

УДК 551.501.8

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЭХА НА РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТАХ ПРИ ВЕТРОВОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

А.Г. ГОРЕЛИК, С.Ф. КОЛОМИЕЦ

Обобщен опыт использования в оперативной метеорологической практике ветровых профайлеров для определения параметров ветра в диапазоне высот от поверхности земли до 20-25 километров. Представлен анализ источников радиоэха при различных состояниях атмосферы и на различных высотах. Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2010-2013 годы».

Ключевые слова: флуктуации интенсивности радиоэха, метеорологические РЛС, обработка радиолокационного сигнала.

С конца 50-х и первой половины 60-х годов берет начало разработка доплеровских радиолокационных систем, предназначенных для определения скорости и направления ветра в нижних слоях атмосферы. Для таких систем носителем информации о ветре в осадках являются капли дождя, снежинки, а в безоблачной атмосфере диэлектрические неоднородности воздуха, а также семена растений, мелкие насекомые, «крупные» аэрозольные частицы, которые присутствуют в атмосфере и хорошо увлекаются воздушным потоком [1, 3, 7].

Первые радиолокационные ветровые системы были построены на базе модернизированных импульсно-когерентных станций [2, 3, 6].

С развитием электроники и вычислительной техники удастся существенно расширить арсенал радиолокационных станций, которые можно использовать для решения задач ветрового зондирования. То, что 20 лет назад казалось практически не выполнимым, сегодня становится реальным. Настало время применения новых радиолокационных средств и методов, позволяющих усовершенствовать методики измерений и автоматизировать процесс измерения ветра и обработку большого объема получаемой информации в реальном масштабе времени.

Использование для ветрового зондирования длинноволновой доплеровской радиолокации, а в последние годы локаторов, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, требует детального исследования комплекса проблем, связанных с их работой в реальной атмосфере при различных метеоусловиях.

Основное соотношение, связывающее величину доплеровского сдвига частоты, направление зондирования и длину волны, на которой работает радиолокатор с параметрами, характеризующими воздушный поток в некотором малом объеме пространства, находящегося на высоте H , принимает следующий вид

$$\overline{F_d} = \frac{2}{\lambda} [V_r(x, y, H, t) \cos(\alpha_z - \alpha_0[x, y, H, t]) \cos \beta \pm V_b(x, y, H, t) \sin \beta], \quad (1)$$

где V_r - горизонтальная составляющая ветра; V_b - величина вертикальной скорости движения рассеивателя, x, y - координаты рассеивающего объема на высоте H ; α_z, β - углы зондирования в азимутальной и угломестной плоскости, α_0 - направление ветра на высоте H .

Уравнение (1) справедливо для импульсного радиолокатора, имеющего игольчатую диаграмму направленности, «точечный» рассеивающий объем и длительность зондирующего импульса τ , близкую к нулю. В общем случае, если диаграмма направленности имеет конечную ширину $\Delta\theta$, пространственную протяженность зондирующего импульса $h = c\tau/2$. Под V_r и V_b следует понимать значения скорости вертикальных потоков и гравитационного падения, усредненные по рассеивающему объему.

Проблемы выбора оптимальных углов направления зондирования детально исследованы в [6] и положены в основу метода доплеровской томографии [4]. Этот метод, обеспечивающий «восстановление» ветрового поля по данным доплеровских измерений, выполненных при различных углах визирования α_z и β . В упрощенном виде он используется практически во всех ветровых профайлерах, работающих в различных диапазонах длин волн [3, 5, 6].

подавляющее большинство метеорообразований: облака, осадки и т.д. представляют собой объемную множественную цель. Поэтому, для того чтобы охарактеризовать отражающие свойства метеорообъекта, пользуются не величиной эффективного поперечника рассеяния (ЭПР) σ , а величиной удельного поперечника рассеяния η (радиолокационной отражаемостью единицы объема V).

В радиолокационной метеорологии используются и другие величины, которые являются эквивалентными характеристиками “множественной” цели: радиолокационная отражаемость Z мм⁶/м³ для гидрометеоров, а для “чистой” турбулизированной атмосферы – величина C_n^2 м^{-2/3}.

Если обозначить все технические параметры радиолокационной системы, влияющие на величину регистрируемого сигнала, как A^* , то основное уравнение метеорологической радиолокации, связывающее уровень принятого сигнала $\bar{P}_{omp}(R)$ с η с дистанцией зондирования R , примет вид

$$\bar{P}_{omp}(R) = A^* \frac{P_0}{R^2} \eta \exp\left(-\int_0^R \alpha(R) dR\right), \quad (2)$$

где R – дистанция между радиолокатором и рассеивающим объемом; P_0 – мощность излученного сигнала; α – ослабление на трассе; η – удельная радиолокационная отражаемость, которая соотносится с C_n^2 , как $\eta = 0.38 C_n^2$.

Обратим внимание на то, что уравнение (2) справедливо только в том случае, когда весь облучаемый рассеивающий объем полностью заполнен рассеивающими неоднородностями. Однако такая модель кажется достаточно простой и надо иметь в виду, что рассеивающий объем может быть лишь частично заполнен отражателями. В таких случаях зависимость от R будет иная. Показатель степени при R будет увеличиваться по мере уменьшения заполнения рассеивающего объема и в предельном случае (одна неоднородность) может достигать значения четыре. Это приведет к тому, что требуемый энергетический потенциал ветрового про-

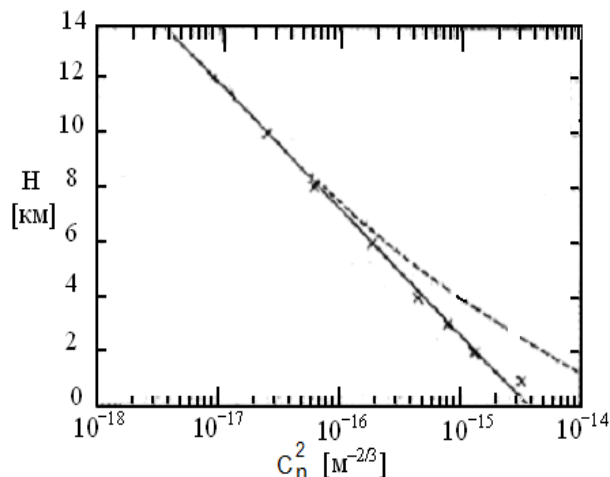


Рис. 1. Изменения с высотой средних значений C_n^2

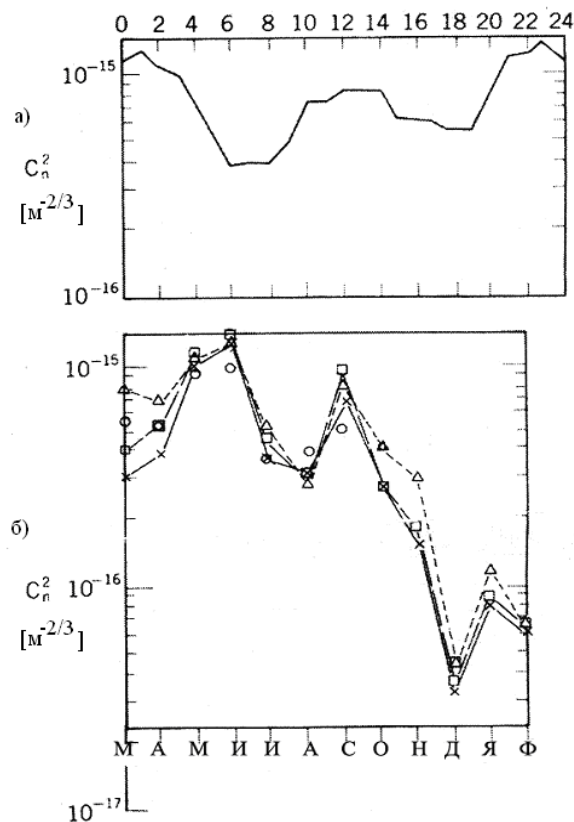


Рис. 2. Экспериментальные о суточных и годичных вариациях C_n^2

файлера должен быть значительно выше. Он будет зависеть от расстояния до цели и структуры её отражающих свойств.

Изменения C_n^2 с высотой, полученные различными авторами [5, 10], представлены на рис. 1. Анализ данных, приведенных в различных источниках, указывает на то, что C_n^2 зависит от погодных условий, сезона года и высоты. Для слабой турбулентности значения C_n^2 меняются от 10^{-17} до $10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$, для средней турбулентности – $C_n^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, а для интенсивной турбулентности C_n^2 изменяется от 10^{-14} до $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$.

Удельная радиолокационная отражаемость η , обусловленная флуктуациями показателя преломления, связанной с турбулентностью, незначительно зависит от длины волны зондирования – λ .

Проблемы применения доплеровских радиолокаторов, возникающие при создании и эксплуатации всепогодных систем ветрового зондирования, связаны с тем, что величина отраженного сигнала незначительна в зимний сезон и на больших высотах (рис. 2, 4). Повышение высоты зондирования требует увеличения энергетического потенциала радиолокатора, его рабочей длины волны. Однако при увеличении длины волны усложняется приём сигналов. Это происходит вследствие того, что «ложные» сигналы, поступающие в приемный тракт радиолокатора, создают помехи. Измерения на «малых» высотах характеризуются помехами, борьба с которыми очень сложна, а в большинстве случаев, при измерениях на «длинных» волнах, вообще невозможна. Все авторы отмечают, что при применении длинноволновых радиолокаторов для определения параметров отражённого сигнала в нижних слоях атмосферы возникают специфические сложности, связанные с тем, что в пограничном слое происходят значительные вариации C_n^2 , что влияет на результаты интерпретации данных.

Поэтому в радиолокационные комплексы, составляющие систему ветровых измерений и работающие на высотах от поверхности Земли до 20-30 км, должны входить, по крайней мере, два или три типа радиолокаторов, работающих в различных диапазонах длин волн. При этом каждый из этих радиолокаторов будет перекрывать свой интервал высот.

Радиолокаторы, предназначенные для измерения параметров радиозха в пограничном слое атмосферы, могут работать в 8 мм или коротковолновой части сантиметрового диапазона [4, 8, 9]; для измерения ветра до высоты 8-10 км – в дециметровом диапазоне, а до высоты 20-25 км – в длинноволновой области дециметрового или метровом диапазоне [3, 5, 7].

В качестве параметра, который определяет информационные возможности радиолокатора,

обычно используется величина $\frac{\bar{P}_{\text{изл.}} A_{\text{эф.}}}{P_{\text{min}}}$, где

$\bar{P}_{\text{изл.}}$ – средняя излучаемая передатчиком

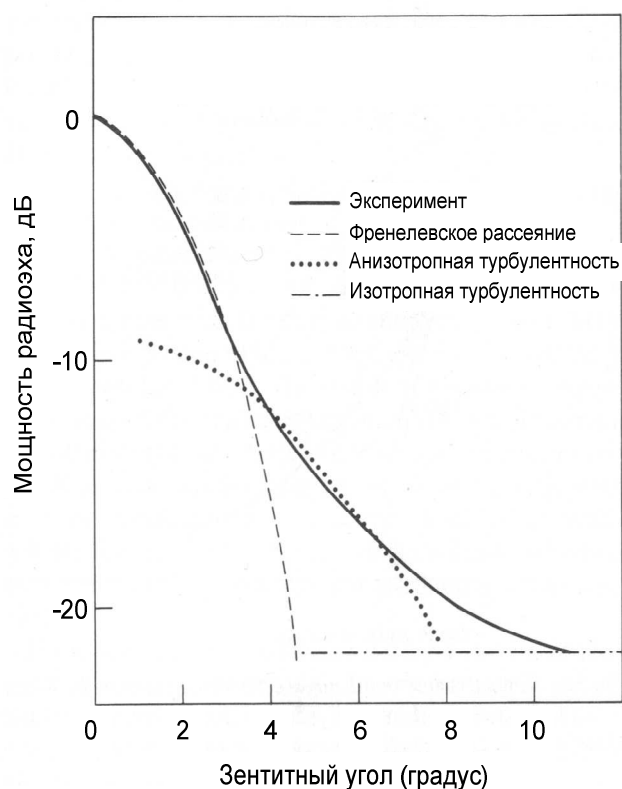


Рис. 3. Сравнение моделей формирования угломестной зависимости мощности радиозха

мощность на фиксированной частоте, $A_{\text{эф}}$ - эффективная площадь антенны, а \bar{P}_{min} - минимальный обнаружимый сигнал радиозеха, при котором радиолокатор способен выполнить свои измерительные функции.

Естественно в \bar{P}_{min} входят как шумовые параметры приёмного тракта, так и время, в течение которого происходит накопление сигнала. Время некогерентного накопления сигнала для радиолокаторов, обеспечивающих зондирование до высот 20-25 км и работающих в области частот 50 МГц достигает нескольких минут. В этом случае уровень сигнала радиозеха может быть почти на 20 дБ ниже уровня шума [3, 5] (рис. 3).

Радиолокаторы, которые используются в системах ветровых профайлеров, работают на частотах 45, 52, 290, 482, 915, 1290 МГц с длительностью зондирующих импульсов от 0,7 до 3,3 мкс [3, 5]. Площади антенн таких радиолокаторов могут составлять 10^4 - 10^5 квадратных метров, а средняя мощность передатчиков – нескольких киловатт.

Анализ материалов, полученных на различных длинах волн в условиях безоблачной атмосферы в дециметровом и метровом диапазонах однозначно указывают на то, что процессы формирования радиозеха на различных высотах различны, что существенно сказывается на угломестной зависимости мощности отраженного сигнала. Обсуждение экспериментальных данных об угломестной зависимости на разных высотах можно найти в [3, 5]. Кроме того, в этих работах представлены результаты сопоставления экспериментальных данных с расчетными в зависимости от угла визирования и высоты для различных моделей формирования отраженного сигнала.

В интервале высот от 7 до 25 км процесс формирования радиозеха претерпевает существенные изменения. Так же, как и предельно возможная высота получения рабочего уровня радиозеха, высота изменения модели формирования радиозеха зависит от частоты, на которой ведется зондирование. На частотах от 400 до 1200 МГц и на высотах от 5 до 10 км роль брэгговского рассеяния на атмосферных неоднородностях значительна. Если учесть уменьшение сигнала с высотой, то радиозехо, приходящее с высоты, например 8 км, во многих случаях практически не изменяется при наклоне антенны до 20-25 градусов от вертикали. Малые изменения уровня сигнала при наклоне антенны хорошо согласуются с предположением о том, что радиозехо на этих высотах обусловлено рассеянием на неоднородностях показателя преломления сравнительно небольшого размера (по сравнению с масштабом зондируемого объема). Внутренний масштаб интенсивной турбулентности на этих высотах составляет порядка 10 см, слабой турбулентности – порядка 30 см (рис. 4).

В метровом диапазоне и на высотах 12-20 км структура радиозеха другая. Это проявляется в том, что при отклонении направления зондирования от вертикали всего на 5-7 градусов уровень сигнала падает более чем на 20 дБ, что указывает на принципиально иной механизм формирования радиозеха с высоким влиянием отражений от слоёв с резким градиентом показателя преломления и характерной толщиной не более 3-5 м (рис. 4). Необходимость измерения параметров ветра при столь малом отклонении направления визирования от вертикали однозначно при-

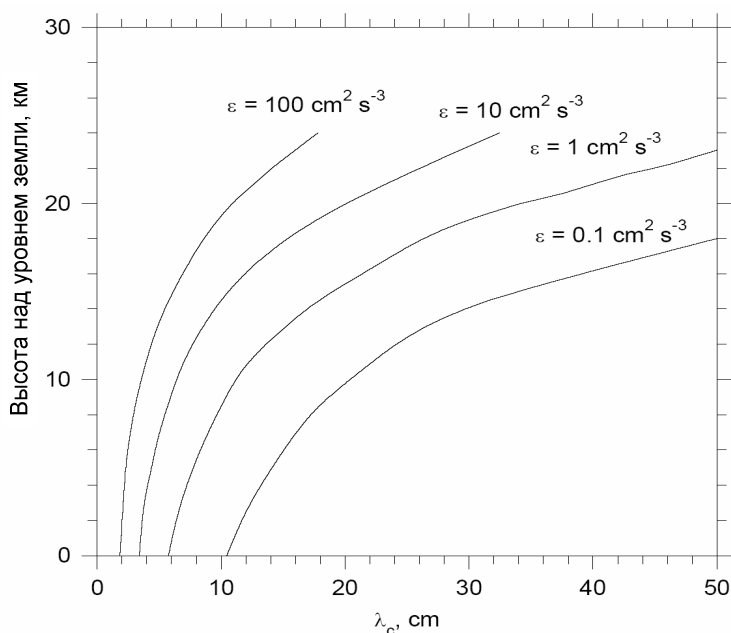


Рис. 4. Внутренний масштаб турбулентности по высоте

водит к снижению точности, необходимости увеличения времени накопления сигнала и сложности интерпретации результатов измерений. Поэтому одной из основных характеристик высотного ветрового радиолокатора является вероятность получения радиозха с предельных высот. Следует отметить, что помимо режимов работы радиолокатора (мощности передатчика, длительности импульса) эта вероятность зависит также и от места его установки (рис. 5).

Изменение структуры радиозха на различных высотах и в различные сезоны года требует применения сложной и согласованной по сети радиолокаторов системы выбраковки и обработки результатов измерений. Для того чтобы получить достоверные данные о ветровом поле на различных высотах, используется многоэтапная схема.

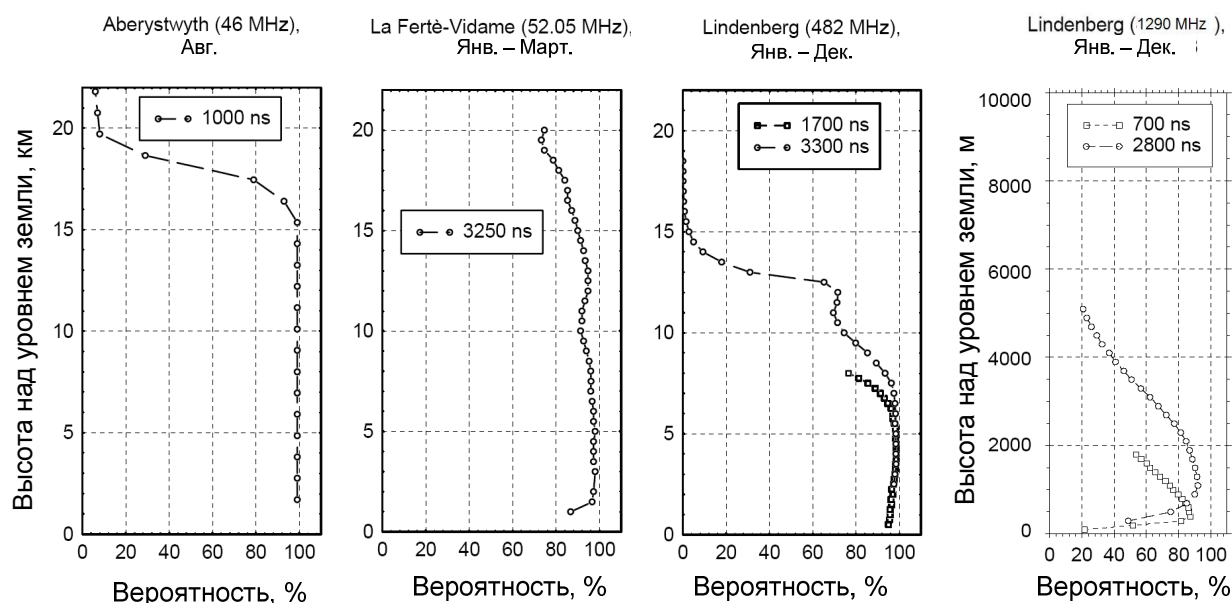


Рис. 5. Вероятность получения рабочего уровня эхосигнала по высотам для различных мест установки радиолокаторов, сезонов года, рабочих частот и длительности импульсов

На первом этапе проводится первичная обработка и анализ информации на пункте зондирования, в ходе которой исключаются высоты, на которых сигнал отсутствует или не достаточен для извлечения метеорологической информации. В отдельную группу заносятся те данные, которые при интерпретации могут вызывать сомнения и требуют дополнительного анализа. Отдельно анализируются измерения с аномально высоким уровнем отраженного сигнала или со специфическими спектральными особенностями, которые в большинстве случаев могут быть связаны со спецификой отражения от слоев. При френелевском рассеянии доплеровский сдвиг частоты и значительная амплитудная модуляция сигнала могут быть связаны с пространственно-временными изменениями формы границы отражающего слоя и не будут нести информацию о ветре.

На втором этапе осуществляется совместный анализ информации, полученной с 3-4 и более направлений зондирования. На этом этапе используются уравнения метода VAD (метод круговых диаграмм) [2, 3, 4, 5].

Информация о ветре, получаемая от всех доступных источников, должна поступать в единый Центр для окончательной обработки, сопоставления с данными радиозондирования и данными, получаемыми с космических спутников.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Friend A.W.** Theory and practice of troposphere sounding by radar. Proc. IEEE 37, 166-138, 1949.
2. **Горелик А.Г., Мельничук Ю.В., Черников А.А.** Связь статических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими процессами и микроструктурой метеорологических объектов // Труды ЦАО. - 1963. - Вып. 48. - С. 29-36.
3. **Atlas D.** Radar in Meteorology // Battan memorial and 40-th Anniversary Radar Meteorology conference Met. Soc. Boston. - 1990.
4. **Горелик А.Г., Стерлядкин В.В.** Доплеровская томография в метеорологии // Изв. АН СССР. ФАО. - 1990. - №1. - С. 47-54.
5. **Wind Profiler Assessment Report and Recommendations for future use**, NOAA. 1994.
6. **Горелик А.Г.** Доплеровская радиолокация в метеорологии. - М.: МГАПИ, 1996.
7. **Gossard E.E., Strauch R.G.** Radar Observation Clear Air and Clouds. Elsevier Amsterdam-Oxford-New York, 1983.
8. **Горелик А.Г., Черников А.А.** Некоторые результаты радиолокационного исследования структуры поля ветра на высотах 50-700 м. // Труды ЦАО. - 1964. - Вып. 57.
9. **Горелик А.Г., Пацаева В.А.** Измерение ветра в пограничном слое по радиолокационным отражениям от «ясного неба» // Метеорология и Гидрология. - 1967. - № 3.

SPECIFIC OF RADIOECHO FORMATION AT DIFFERENT
ALTITUDES OF WIND MEASUREMENT

Gorelik A.G., Kolomiets S.F.

The experience of using of wind profilers for the wind measurement within the range of altitudes from the Earth surface and up to 25 km high is summarized in the report. Different models of radio echo formation at different altitudes and dynamical conditions of the atmosphere are analyzed. The study was made as a part of federal program of the national science and education support for 2010-2013 years.

Key words: intensity fluctuation of radio echo, meteorology radars, radar signal processing.

Сведения об авторах

Горелик Андрей Габриэлович, 1931 г.р., окончил Горьковский государственный университет (1954), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГУП “Зонд-поставка”, автор более 150 научных работ, область научных интересов - дистанционное зондирование атмосферы методами пассивной и активной радиолокации, оптическое приборостроение и обработка сложных сигналов.

Коломиец Сергей Федорович, 1971 г.р., окончил МФТИ (1993), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник МФТИ, автор более 20 научных работ, область научных интересов – радиолокационная метеорология, статистическая радиофизика и электродинамика.