

В.И. Латенко, И.В. Логвиненко, Р.Д. Миронов,
Н.И. Якименко

ВЫСОТА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ ВИДИМОСТЬ КАК ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

На основании анализа нормативных документов предложены определения высоты нижней границы облаков (ВНГО) и вертикальной видимости (ВВ) как измеряемых величин. Приведен анализ светодальномерного метода измерения ВНГО и ВВ применительно к объекту измерения. Показана теоретическая возможность нахождения аналитических соотношений, связывающих результаты измерений светодальномерным методом со значениями ВНГО и ВВ, соответствующими предложенным определениям. Приведено краткое описание нефелометрического метода измерения ВВ.

Инструментальные измерения высоты нижней границы облаков (ВНГО) имеют более чем 50-летнюю историю. В последние годы в постсоветских государствах после продолжительной паузы начали появляться новые приборы для измерения ВНГО. В связи с этим снова стала актуальной задача объективной оценки метрологических характеристик этих измерителей. Сравнительные испытания измерителей ВНГО, проводимые разными организациями и в разных государствах, показали общую закономерность: на сегодня не существует общепринятого представления об измеряемой величине [1]. То есть когда два рядом стоящих измерителя ВНГО показывают существенно различные значения, невозможно объективно определить, который из них измеряет точнее. Нарушается один из основополагающих принципов метрологии – принцип единства измерений.

В данной статье мы попытаемся хотя бы приблизиться к методически и метрологически точному определению ВНГО как измеряемой величины, обеспечивающему единство измерений.

В настоящее время существует два разных подхода к определению понятия ВНГО. В фундаментальной (в отличие от прикладной авиационной) метеорологии высотой нижней границы облаков считают нижнюю высоту зоны, в которой прозрачность ясного неба или дымки

переходит в прозрачность совокупности водяных капель и кристаллов льда [1]. Давайте представим себе такую совокупность капель или кристаллов в пределах апертуры измерителя и зададим вопрос: на каком уровне провести воображаемую риску, высоту расположения которой необходимо измерить? Данное определение не дает однозначного ответа на поставленный вопрос.

С другой стороны, в наставлениях для метеорологов, работающих на авиационных метеостанциях, можно встретить следующее определение: высота нижней границы облаков (ВНГО) – расстояние по вертикали между поверхностью суши (воды) и нижней границей самого низкого слоя облаков [2]. Это определение еще менее конкретное с позиций поставленного вопроса. Но в [2] приводятся еще два определения: а) видимость вертикальная (ВВ) – максимальное расстояние от поверхности земли до уровня, из которого вертикально вниз видны объекты на земной поверхности; б) высота принятия решения (ВПр) – установленная относительная высота, на которой должен быть начат маневр ухода на второй круг, в случаях, когда до достижения этой высоты командиром воздушного судна не был установлен необходимый визуальный контакт с ориентирами для продолжения захода на посадку... Из сопоставления этих определений можно составить представление об измеряемой величине. Если исходить из общих критериев авиации, то величина ВНГО должна быть связана с возможностью видеть сверху сквозь нижние слои облаков наземные объекты.

Возможность видеть сверху сквозь нижние слои облаков наземные объекты зависит от многих факторов, перечислим основные:

- прозрачность нижних слоев облака;
- удаленность объектов (высота облака);
- освещенность объектов;
- контрастность объектов.

Отметим, что в этом перечне отсутствует освещенность и контрастность нижних слоев облака, так как наблюдатель смотрит изнутри облака на просвет. Из перечисленных влияющих факторов только прозрачность нижних слоев облака относится к физическим свойствам облака как объекта измерения. Следовательно, в самом первом приближении высотой ВНГО можно считать высоту, на которой коэффициент пропускания нижних слоев облаков имеет конкретное пороговое значение, которое можно установить стандартом.

Аналогичным образом можно дать определение и величине высоты видимости: высотой видимости можно считать высоту, с которой коэффициент пропускания атмосферы до поверхности земли имеет пороговое значение, обеспечивающее возможность видеть сверху наземные объекты. Причем эти пороговые значения коэффициента пропускания для ВНГО и ВВ, очевидно, должны совпадать.

Посмотрим далее, как можно охарактеризовать величины, измеряемые современными измерителями ВНГО и ВВ, и можно ли связать их с порогом прозрачности. Этот анализ упрощается тем, что практически все используемые в настоящее время измерители представляют собой оптические дальномеры – светолокационные или лазерные. Чтобы понять, что же в действительности измеряют эти приборы, рассмотрим принцип работы светодальномера в качестве измерителя ВНГО и ВВ.

Если измерить время τ распространения света от излучателя до облака и назад до фотоприемника, то значение ВНГО определяется по элементарной формуле:

$$H = \frac{c\tau}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость света.

Допустимая погрешность измерения обычно достигает ± 10 м, так как неоднородность объектов измерения значительно больше этой величины и измерять точнее просто нецелесообразно. С помощью формулы (1) несложно определить, что значению высоты 10 м соответствует время распространения $67 \cdot 10^{-9}$ с. Для современных электронных устройств измерение временных интервалов с такой точностью не представляет особых затруднений. Например, в светолокационном измерителе ВНГО ”ПРОМІНЬ” в качестве образцового времязадающего средства применяется генератор с частотой 40 МГц и максимально допустимой нестабильностью частоты 100 ppm, что в пересчете на период составляет $2,5 \cdot 10^{-12}$ с. То есть даже простой и недорогой генератор обеспечивает многократный запас по точности задания временных интервалов. Поэтому при дальнейшем рассмотрении будем считать, что все временные интервалы могут быть измерены с требуемой точностью.

На рис. 1 приведены временные диаграммы сигналов измерителя. В момент вспышки лампы через электроды лампы проходит импульс тока

порядка 100 А, из которого формируется электрический импульс запуска $u_1(t)$, где t – текущее время. Передний фронт импульса запуска синхронный с излученным световым импульсом. Отраженный от облака световой импульс, пройдя через приемный тракт, возникает на его выходе в виде электрического сигнала $u_2(t)$. Во временном интервале между импульсом запуска и принятым сигналом в неявном виде содержится информация о значении времени распространения светового импульса τ . Для выделения этой информации требуется связать положение фронтов импульса запуска и отраженного сигнала с текущим временем.

Для привязки фронта к текущему времени используется пороговое устройство. Обозначим значение порога срабатывания такого устройства в цепи импульса запуска U_1 , а в цепи отраженного сигнала – U_2 (рис. 1).

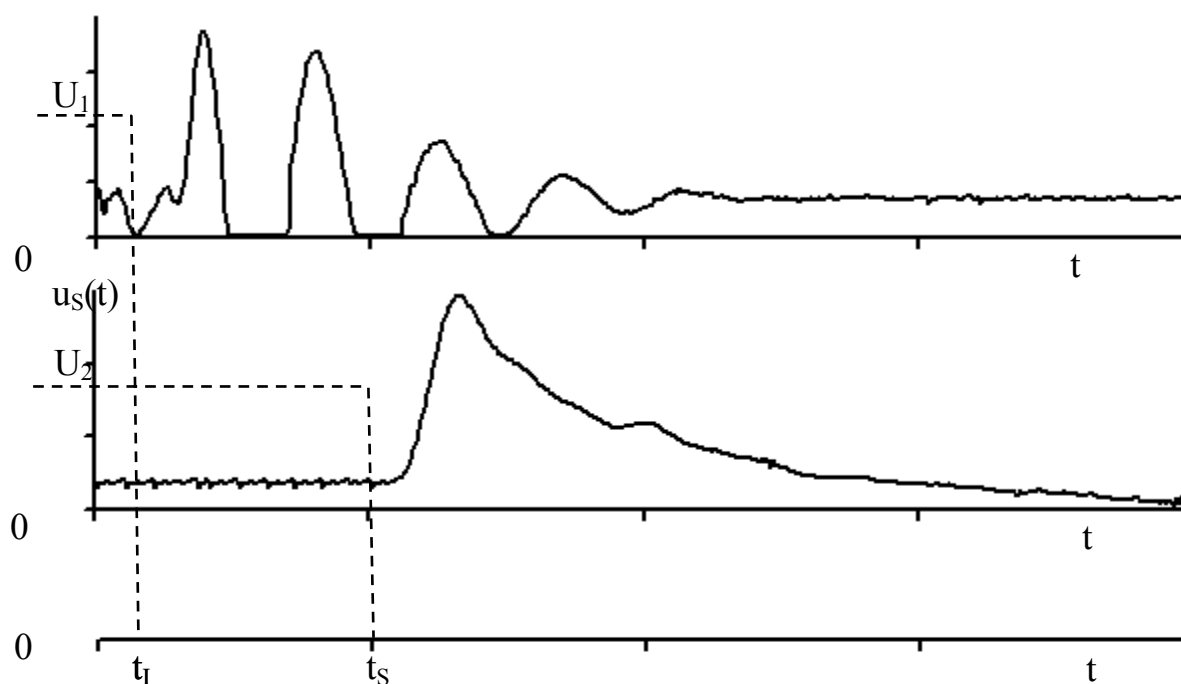


Рис. 1. Формирование измерительного интервала

Тогда пороговые устройства в цепи импульса запуска и в цепи отраженного сигнала сработают в моменты времени t_1 и t_s соответственно. Интервал времени от t_1 до t_s можно представить в виде:

$$\tau_M = t_s - t_1. \quad (2)$$

Интервал (2) содержит в неявном виде искомое время распространения сигнала τ , поэтому представим его в виде алгебраической суммы составляющих:

$$\tau_M = \tau_S + \tau + \tau_A + \tau_I, \quad (3)$$

где τ_I и τ_S – временные интервалы неопределенности привязки фронта импульса запуска и фронта сигнала соответственно; τ_A – аппаратная задержка сигнала в цепях измерителя.

Для определения времени распространения сигнала (τ), исходя из значения интервала (τ_M) необходимо предварительно откалибровать измеритель, используя прием измерения заданного расстояния. Берется некоторая базовая дистанция (L) (обычно $L = 10$ м), соответствующая значению ВНГО $H = L/2$, для которой время распространения определяется из (1) как:

$$\tau_0 = \frac{L}{c}. \quad (4)$$

Затем эта базовая дистанция измеряется с помощью измерителя. Световой импульс направляется в требуемом направлении с помощью отражателей. То есть световой сигнал отражается от твердого предмета, что имеет принципиальное значение для всей методики измерения.

Очевидно, что полученное значение измерительного интервала можно представить в виде:

$$\tau_{M0} = \tau_S + \tau_0 + \tau_A + \tau_I, \quad (5)$$

откуда

$$\tau_S + \tau_A + \tau_I = \tau_{M0} - \tau_0. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3) и решая полученное уравнение относительно τ , получим формулу для вычисления времени распространения сигнала:

$$\tau = \tau_M - (\tau_{M0} - \tau_0). \quad (7)$$

Посмотрим теперь на описанный метод калибровки с метрологической точки зрения. Формула (7) справедлива только при условии, что значения всех величин из левой части выражения (6) неизменны при калибровке и измерении, проводимых в разное время. На основании многолетнего опыта разработок и исследований измерителей авторами подтверждено, что при тщательном проектировании измерителя можно минимизировать нестабильность величин τ_I и τ_A , которые определяются конструкцией самого измерителя. При отражении светового импульса от отражателя нестабильность величины τ_S также не

превышает допустимую при условии точной привязки величины порога срабатывания устройства к амплитуде отраженного сигнала. Объясняется это тем, что при отражении от твердого предмета изменяется только амплитуда сигнала, а форма фронта отклика остается постоянной. Если порог масштабируется в зависимости от амплитуды, то пороговое устройство срабатывает в одной и той же точке фронта сигнала по времени. Например, в известном измерителе ИВО-1М маркер подводится оператором к уровню, соответствующему половине амплитуды сигнала. В современных автоматических измерителях порог срабатывания устанавливается равным половине амплитуды сигнала аппаратными или программными средствами без участия оператора.

Вернемся теперь к вопросу о том, что же реально измеряет светодальномерный измеритель. При отражении сигнала от оптически плотных облаков форма фронта сигнала достаточно точно повторяет форму фронта сигнала, отраженного от твердого предмета. Следовательно, в этом случае можно утверждать, что измеритель как дальномерное устройство измеряет высоту до воображаемой отметки, на которой оптический луч отражается, как от твердого отражателя. Другими словами, если бы можно было поместить на измеренную высоту твердый отражатель, то результат был бы таким же.

Точно так же можно трактовать результат измерения в условиях размытой оптическими помехами границы облака или при измерении вертикальной видимости. Уменьшение крутизны фронта сигнала по сравнению с крутизной фронта при отражении от твердого предмета будет сказываться на увеличении погрешности измерения. Но не будем останавливаться на деталях.

Итак, в результате измерения получено значение высоты, на которой световой луч отражается от атмосферного объекта, как от твердого предмета. Зададимся вопросом: существует ли связь этого значения со значением высоты слоя с пороговым значением коэффициента пропускания? Предлагаем следующее логическое подтверждение такой связи.

При отражении от атмосферного объекта как от твердого предмета, луч света проникает вглубь объекта на определенную глубину d . Глубину проникновения можно оценить по приращению длины фронта отраженного импульса:

$$d = \frac{c \cdot \Delta\tau}{2}, \quad (8)$$

где $\Delta\tau$ – приращение длины фронта отраженного импульса.

Для однородной среды коэффициент пропускания слоя толщиной d определяется соотношением:

$$T = \exp(-\mu \cdot d), \quad (9)$$

где μ – показатель ослабления.

В результате подстановки (8) в (9) получим:

$$T = \exp\left(-\mu \cdot \frac{c \cdot \Delta\tau}{2}\right). \quad (10)$$

Выражение (10) показывает связь между приращением длины фронта импульса при отражении от атмосферного объекта и его коэффициентом пропускания. Это указывает на теоретическую возможность установить аналитическую связь между значением, измеряемым светодальномерным измерителем, и величиной ВНГО или ВВ, определенной по критерию прозрачности. Но до тех пор, пока точные критерии не введены в практику измерений ВНГО и ВВ, любые попытки оценить результаты измерений остаются субъективными.

Остановимся еще на вопросе измерения вертикальной видимости методом, отличающимся от светодальномерного. Действительно, в некоторых лазерных измерителях ВНГО реализован отдельный режим измерения вертикальной видимости нефелометрическим методом. В основе метода лежит известная формула, связывающая значение показателя рассеяния оптического излучения (σ) с длиной волны (λ) со значением метеорологической дальности видимости (S) [3]:

$$\sigma = \frac{3,91}{S} \cdot \left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^{1,3}. \quad (11)$$

В свою очередь, показатель рассеяния слоя толщиной d можно определить через соотношение излученного оптического потока (F_1) и потока рассеяния (Φ_0):

$$\sigma = \frac{\Phi_0}{F_1 \cdot d}. \quad (12)$$

Приравнивая правые части выражений и решая полученное равенство относительно величины (S), получим:

$$S = 3,91 \cdot \frac{F_1 \cdot d}{\Phi_0} \cdot \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{1,3}. \quad (13)$$

Если пренебречь поглощением в атмосферном объекте и молекулярным рассеянием, то показатель ослабления (μ) для определенной длины волны будет равен показателю рассеяния:

$$\mu = \sigma. \quad (14)$$

Поскольку коэффициент пропускания непосредственно связан с показателем рассеяния выражением (9), то нефелометрический метод измерения наиболее точно соответствует принятым критериям измерения ВВ (по пороговому значению коэффициента пропускания). К сожалению, допустимая погрешность определения значений вертикальной видимости нефелометрическим методом в существующих лазерных дальномерах достигает 30 % [4], что существенно ограничивает применение этого режима на практике.

Выводы

1. Несмотря на 50-летнюю практику инструментальных измерений ВНГО и ВВ, до сих пор отсутствуют метрологические определения измеряемых величин.

2. Предложены следующие определения величин ВНГО и ВВ. Высота ВНГО – это высота, для которой коэффициент пропускания нижних слоев облачности равен пороговому значению (задается стандартом). Высота видимости – это высота, для которой коэффициент пропускания атмосферы до земной поверхности равен пороговому значению.

3. Показана теоретическая возможность найти аналитические соотношения, связывающие результаты измерений ВНГО и ВВ светодальномерным методом со значениями, определенными предложенным способом.

* *

1. Швень Н.І., Павленко О.А. Орнатський І.А. Методичні аспекти світлолокаційних вимірювань нижньої межі хмар // Фізична географія та геоморфологія. – Вип. № 57. – 2009. – С. 90-95.

2. Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах. Дос 9837. Международная организация гражданской авиации. Изд-е первое. – 2006.
3. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
4. Измерители лазерные высоты облаков ЛВВХ-1. Руководство по эксплуатации ААДФ.401166.001 РЭ.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

В.І. Латенко, І.В. Логвиненко, Р.Д. Миронов, М.І. Якименко

Висота нижньої межі хмар і вертикальна видимість як вимірювані величини

На основі аналізу нормативних документів запропоновано визначення висоти нижньої межі хмар (ВНМХ) та вертикальної видимості (ВВ) як вимірюваних величин. Наведено аналіз світлодалекомірного методу вимірювання ВНМХ та ВВ відносно об'єкта вимірювання. Показано теоретичну можливість знаходження аналітичного співвідношення, що пов'язує результати вимірювання світлодалекомірним методом із значеннями ВНМХ і ВВ, що відповідають запропонованим визначенням. Наведено короткий опис нефелометричного методу вимірювання вертикальної видимості.

V.I. Latenko, I.V. Logvynenko, R.D. Myronov, M.I. Yakymenko

Cloud base height and vertical visibility as measuring values

The definitions of cloud base height (CBH) and vertical visibility (VV) are proposed on the basis of analysis of regulating documents. The analysis of optar method of CBH and vertical visibility measurement with reference to measured object is presented. It is shown the theoretical possibility to find analytical correlation of optar measurement results with the values of CBH and VV, which are relevant to proposed definitions. The short description of the nephelometric method of measurement of vertical visibility is presented.