

УДК 551.508.761+53.082.52

С.В. Зуев, Н.П. Красненко, В.А. Левикин

Телевизионный измеритель характеристик облачности

Представлен телевизионный измеритель характеристик облачности, позволяющий определять высоту, направление и скорость движения нижней облачности по ее разномасштабным изображениям, а также общий балл облачности по панорамным изображениям всего небосвода.

Ключевые слова: общий балл облачности, высота нижней границы облачности, нижняя облачность, измеритель высоты облаков (облакомер).

Процессы в нижней части тропосферы имеют определяющее значение в формировании климата территорий и условий жизнедеятельности человека. Исследование закономерностей и механизмов взаимодействия между собой основных характеристик приземной атмосферы требует создания систем устойчивого инструментального мониторинга и разработки соответствующих методик обработки данных. В радиационном балансе земной поверхности и атмосфере облачности принадлежит определяющая роль. Наряду с глобальными метеорологическими явлениями, облачность оказывает существенное влияние на техногенную деятельность человека, связанную с использованием воздушного пространства планеты. Именно поэтому информация о характеристиках облачности, таких как ее количество, форма, повторяемость на всех ярусах, нижняя и верхняя границы, направление движения, водность, горизонтальная и вертикальная протяженность и др., имеет большое значение.

Телевизионная измерительная система. Современное развитие оптико-электронной и вычислительной техники, а также методов обработки изображений, позволяет создавать измерительные системы, способные осуществлять устойчивый мониторинг основных характеристик облачности. Разработанная телевизионная измерительная система (ТИС) позволяет по изображениям фрагментов облачности определять высоту их нижней границы, скорость и направление движения, а по панорамным изображениям всего небосвода рассчитывать общий балл облачности. На рис. 1 показан внешний вид оптико-электронной части измерителя, состоящего из двух телекамер черно-белого и одной телекамеры цветного изображения (1 – МВК-1632 12 мм, 2 – МВК-1632 16 мм, 3 – панорамный обозреватель МВК-1653ц 1,24 мм).

Интерфейс программы обработки цифровых изображений, реализованной средствами языка C++ и библиотеки OpenCV [1], представлен на рис. 2. Два верхних разномасштабных изображения используются для нахождения высоты нижней границы облачности (НГО), а два правых изображения одного масштаба, получаемых с интервалом в 6 с, – для определения направления и скорости движения облачности. По левому нижнему изображению оценивается общий балл облачности.

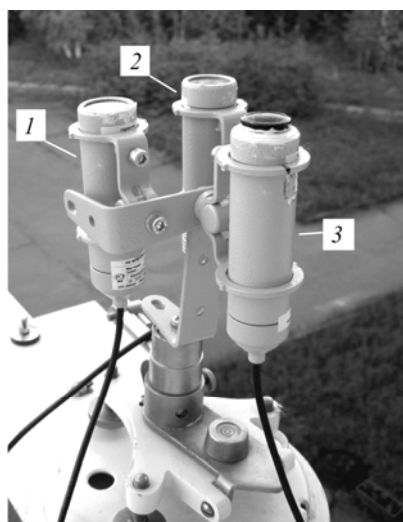


Рис. 1. Оптико-электронная часть ТИС

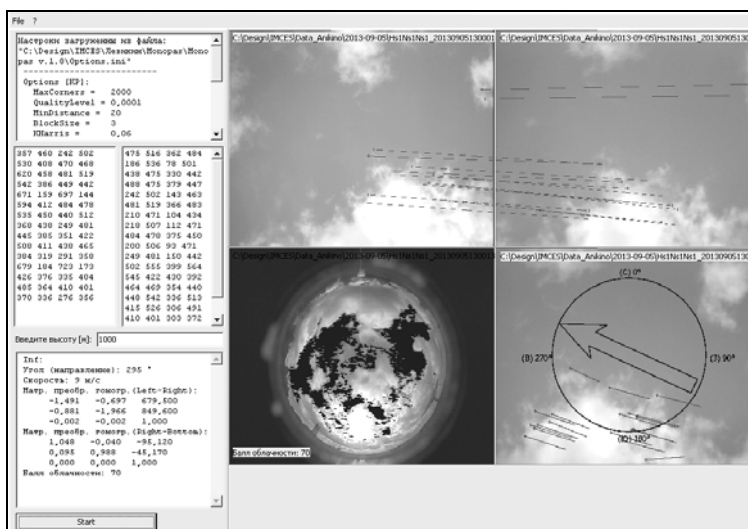


Рис. 2. Интерфейс программы обработки изображений

Определение высоты нижней границы облачности. Определение высоты НГО осуществляется моностатическим методом [2], основанным на известных зависимостях между действительными размерами наблюдаемого предмета, размерами его разномасштабных изображений, фокусными расстояниями оптических систем и дистанцией съемки. Используя законы геометрической оптики в части зависимостей между положением предмета и его изображением [3] для двух оптических систем, можно записать соотношение

$$\frac{y'_1}{y'_2} = \frac{f'_1}{f'_2} \cdot \frac{a - f'_2}{a - f'_1}, \tag{1}$$

где y'_1 и y'_2 – размеры изображений предмета y , сформированные оптическими системами с фокусными расстояниями f'_1 и f'_2 соответственно, a – расстояние от передней главной точки H до осевой точки A предмета y (рис. 3).

Из (1) имеем

$$a = f'_1 \cdot \frac{K_y - 1}{K_y - K_f}, \tag{2}$$

где $K_y = \frac{y'_1}{y'_2}$ – коэффициент подобия изображений; $K_f = \frac{f'_1}{f'_2}$ – коэффициент отношения фокусных расстояний.

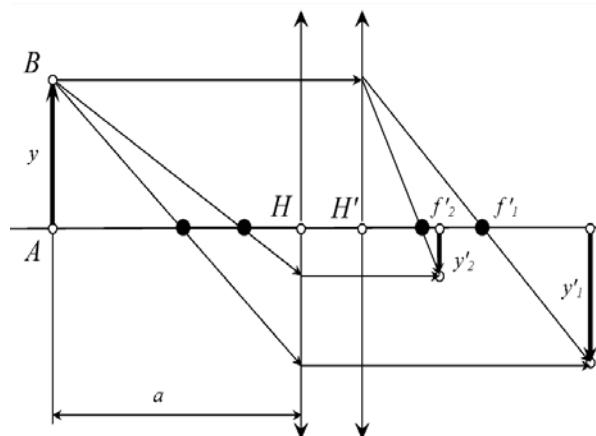


Рис. 3. Ход лучей в оптических системах с f'_1 и f'_2

Отсутствие в выражении (2) размера предмета y позволяет измерять расстояния до объектов с заранее неизвестными размерами, какими и являются облака вследствие их непрерывного изменения во времени и пространстве.

Формула (2) справедлива только для зенитных измерений высоты нижней облачности. В общем случае с учетом кривизны Земли, согласно теореме косинусов, высота НГО h определяется как

$$h = \sqrt{a^2 + R^2 - 2R \cdot a \cdot \cos(180 - \alpha)} - R, \tag{3}$$

где a – расстояние до измеряемого фрагмента облачности по выражению (2); R – радиус земного шара (6 371 210 м); α – зенитный угол линии визирования измерительной системы.

Методика определения высоты нижней границы облачности заключается в следующем. В определенный момент времени получают два разномасштабных изображения фрагмента облачности. Полученную пару изображений проверяют на пригодность к обработке и подвергают коррекции. Затем находят коэффициент подобия изображений K_y и определяют расстояние a до измеряемого фрагмента облачности. При необходимости находят зенитный угол линии визирования α и вычисляют высоту НГО h .

Запись разномасштабных изображений производится с интервалом в 2 с с помощью двух телевизионных камер, имеющих фокусные расстояния 16 и 12 мм. Размерность оцифрованных изображений в формате JPEG составляет 704×576 пикселей.

Полученные изображения проверяются на пригодность к обработке путем анализа гистограмм яркости. Изображения с низким контрастом не обрабатываются, так как это говорит об отсутствии на них различимых фрагментов облачности или о полном их отсутствии. Также отбраковываются изображения, имеющие значительные срезы гистограммы в областях высокой или низкой яркости, что указывает об утраченных на них по каким-либо причинам деталях в светах или тенях.

Коррекция изображений необходима для исправления радиальных искажений и компенсации смещения оптических осей объективов относительно центров фотоприемников и проводится с использованием ранее полученных результатов калибровки телевизионных камер.

Коэффициент подобия изображений K_y определяется по сопряженным точкам, выделяемым с помощью детектора Харриса [4] с последующей фильтрацией ложных соответствий методом RANSAC [5], путем нахождения сопряженных отрезков с максимальным отношением их длин.

Точностные характеристики измерения высоты нижней границы облачности. Выражение (2) фактически является функцией передачи идеальной ТИС для случая нулевого зенитного угла линии визирования ($\alpha = 0^\circ$), в которой коэффициент подобия изображений K_y является входной ве-

личной, а расстояние a – выходной. Однако на практике применение такой идеальной функции передачи затруднительно, так как в ней не учитываются реальные характеристики измерительной системы. Поэтому путем проведения серии измерений была получена градуировочная характеристика ТИС, описывающая экспериментально найденную зависимость между входными и выходными значениями измерительной системы, а также ее полиномиальная регрессия 3-й степени вида

$$a = -383692 \cdot K_y^3 + 1591998 \cdot K_y^2 - 2202962 \cdot K_y + 1017451, \quad (4)$$

по которой предельную систематическую погрешность ТИС по [6] можно оценить как

$$\delta \approx |a'| \cdot \Delta K_y, \quad (5)$$

где a' – производная функции (4); ΔK_y – шаг изменения коэффициента подобия изображений (цена деления шкалы).

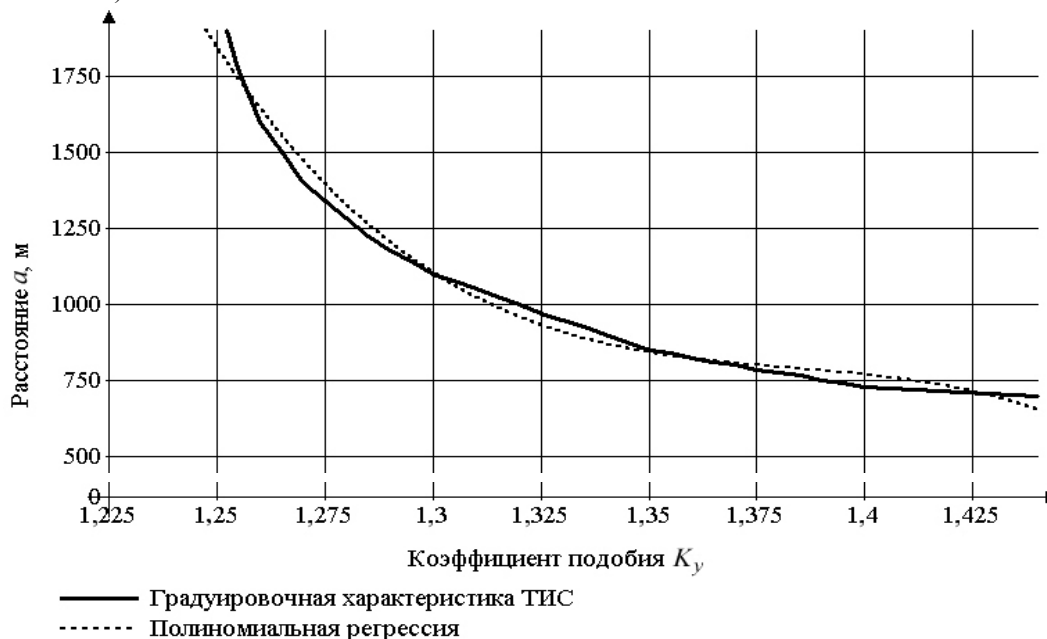


Рис. 4. Градуировочная характеристика ТИС и ее полиномиальная регрессия

Согласно полученным расчетам, предельная систематическая погрешность измерения высоты НГО в диапазоне высот от 500 до 1500 м не превышает 10% при $\Delta K_y = 0,005$. Графики градуировочной характеристики ТИС и ее полиномиальной регрессии представлены на рис. 4.

Определение направления и скорости движения нижней облачности. Направление и скорость движения нижней облачности определяется путем расчета видимого смещения фрагментов нижней облачности с известной высотой по их изображениям одного масштаба, полученным с интервалом в 6 с. Для этого на обоих изображениях тем же способом, что и в случае определения высоты НГО, находят сопряженные точки и вычисляют матрицу преобразования гомографии [7], откуда получают значения смещения измеряемого фрагмента облачности по горизонтали и вертикали и рассчитывают угол направления φ и скорость v его движения:

$$\varphi = \arctg \frac{q}{p}, \quad (6)$$

$$v = \sqrt{p^2 + q^2}, \quad (7)$$

где p – смещение по горизонтали; q – смещение по вертикали.

Определение общего балла облачности. Принцип определения общего балла облачности основан на получении цветных полутоновых изображений всего небосвода и преобразовании их в бинарные путем разделения точек изображения по признаку «синева неба» – «несинева неба» с использованием RGB-модели цвета, согласно которой яркость каждой точки цветного изображения можно представить как

$$Y = R + G + B, \quad (8)$$

где Y – яркость точки цветного изображения; R , G , B – красная, зеленая и синяя компоненты.

Точке исходного изображения присваивается значение «несинева неба» $S = 0$, если значение ее синей компоненты B не больше значения или красной R или зеленой G компоненты. И наоборот, значение «синева неба» $S = 1$ присваивается тем точкам, у которых значение синей компоненты B больше значения и красной R , и зеленой G компоненты:

$$S = \begin{cases} 0, (B \leq R) \vee (B \leq G), \\ 1, (B > R) \wedge (B > G). \end{cases} \quad (9)$$

В результате формируется бинарное изображение, несущее информацию о закрытых и незакрытых участках всего небосвода, по которому и определяется общий балл облачности как относительное количество точек изображения со значением «несинева неба» $S=0$.

Результаты экспериментальных измерений. Экспериментальные измерения проводились в период с 1 июня по 31 августа 2013 г. В результате обработки 920 пар разномасштабных изображений было получено 69 значений высоты нижней границы кучевой Cu , кучево-дождевой Cb , слоистой St и слоисто-кучевой Sc облачности.

Полученные значения сравнивались с минимальными уровнями конденсации (МУК), рассчитанными по формуле Ипполитова [8] по данным об относительной влажности воздуха метеостанции ИМКЭС СО РАН.

Как видно из рис. 5, значения высоты НГО в 90% случаев (62 измерения) превышают или совпадают с МУК, что хорошо согласуется с физикой образования конвективной и слоистой облачности нижнего яруса. В 2-х случаях, когда измерения проводились в утренние часы и относительная влажность воздуха составляла 85–90%, значение высоты облаков значительно (в 2–3 раза) превышало МУК, что может говорить о наличии тумана в момент измерения. В 7 случаях (10% от общего количества) измеренные значения высоты оказались ниже минимального уровня конденсации.

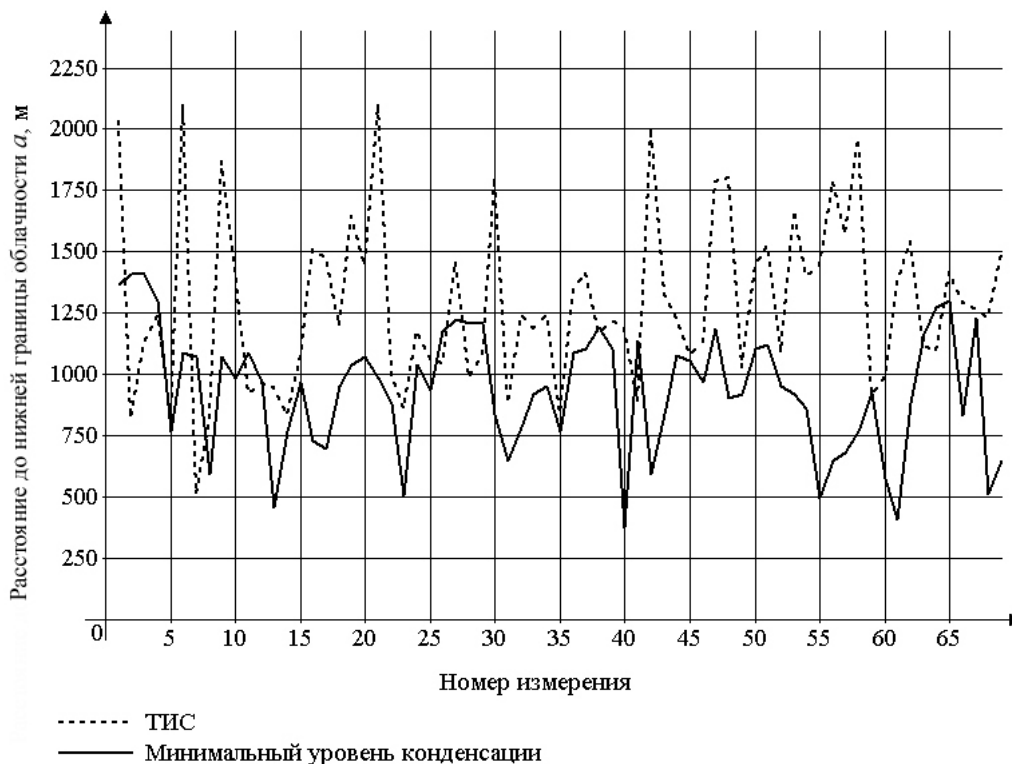


Рис. 5. Сравнение высоты нижней границы облачности с минимальными уровнями конденсации

Моностатический метод позволяет измерять высоту НГО при низком и среднем балле нижней облачности, чем хорошо дополняет собой имеющие широкое распространение светолокационные и лазерные методы измерения, работающие преимущественно при среднем и высоком баллах облачности. Из рис. 6 видно, что большая часть измерений высоты НГО моностатическим методом (91%) приходится на низкий (до 3-х) и средний (от 4-х до 7-ми) балл нижней облачности. Сравнение результатов измерения направления и скорости движения нижней облачности не проводилось по причине отсутствия данных по этим метеорологическим параметрам.

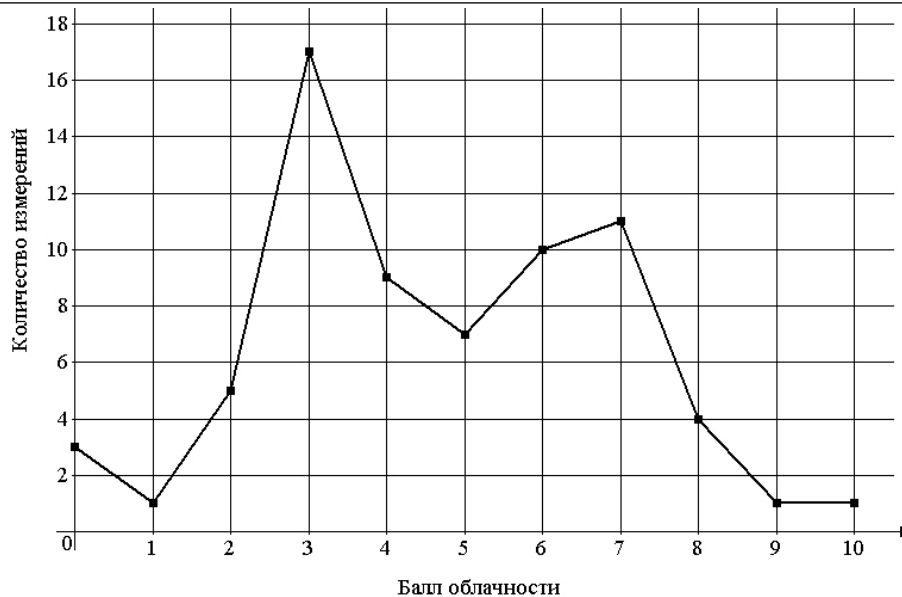


Рис. 6. Зависимость количества измерений от балла нижней облачности

Данные инструментальных измерений общего балла облачности по синеве неба сравнивались с данными дневных визуальных наблюдений метеостанции ИМКЭС СО РАН. Всего за период с 1 июня по 31 августа 2013 г. было получено 498 изображений, из которых были исключены 89 изображений, имеющих сбойные участки и солнечную засветку. Также были исключены 248 изображений с перистыми *Сi* и перисто-кучевыми *Сс* облаками, так как существующая методика визуального определения количества облаков верхнего яруса не позволяет проводить корректное сравнение с данными инструментальных измерений. Таким образом, было отобрано 161 изображение, что составило 32% от их общего числа. На рис. 7 представлен график расхождения значений общего балла облачности, полученных инструментальным и визуальным методом. Видно, что расхождение в 1 балл и менее имеется в 124 случаях (77%), что говорит о хорошем совпадении результатов измерений.

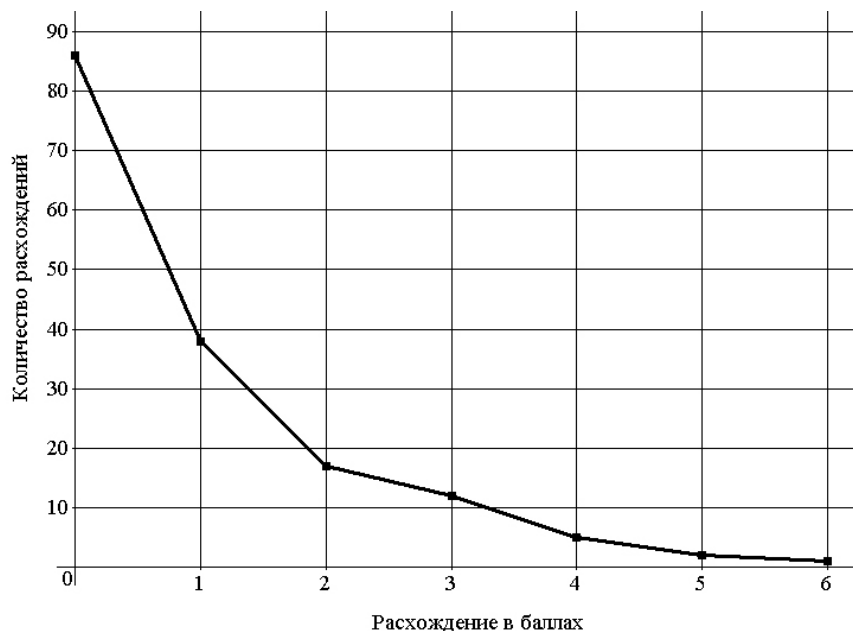


Рис. 7. Сравнение инструментального и визуального способов определения общего балла облачности

Заключение. Предлагаемый метод определения высоты, скорости и направления движения нижней облачности, а также общего балла облачности при всей своей относительной простоте технической и программной реализации позволяет дополнять, а в некоторых случаях и заменять традиционные и в большинстве случаев визуальные методы определения характеристик облачности, что

подтверждают результаты экспериментальных измерений и их сравнение с данными инструментальных и визуальных измерений метеостанции ИМКЭС СО РАН.

Литература

1. OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org>, свободный (дата обращения: 19.12.2013).
2. Пат. 2377612 РФ, МПК G 01 W 1/00. Моностагический способ определения высоты нижней границы облачности / С.В. Зуев (РФ). – № 2008112650 / 28 ; заявл. 01.04.08; опубл. 27.12.09. Бюл. № 36. – 7 с.
3. Заказнов Н.П. Прикладная геометрическая оптика – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
4. Конушин А. Слежение за точечными особенностями сцены [Электронный ресурс] // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2003. – № 1(5). – Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/54>, свободный (дата обращения: 19.12.2013).
5. Конушин А. Устойчивые алгоритмы оценки параметров модели на основе случайных выборок [Электронный ресурс] // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2003. – № 1(4). – Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/47>, свободный (дата обращения: 19.12.2013).
6. Тартаковский Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.
7. Конушин А. Геометрические свойства нескольких изображений // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2006. – № 4(3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/141>, свободный (дата обращения: 19.12.2013).
8. Тверской П.Н. Курс метеорологии (физика атмосферы) / Под ред. Е.С. Селезневой. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1962. – 700 с.

Зуев Сергей Викторович

Науч. сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН)
Тел.: 8 (382-2) 49-25-91
Эл. почта: zuev@imces.ru

Красненко Николай Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа,
гл. науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН
Тел.: 8 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: krasnenko@imces.ru

Левикин Виталий Алексеевич

Техник ИМКЭС СО РАН
Тел.: 8 (382-2) 49-25-91
Эл. почта: vitaly@levikin.ru

Zuev S.V., Krasnenko N.P., Levikin V.A.

TV meter of cloud characteristics

The TV system for computation of cloud base height, speed and direction by means of multi-scale images, and for determination of total cloudiness by means of all-sky images, are presented.

Keywords: total cloudiness, cloud base height, low clouds, ceilometer.