют отраженный сигнал, мощность которого максимальна при зеркальном отражении и очень быстро падает при отклонении от этого

условия. Обычно такой характер имеют радиолокационные отражения в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. По этой причине метровые и дециметровые профилемеры (в англоязычной литературе их называют profiler) обычно проводят зондирование при углах места, близких к зениту, с отклонением луча от вертикали на 10°...20°. Отражения, распределенные по объему, связаны с береговым рассеянием на турбулентных вихрях, масштаб которых равен половине длины волны [6–8]. Существует минимальный размер вихрей, ниже которого вихри разрушаются за счет вязкого трения. Для нижней тропосферы этот масштаб, по оценкам различных авторов, составляет единицы миллиметров и растет с высотой, достигая дециметровых масштабов в верхней тропосфере. При работе в диапазоне частот 35 ГГц (длина волны 8.6 мм) получаем, что размер турбулентных вихрей не должен превышать 4 мм, а это значение находится на нижней границе применимости теории турбулентного рассеяния для тропосферы. В таких граничных условиях применение классических формул может приводить к ошибкам, поскольку в игру могут включаться и другие механизмы рассеяния. Для изучения этой весьма актуальной проблемы необходимы специальные комплексные исследования, накопление статистического материала и его внимательный анализ. В данной работе представлены экспериментальные результаты измерений радиолокаци-

онных отражений от чистой атмосферы, полученные с помощью доплеровской радиолокационной станции (РЛС) диапазона 35 ГГц. Проведен анализ уровня радиолокационной отражаемости и статистических свойств сигналов, однако комплексные исследования не проводились. Следует отметить, что использование миллиметрового диапазона длин волн в метеорологических целях получило широкое применение лишь в последние 10–15 лет [9, 10]. В России исследования по использованию миллиметрового диапазона для создания ветрового радиолокатора начались раньше, чем за рубежом. В начале 2000 годов в МГУПИ (ныне – РТУ МИРЭА) была проведена научно-исследовательская работа “Механизм”. В 2004 г. в Центральном конструкторском бюро аппаратуры (ЦКБА) г. Тула был создан первый макет 35 ГГц малогабаритного радиолокационного комплекса ветрового зондирования [11, 12]. Уже первые натурные измерения показали, что диапазон метеорологических условий, при которых возможно его применение, оказался намного шире, чем предсказывали теоретические оценки и опыт применения более длинноволновых РЛС. Радиолокационные сигналы формировались в слое 300...500 м почти в 80% случаев, в том числе в ясную погоду. Кроме того, потенциал радиолокатора позволял получать сигналы практически от всех видов облаков, что наряду с приземными данными позволяло проводить восстановление ветрового профиля снизу до верхней границы облачности. Если учесть, что в средней полосе России облачность наблюдается более чем в 70% случаев, оказалось, что созданный радиолокатор является эффективным средством ветрового зондирования тропосферы.

## 1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Детальное описание технических характеристик радиолокатора, который имеет рабочее название беззондовый определитель профилей ветра (БОПВ) приведено в работах [12–14]. Здесь кратко опишем только ту часть, которая касается оценки метеорологического потенциала РЛС и методики измерения радиолокационной отражаемости метеорологических объектов.

Режим зондирования заключается в проведении азимутального разреза под постоянным углом места  $\beta = 45^\circ$ , при 12-ти дискретных значениях угла азимута  $\alpha_i = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 270^\circ$ . Импульсная мощность излучаемая в пространство составляла  $P_{\text{имп}} = 3.5$  кВт, длительность зондирующих импульсов  $\tau = 0.4$  мкс (разрешение по дальности 60 м, а по высоте 42.6 м), частота повторения могла переключаться на  $f_{\text{повт1}} = 12.5$  кГц или  $f_{\text{повт2}} = 25$  кГц. В каждом из 12 направлений зондирования накопление сигнала происходило в течение 6 с, что

позволяло анализировать либо 75000, либо 150000 импульсов на каждой дискретной высоте  $H_j$ , где  $j = 1 \dots 200$  или  $j = 1 \dots 100$ . Учитывая, что ширина распределения по проекциям скоростей  $\Delta v$  в зондируемом объеме почти всегда превышает 0.4...0.5 м/с, ширина доплеровских спектров будет равна

$$\Delta f_d = \frac{2\Delta v}{\lambda} \geq 100 \text{ Гц.}$$

Следовательно, оптимальная длительность одной реализации при быстром преобразовании Фурье должна составить

$$\Delta \tau_{\text{опт}} = \frac{1}{\Delta f_d} = 0.01 \text{ с.}$$

С учетом двух возможных частот повторения импульсов это соответствует делению сигнала на реализации по  $M1 = 128$  или 256 отсчетов. Накопление сигналов в течение 1 с в каждом направлении зондирования обеспечит дальнейшее некогерентное накопление  $M2 = 6 \text{ с}/0.01 \text{ с} = 600$  спектров для каждого выделенного элемента объема пространства.

В соответствии с [7] уравнение радиолокации для метеорологических радиолокаторов, имеющих параболическую антенну, можно представить в следующем виде:

$$P_r = \frac{0.28\lambda^2 P_t G^2 h \theta^2 k_1 k_2 \eta k k_3}{(4\pi)^3 R^2} = \Pi \frac{\eta k k_3}{R^2}. \quad (1)$$

Здесь  $P_r$  – мощность принимаемого сигнала;  $P_t$  – мощность излучаемого импульса;  $G$  – коэффициент усиления приемо-передающей антенны;  $h = c\tau_{\text{имп}}$  – протяженность облучаемого объема;  $\theta$  – ширина диаграммы направленности антенны;  $\eta$  – удельная радиолокационная отражаемость единицы объема;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, учитывающие потери в трактах РЛС и ее неоптимальный режим приема, соответственно;  $k$  – коэффициент, учитывающий ослабление сигнала при двукратном прохождении атмосферы;  $k_3$  – учитывает степень заполнения рассеивающего объема;  $R$  – дальность объема рассеяния. Все параметры, характеризующие радиолокатор, принято объединять в константу  $\Pi$ , которую называют метеорологическим потенциалом РЛС. Учитывая эффективную площадь апертуры антенны  $A_r = 0.95 \text{ м}^2$ , получим коэффициент усиления антенны, равный

$$G = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} = 1.6 \times 10^4.$$

Для созданной версии радиолокатора БОПВ необходимо учесть уровень потерь в трактах  $k_1 = 0.5$  и возможную неоптимальность режима обработки сигналов  $k_2 = 0.4$ . В результате получаем, что метеорологический потенциал созданного радиолокатора составляет  $\Pi = 1.4 \times 10^3 \text{ м}^3 \text{ Вт}$ .

Для определения обнаружительных способностей созданной РЛС необходимо вычислить уровень минимально обнаружимого сигнала  $P_{\min}$ , который зависит от характеристик приемника и времени накопления сигнала. Мощность шумов на выходе приемной системы можно оценить соотношением:  $P_n = k T_0 F_n B_n$ . Шум-фактор приемной системы равен  $F_n = 4.0$ ,  $T_0 = 290$  К, а оптимальная ширина полосы приемника –  $B_n = 1/\tau_{\text{имп}} = 2.5 \times 10^6$  1/с. Оптимальный режим обработки означает когерентное накопление сигнала в пределах времени когерентности сигнала, т.е. за время  $\Delta\tau_{\text{ког}} = 1/\Delta f_d = 0.01$  с. Это соответствует временной длительности одной реализации. При частоте повторения 25 кГц в одной реализации будет  $M_1 = 256$  импульсов, тогда с учетом квадратурного анализа получим столько же точек доплеровского спектра. При этом вся мощность шумов распределяется на  $M_1$  точек спектра, что приводит к уменьшению мощности шумов, приходящихся на элемент разрешения доплеровского спектра в  $M_1$  раз (с данного момента переходим на терминологию спектральной плотности – мощности, отнесенной на шаг доплеровского разрешения). Отметим, что вся мощность сигнала при этом регистрируется на одном элементе доплеровского спектра. Некогерентное накопление доплеровских спектров в течение 6 с позволило некогерентно накапливать  $M_2 = 6 \text{ с} / 0.01 \text{ с} = 600$  спектров, что дает выигрыш в отношении сигнал/шум (С/Ш) в  $\sqrt{M_2}$  раз. Опыт обработки доплеровских спектров показывает, что для распознавания сигнала достаточно, чтобы отношение С/Ш в спектре составляло С/Ш = 3. В результате нетрудно рассчитать мощность минимально обнаруживаемого сигнала, приходящегося на минимальный интервал частот доплеровского спектра:

$$P_{\min} = P_n (\text{С/Ш}) \frac{1}{M_1 \sqrt{M_2}} = 1.95 \times 10^{-17} \text{ Вт.} \quad (2)$$

Если воспользоваться определением потенциала (1), то нетрудно рассчитать минимальное значение удельной радиолокационной отражаемости, которую ветровой радиолокатор может зарегистрировать на высоте  $h = 1000$  м (дальности  $R = 1410$  м).

$$\eta_{\min} = \frac{P_{\min} R^2}{\Pi} = 2.8 \times 10^{-14} \text{ м}^{-1}. \quad (3)$$

Данную величину можно пересчитать на эквивалентную радиолокационную отражаемость  $Z$ , предполагая, что сигнал формируется каплей воды [7]:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 \beta Z, \quad (4)$$

где  $|K_w|^2 = 0.8 - 0.95$  для водяных капель,  $\beta = 10^{-18}$  учитывает переход размерностей в величине  $Z$

к  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ . Для нашей системы, учитывая  $\lambda = 8.6 \times 10^{-3}$  м, получим

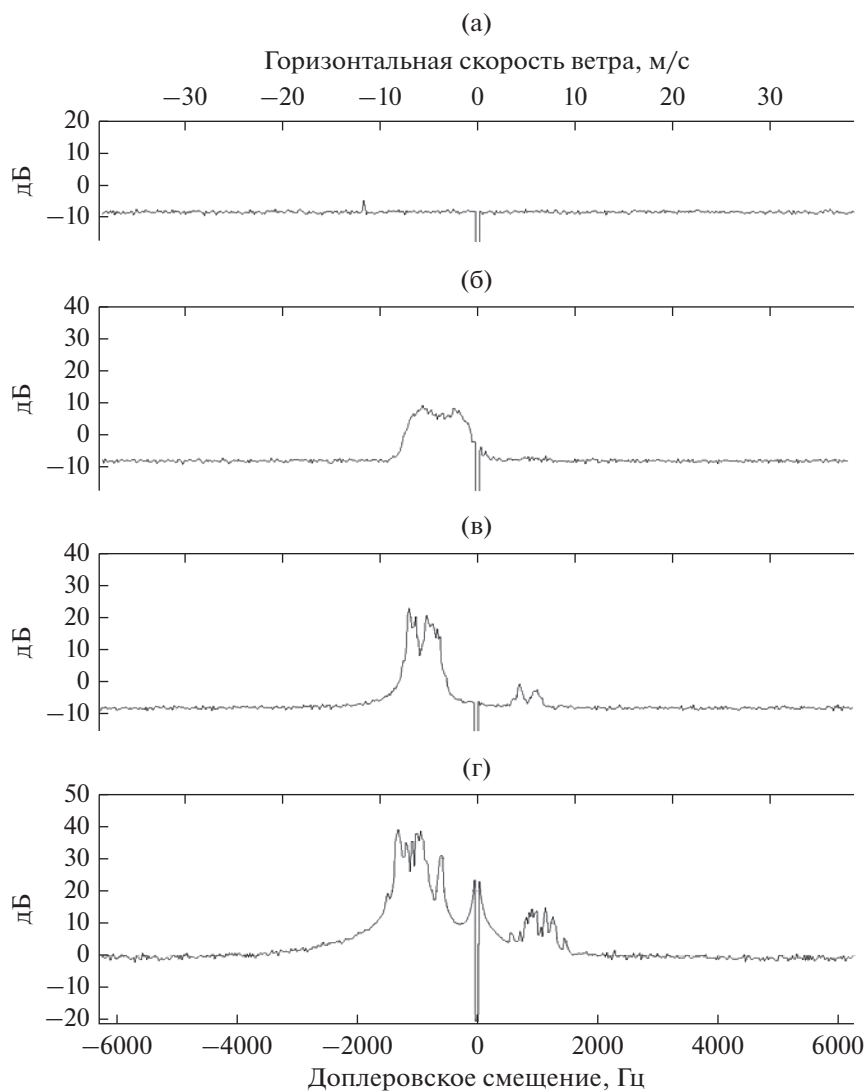
$$\eta (\text{м}^{-1}) = 5.6 \times 10^{-8} Z \left( \frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3} \right). \quad (5)$$

Таким образом, на основе представленных данных получилось, что теоретическое значение метеорологического потенциала радиолокатора таково, что позволяет на высоте 1 км регистрировать сигнал от объектов с удельной радиолокационной отражаемостью  $\eta = 2.8 \times 10^{-14} \text{ м}^{-1}$  или  $Z_{\min} (h = 1 \text{ км}) = -63$  дБZ.

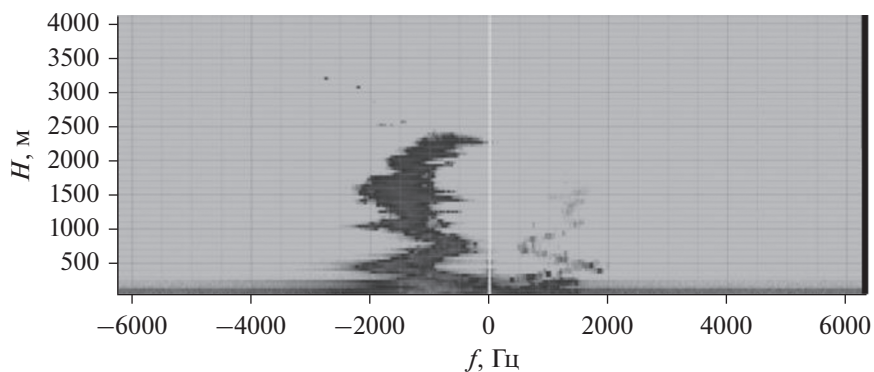
Теоретическая оценка метеорологического потенциала ветрового радиолокатора была подтверждена комплексными радиолокационно радиометрическими измерениями облаков [15]. Физической основой таких измерений явился тот факт, что по радиометрическому контрасту, который возникает между безоблачным участком неба и участком с облаком хорошей погоды “Cumulus Humilis” можно оценить водность облака. При этом радиолокационная отражаемость, получаемая РЛС, работающей на той же длине волны, в свою очередь связана с водностью облака [7]. В результате по совместным измерениям контрастов отражаемости и радиометрическому контрасту, который создается облаком, удается оценить потенциал радиолокатора [15]. Результаты комплексных измерений позволили оценить минимальное значение эффективной радиолокационной отражаемости, которую РЛС может регистрировать на высоте 1 км величиной  $Z_{\min} (h = 1 \text{ км}) = (-58 \pm 5)$  дБZ. По сравнению с теоретической оценкой на основе параметров РЛС полученное значение отличается на 4 дБ. Среднее значение между теоретическим расчетом и экспериментальной оценкой мы и примем за истинное значение  $Z_{\min} (h = 1 \text{ км}) = (-60 \pm 5)$  дБZ.

Далее рассмотрим методику измерений вертикального профиля эффективной радиолокационной отражаемости. На рис. 1 приведены примеры доплеровских спектров при измерениях в условиях ясного неба вблизи космодрома Байконур 01.07.2017, 16.05 мск. Спектральная плотность представлена в относительных единицах в логарифмическом масштабе.

На рис. 2 представлена спектрограмма, полученная для выбранного направления зондирования, которая объединяет все доплеровские спектры в одну наглядную картину. При этом каждая строка спектрограммы представляет собой спектр на соответствующей высоте, а спектральная плотность мощности изображена плотностью затемнения. Следует отметить, что в данном примере ширина спектров, полученных в условиях ясного неба до высоты 2200 м, иногда доходит до 3...4 м/с, что



**Рис. 1.** Типичная форма доплеровских спектров, полученных в условиях ясного неба на космодроме Байконур (01.07.2017 в 16.05 мск) на высотах 3742 (а), 2257 (б), 857 (в) и 51 м (г).



**Рис. 2.** Спектрограмма, каждая строка которой является доплеровским спектром на заданной высоте.

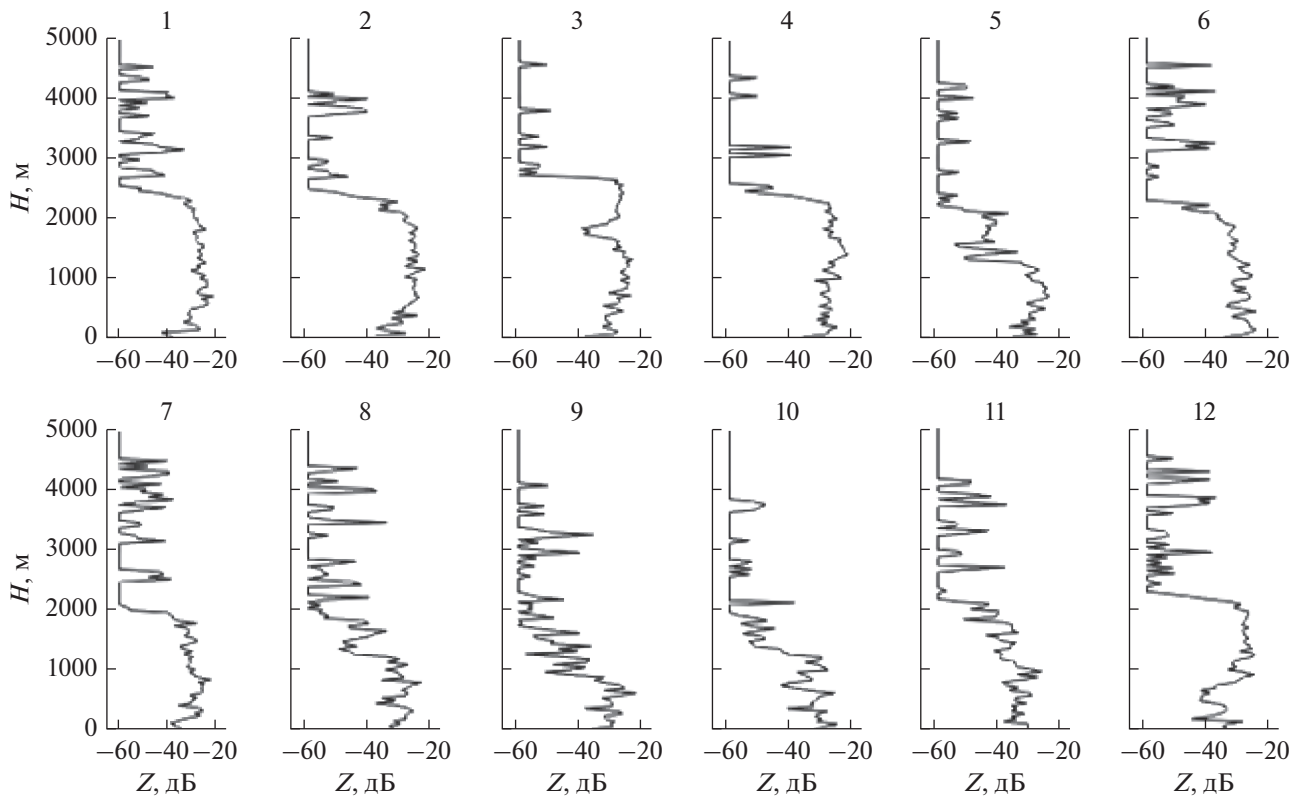


Рис. 3. Зависимости радиолокационной отражаемости ясного неба от высоты для 12 различных азимутальных направлений зондирования, полученные на космодроме Байконур 01.07.17 в 16:04 мск.

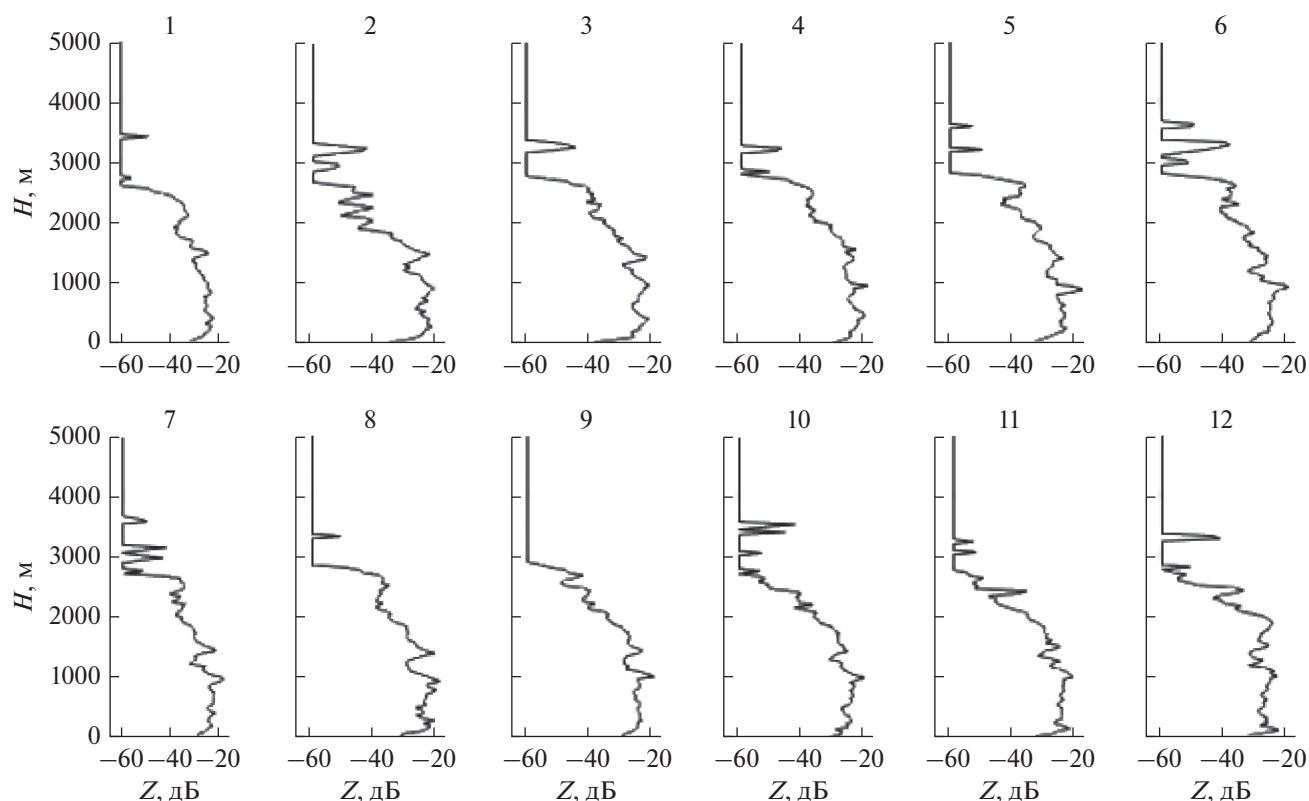
больше, чем это обычно бывает в случае облаков или осадков.

На спектрах, представленных в логарифмическом масштабе, при высоких уровнях сигналов видна симметричная часть спектра, которая на 25 дБ ниже истинного сигнала. Это связано с неполным подавлением сигнала при квадратурной обработке. Следует отметить, что уровень шумовой дорожки зависит от дальности и в меньшей степени от направления зондирования. На самых нижних высотах этот уровень возрастает на 6...8 дБ по сравнению с высотами, большими 250 м. По-видимому, это связано с отражениями от местных предметов, попадающих в боковые лепестки антенны. По этой причине уровень полезного сигнала мы также отсчитывали от среднего уровня шума на участках спектров, удаленных от области возможных сигналов. Примерно такую же методику оценки уровня шумов применяли в работе [16]. Одновременно на этих же участках вычисляли среднеквадратичную спектральную плотность шума  $\sigma_{ш}$ . Мощность радиолокационного сигнала рассчитана в относительных единицах как интеграл от доплеровского спектра, который превышает средний уровень шумов плюс  $3\sigma_{ш}$ . Шумы при такой обработке в расчет уровня сигнала не попадали. Однако увеличение уровня шумов не приводит к

изменению мощности сигнала, поэтому простое вычитание шумовой дорожки и интегрирование оставшегося спектра приведет к недооценке сигнала. В связи с этим при расчетах мощность сигнала корректировалась на разницу, возникшую за счет подъема уровня шума. Для перевода мощности сигнала в радиолокационную отражаемость умножали на квадрат высоты. Полученная в результате радиолокационная отражаемость, выраженная в относительных единицах, нормировалась на потенциал радиолокатора так, чтобы на дальности 1 км минимальный уровень сигнала составлял  $-60$  дБZ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ОТРАЖАЕМОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕРОВ ЯСНОГО НЕБА

Рассмотрим примеры измерений, проведенных в условиях ясного неба в летние месяцы года. На рис. 3 в логарифмическом масштабе представлены зависимости радиолокационной отражаемости от высоты для десяти различных направлений, полученных вблизи космодрома Байконур 01.07.2017 в 16.04 мск. Температура у поверхности составляла  $26^{\circ}\text{C}$ . Аналогичные измерения получены в окрестности Тулы 16.06.16 в 12:51 мск (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимости радиолокационной отражаемости ясного неба от высоты для 12 различных азимутальных направлений зондирования, полученные 16.06.16 в 12:51 мск (Тула).

Температура у земли составляла  $28^{\circ}\text{C}$ . На графиках заметна общая недооценка отражаемости в слое 50...250 м, что, по-видимому, связано с ростом уровня шумовой дорожки в данном интервале высот. Общим свойством для тех и других измерений являются: во-первых, высокий средний уровень радиолокационной отражаемости  $Z = -30...-20$  дБZ до высоты 2000...2200 м, а во-вторых, однородность радиолокационной отражаемости в этом диапазоне высот. Так, на рис. 3 в семи направлениях из 12, а на рис. 4 во всех 12 направлениях в диапазоне высот 500...2000 м радиолокационная отражаемость держится в очень узком интервале  $(-35 \pm 5)$  дБZ.

Следует отметить стабильное в пространстве и времени весьма высокое значение радиолокационной отражаемости, которое близко к отражаемости облачности.

### *2.1. Интерпретация результатов и анализ возможных источников отражений от ясного неба*

Отражения от чистого безоблачного неба традиционно делят по видам источников отражений. Показано, что отражения могут формироваться птицами, насекомыми, семенами растений, увле-

ченных воздушными потоками, аэрозолями, а также флуктуациями показателя преломления воздуха [1–7]. Отражения от семян и крупных аэрозолей в среднем подчиняется распределению Больцмана по высоте и даже при наличии вертикальных потоков должно экспоненциально снижаться с высотой. Этого в наших примерах не происходит. Следовательно, такую причину формирования сигналов следует отбросить.

Особенность отражений от птиц и насекомых заключается в том, что отражения являются точечными и не заполняют всю область зондирования, а отмечаются на определенных дальностях и в определенных направлениях. В наших примерах отражения имеют объемный характер и равномерно заполняют весь слой до высоты 2000 м. Поэтому естественным предположением является интерпретация сигналов как отражения от флуктуаций показателя преломления. Теория таких отражений в микроволновом диапазоне длин волн была разработана В.И. Татарским в его фундаментальной работе [17]. В ней показано, что турбулентные флуктуации показателя преломления (в рамках инерционного интервала турбулентности) формируют в пространстве множество периодических структур различного масштаба. Микроволны испытывают обратное рассеяние брегговского типа

на периодических неоднородностях показателя преломления, размер которых вдвое меньше длины волны. Получено соотношение для расчета удельной площади рассеяния (удельной отражаемости) развитой турбулентности [7, 17]:

$$\eta = 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3}, \quad (6)$$

где  $\eta$  выражена в  $m^{-1}$ ,  $C_n^2$  является мерой интенсивности флуктуаций показателя преломления и имеет размерность  $m^{-2/3}$ , а  $\lambda$  — длина волны, в м.

В работе [17] приведено множество экспериментальных данных, которые подтверждают развитую теорию в приложении к длинам волн 3 см и выше. Собранный экспериментальный материал [17, с. 434] показал, что  $C_n^2$  может изменяться в диапазоне от  $C_n^2 = 2 \times 10^{-14} \dots 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$  до  $4.3 \times 10^{-13} \dots 2.1 \times 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ . Данные, полученные в течение года на РЛС диапазона 10 см [18], показывают максимальные значения  $C_n^2$  на порядок меньше. Возьмем максимальное значение  $C_n^2 = 4.3 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  и по соотношению (6) получим максимальное теоретическое значение удельной отражаемости для длины волны  $\lambda = 8.6 \text{ мм}$ :

$$\eta_{\max} = 8.0 \times 10^{-13} \text{ м}^{-1}. \quad (7)$$

Если по формуле (5) перевести это значение в эффективную радиолокационную отражаемость  $Z$ , то получим

$$Z_{\max} = 1.4 \times 10^{-5} \frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3} = -49 \text{ дБЗ}.$$

Очевидно, что в рассматриваемых случаях, при слабом ветре ( $V < 10 \text{ м/с}$ ), интенсивность турбулентности не должна принимать экстремальные высокие значения и радиолокационная отражаемость, формируемая турбулентными пульсациями должна быть в несколько раз меньше, на уровне  $-55 \dots -65 \text{ дБЗ}$ . Эти значения находятся на границе чувствительности радиолокатора и почти не должны им регистрироваться. Тем не менее в рассматриваемых случаях в слое до 2 км мы регистрируем  $Z$  на уровне  $-35 \pm 5 \text{ дБЗ}$ . Эти значения на  $15 \dots 20 \text{ дБ}$  превышают теоретические оценки! Такое расхождение трудно списать на погрешности оценки потенциала радиолокатора, поскольку наш РЛС регистрирует все виды облаков до 12 км, что невозможно для низкопотенциальных РЛС. Аналогичный потенциал демонстрируют и зарубежные РЛС миллиметрового диапазона [19, 20].

Рассмотрим более подробно версию, которая в принципе может объяснить отмеченное расхождение. Это отражения от мелких насекомых, сечение рассеяния у которых вполне укладывается в наблюдаемые значения. Однако статистические

свойства наблюдаемых сигналов таковы, что версия насекомых не является состоятельной [21]. Из рис. 3 и 4 следует, что распределение отражаемости почти однородно во всех элементах разрешения радиолокатора до высоты 1600...2000 м. В этом случае такие статистические свойства сигнала невозможно объяснить только лишь появлением насекомых в объеме зондирования. Дело в том, что распределение насекомых в пространстве не может быть однородным, при условии, что всего несколько особей попадает в зондирующий объем. Обязательно, вследствие случайного распределения и стайного поведения насекомых, в каких-то объемах будет большое число насекомых, а в каких-то их не будет вовсе. Соответственно, интенсивность радиолокационного сигнала будет сильно флуктуировать от фоновых значений, определяемых отражениями от флуктуаций показателя преломления, до весьма значительных, определяемых наличием насекомых. В наших измерениях во всей области от 50 до 1600 м (с шагом 40 м) и во всех 12 направлениях зондирования радиолокационная отражаемость не опускалась ниже  $-32 \text{ дБ}$ . Трудно предположить, что в течение всего дня во всем слое до 1600...2000 м постоянно и равномерно присутствуют насекомые. Статистически это невозможно.

Подтверждением этого вывода являются результаты компьютерного моделирования. Все пространство до 1600 м высоты было разделено на  $(1600/40 \text{ м})12 = 480$  элементов объема в соответствии с проводимыми радиолокационными измерениями. При этом предполагалось, что в этом пространстве присутствует  $N = 480n$  одинаковых по размеру насекомых, в среднем по  $n$  особей в одном элементе объема.

Рассмотрим “идеализированный” случай, не учитывающий стайное поведение насекомых и их неоднородное распределение у земли, и предположим, что распределение насекомых по элементам объема равновероятно. Какова будет статистика их распределения по всем элементам?

На рис. 5 представлены гистограммы распределений насекомых по элементам объема для случая  $N = 480 \times 3 = 1440$  и  $N = 480 \times 4 = 1920$ . Из диаграмм видно, что даже при равномерном распределении вероятностей часть элементов объема окажется без насекомых (десятки элементов объема). Учитывая стайное поведение насекомых и их неравномерное распределение у поверхности земли, в реальности количество элементов объема без насекомых должно быть еще больше. Таким образом, если бы радиолокационный сигнал формировался бы в первую очередь насекомыми, то радиолокационная отражаемость сильно флуктуировала и в свободных от насекомых элементах

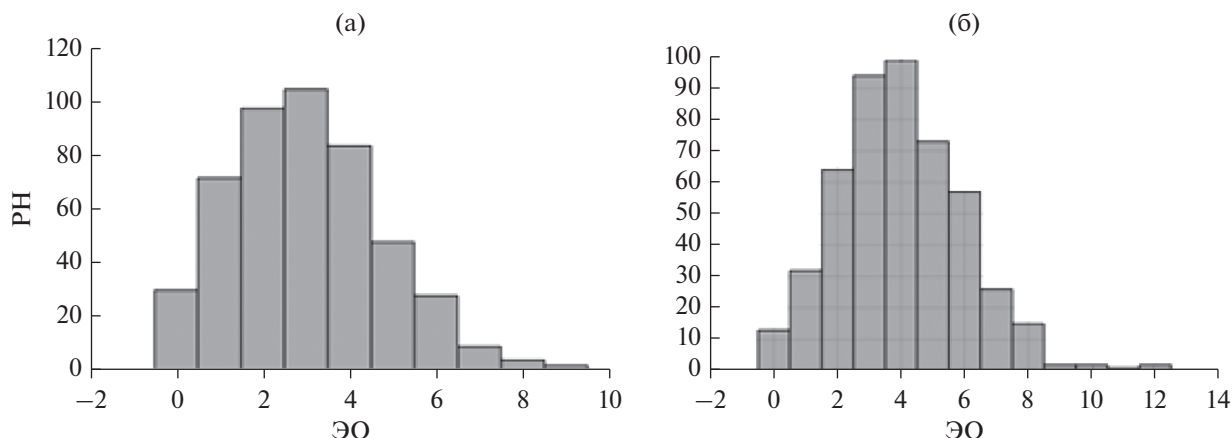


Рис. 5. Распределение насекомых (РН) по элементам объема (ЭО) при  $N = 1440$  (а) и  $N = 1920$  особей (б) в 480 элементах объема. В каждом случае есть элементы объема без насекомых.

объема падала до  $Z = -55$  дБЗ. Этого в наших измерениях не наблюдалось, следовательно, фоновый континуальный сигнал на уровне  $-32...-25$  дБЗ формировался от флуктуаций показателя преломления. Такие уровни радиолокационной отражаемости на  $15...20$  дБ превышают максимальные значения, которые дает теория Брэгга для турбулентных флуктуаций.

В данной работе мы лишь фиксируем факты и не можем объяснить причины столь большого расхождения экспериментальных данных с теорией. Для понимания физики таких результатов, по-видимому, потребуется постановка и проведение комплексных исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрен опыт 20-летних радиолокационных измерений ветрового поля с помощью 35 ГГц ветрового профилимера. Обоснован метеорологический потенциал созданного радиолокатора, который позволяет регистрировать на высоте 1 км радиолокационные отражения от метеорологических объектов с радиолокационной отражаемостью  $Z = -60$  дБЗ. Особое внимание уделено отражениям в условиях ясной атмосферы. Показано, что в ряде случаев наблюдаемые значения радиолокационной отражаемости от ясного неба невозможно объяснить существующей турбулентной теорией отражений от флуктуаций показателя преломления. Расхождение достигает  $15...20$  дБ. Сложившаяся ситуация вполне предсказуема. Миллиметровый диапазон длин волн лежит на границе применимости теории турбулентности. В таких случаях на первый план, как правило, выдвигаются другие механизмы формирования сигналов, которые в настоящее время пока не известны. Вероятное объяснение высо-

кого уровня радиолокационной отражаемости при натуральных измерениях может заключаться в структуре термиксов, которые образуются за счет неравномерного прогрева поверхности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик А.Г., Костарев В.В. // ДАН СССР. 1959. Т. 125. № 1. С. 59.
2. Atlas D. // J. Atmospheric and Terrestrial Phys. 1959. V. 15. № 3–4. P. 262.
3. Atlas D. // J. Meteorology. 1959. V. 16. № 1. P. 6. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1959\)016<0006:ME>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1959)016<0006:ME>2.0.CO;2)
4. Черников А. А. // Труды ЦАО. 1961. Вып. 36. С. 126.
5. Черников А.А. Радиолокационные отражения от ясного неба. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
6. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1967.
7. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
8. Горелик А.Г., Князев Л.В., Углова Л.Н. // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 2. С. 145.
9. Kollias P., Clothiaux E.E., Miller M.A. et al. // Bull. Amer. Meteorological Soc. 2007. V. 88. № 10. P. 1608. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-10-1608>
10. Görsdorf U., Lehmann V., Bauer-Pfundstein M. et al. // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. V. 32. № 4. P. 675. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00066.1>
11. Кононов М.А. Малогабаритная доплеровская РЛС, обеспечивающая ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2010. 178 с.
12. Стерлядкин В.В., Кононов М.А. // Научн. вестн. МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. 2010. № 158. С. 5259.
13. Sterlyadkin V.V., Gorelik A.G., Kulikovskii K.V. et al. // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp.—



- Spring. St. Petersburg. 22–25 May, 2017. N.Y.: IEEE. 2017. P. 897.
14. *Стерлядкин В.В., Кононов М.А., Быковский С.С.* // Научн. вестн. МГТУ ГА. Сер. Радиотехника. 2012. № 176. С. 31.
  15. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* // Сб. научн. тр. МНТК “Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике”, 06–07 апр. 2017 г. М.: МТУ–МИРЭА, С. 633
  16. *Hildebrand P.H., Sekhon R.S.* // J. Appl. Meteorology and Climatology. 1974. V. 13. № 7. P. 808.
  17. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
  18. Radar in Meteorology/ Ed. by D. Atlas. Boston: Amer. Meteorological. Soc., 1990.
  19. *Kollias P., Ieng Jo, Borque P. et al.* // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. V. 31. № 3. P. 583. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00045.1>
  20. *Luke E.P., Kollias P., Johnson K. L., Clothiaux E.E.* // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2008. V. 25. № 9. P. 1498. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA953.1>
  21. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Калмыков В.М., Ермилов Д.В.* // Рос. Технол. Журн. 2018. Т. 6. № 6. С. 28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40>