

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510

Об определении нижней границы облачности по цифровой стереосъемке с поверхности Земли

А.И. Чуличков^{1,2}, М.С. Андреев^{1,2}, Г.С. Голицын²,
Н.Ф. Еланский², А.П. Медведев², О.В. Постыляков^{2*}

¹ Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 16.05.2016 г.

Исследован метод измерения высоты нижней границы облаков по стереопаре их изображений, полученных с помощью двух цифровых фотокамер. Предложен метод определения параметров ориентации фотокамер по ночным изображениям звездного неба. Для вычисления расстояния до облака используется сдвиг изображения фрагмента облака как целого. Выделение выбранного фрагмента на фотографиях выполняется с применением методов морфологического анализа изображений. При стереобазе 60 м и съемке с разрешением 1200 пикселей в поле зрения 60° погрешность не превышает 10% при высоте облаков менее 4 км. Оптимизация параметров фотосъемки, в том числе увеличение стереобазы, может существенно повысить достигнутую точность определения высоты нижней границы облачности. Приведены примеры определения нижней границы облачности на макете экспериментальной установки в сравнении с данными лазерного дальномера.

Ключевые слова: облачность, нижняя граница облачности, измерение характеристик облачности, дистанционное зондирование, стереосъемка; clouds, cloud base, measuring the characteristics of the cloud, remote sensing, stereoscopic.

Введение

Облачность оказывает существенное воздействие на земную климатическую систему, участвуя в гидрологическом цикле и влияя на радиационный баланс земной атмосферы [1]. Она существенно ограничивает возможности оптического дистанционного зондирования нижней тропосферы из космоса и оказывается явлением, количественные оценки характеристик которого необходимы для возможно более точного дистанционного исследования нижней тропосферы с поверхности Земли [2–4] и космическими средствами. Большую роль в начале интенсивного изучения облачности сыграла Советская программа климатологии облачности и радиации (1986–1992) [5], которая являлась важной частью Всемирной программы исследования климата. Эта программа, в частности, способствовала созданию новых приборов и развитию методов определения характеристик облачности по дистанционным измерениям в различных диапазонах спектра (см., например, [6]).

Для определения такой характеристики облачности, как нижняя граница, наибольшее распространение к настоящему времени получили методы, основанные на измерении времени запаздывания эхосигнала, отраженного облаком, относительно зондирующего сигнала, излученного передатчиком. Приборы, реализующие такие активные методы, используют в качестве источника излучения лампу (ДВО-2 и др.) или лазер (СЛ31, ДОЛ-2 и др.). Максимальная дальность, измеряемая таким прибором, как правило, ограничена 2000 м (кроме лазерного дальномера СЛ31), погрешность измерения составляет около 10%. Аппаратура активного зондирования является дорогостоящей и сложной в эксплуатации.

Другим способом измерения расстояния до объектов является триангуляционный. Он основан на анализе изображений объекта, полученных из нескольких точек наблюдения [7–9] или с помощью объективов с различным фокусным расстоянием [9]. При практической реализации метода основные трудности состоят в определении координат и ориентации оптических осей фотокамер, используемых для получения изображений, и в реализации автоматических алгоритмов нахождения изображений одной точки объекта на разных изображениях.

В настоящей статье предлагается и исследуется метод измерения высоты облаков по стереопаре их

* Алексей Иванович Чуличков (achulichkov@gmail.com); Максим Сергеевич Андреев (andreevmaxim@gmail.com); Георгий Сергеевич Голицын (georgy.golitsyn@gmail.com); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Андрей Петрович Медведев (medvea@mail.ru); Олег Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com).

изображений, полученных с помощью цифровых фотокамер. Для получения необходимых параметров ориентации фотокамер используются изображения звездного неба, которые обрабатываются с помощью методов теории измерительно-вычислительных систем [11]. В стандартных методах стереофотограмметрии для вычисления расстояния до объекта требуется указание соответствующих точек на стереопаре изображений. В настоящей работе для оценки этого расстояния используется сдвиг изображения фрагмента облака как целого, этот сдвиг определяется разностью координат изображения облака на первом и втором снимках стереопары. Для оценки величины сдвига применяются методы морфологического анализа изображений [12].

1. Математическая модель стереопары изображений облака

Экспериментальная установка, для которой разрабатывается представляемый метод определения нижней границы облаков, состоит из двух цифровых фотокамер, расположенных на одном высотном уровне, направленных в зенит и разнесенных на несколько десятков метров [8].

Из-за того что абсолютно точно указанные условия соблюдения трудно, в следующем параграфе будет рассмотрен способ корректировки реальных данных с целью привести их к тому виду, какой был бы получен на установке с идеально ориентированными камерами.

Опишем математическую модель формирования изображения фиксированной точки облака. С каждой фотокамерой i ($i = 1, 2$) свяжем Декартову систему координат, в которой ось $O_i Z_i$ направлена вертикально вверх и совпадает с ее оптической осью, а горизонтальная ось $O_i X_i$ проходит через центры камер и направлена от камеры № 1 к камере № 2. Кроме того, считается, что обе фотокамеры имеют одно и то же увеличение.

Пусть облако расположено в зените на высоте D , расстояние между фотокамерами по горизонтальной оси равно B . Кроме того, x_0 — горизонтальный размер пространственной области на высоте D , изображаемой фотокамерой; φ_0 — угол обзора камеры (рис. 1). Тогда расстояние до облака вычисляется по формуле [13]:

$$D = \frac{x_0}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)}. \quad (1)$$

Выберем точку облака (на рис. 1 для наглядности и простоты эта точка лежит в плоскости, проходящей через оптические оси обеих камер). Обозначим x_1 и x_2 координаты выбранной точки облака вдоль осей $O_1 X$ и $O_2 X$ в системе координат первой и второй камер соответственно. Для точки облака, расположенной в плоскости оптических осей, выполнено равенство $|x_1 - x_2| = B$. Поэтому вместо (1) имеем [13]:

$$D = \frac{B x_0}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) |x_1 - x_2|}. \quad (2)$$

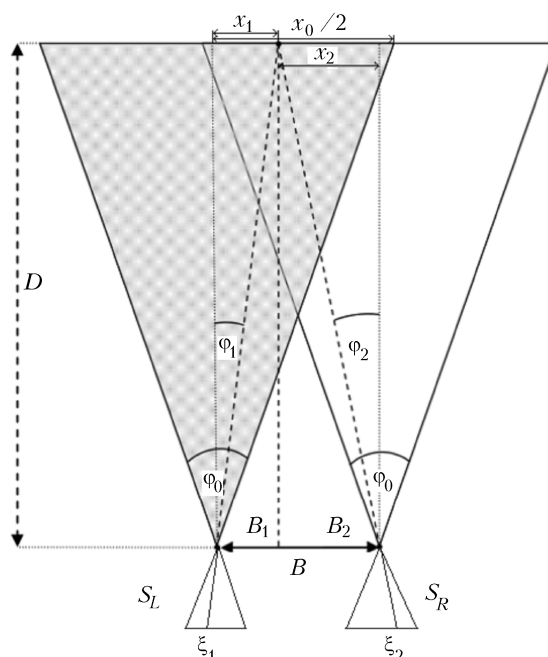


Рис. 1. Схема формирования изображения точки облака двумя фотокамерами

В формуле (2) измеряемыми являются параметры: стереобазы B , угол обзора фотокамеры φ_0 и отношение $\frac{x_0}{|x_1 - x_2|}$, равное отношению $\frac{\xi_0}{|\xi_1 - \xi_2|}$ — размера кадра ξ_0 к модулю разности координат изображений выбранной точки облака на первом и втором кадрах $|\xi_1 - \xi_2|$. Итак, формула для вычисления высоты облака есть

$$D = \frac{B \xi_0}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) |\xi_1 - \xi_2|}. \quad (3)$$

2. Юстировка относительного положения фотокамер

На практике не удается обеспечить достаточно точное для решения поставленной задачи позиционирование фотокамер. Поэтому был предложен подход к юстировке относительного положения осей и высоты расположения одной из камер относительно другой (эталонной) по специально выбранным тестовым объектам. В качестве тестового объекта было выбрано звездное небо. Изображение облака с одной из камер с использованием оцениваемых по тестовой фотосъемке параметров преобразовывалось к виду, который оно имело бы при

идеальной юстировке ее положения относительно эталонной фотокамеры.

Звезды можно считать бесконечно удаленными точечными объектами, поэтому их изображения, полученные с помощью фотокамер, оси координат которых совмещены в соответствии с указанными выше требованиями, должны быть полностью идентичными, а поэтому координаты изображений одной и той же звезды на левой и правой камерах должны совпадать. Если этого не происходит, то камеры не юстированы должным образом. Вместо совмещения осей координат поворотами камер найдем такое преобразование координат второй камеры, при котором изображения бесконечно удаленных объектов будут совпадать.

Для нахождения искомого преобразования необходима математическая модель, связывающая координаты точек трехмерного пространства с координатами их изображений в плоскости фотоприемников. Такая модель дается методами проективной геометрии [14, 15]. Однако, поскольку угол между оптическими осями камер обычно достаточно мал, а для определения высоты облаков используются фрагменты вблизи центра кадра, эту модель в настоящей работе предлагается строить на аффинном преобразовании координат.

Искомое преобразование координат найдем методами теории измерительно-вычислительных систем [11]. Эти методы позволяют оценить параметры аффинного преобразования с наивысшей возможной точностью, а кроме этого, проверить гипотезу о возможности описания рассогласования изображений звездного неба на разных камерах аффинным преобразованием. Параметры аффинного преобразования далее используются для преобразования (редукции) изображения одной из камер к виду, свойственному изображению камеры, у которой направление осей координат и угол обзора такие же, как у эталонной.

Опишем модель изображений и методы редукции изображения формально. Пусть (ξ_1, η_1) – координаты точки (звезды) на первом изображении; (ξ_2, η_2) – ее координаты на втором (эталонном) изображении. Предположим, что они связаны аффинным преобразованием, т.е. выражением

$$\begin{pmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}. \quad (4)$$

По заданным координатам $(\xi_1^{(j)}, \eta_1^{(j)})$, $(\xi_2^{(j)}, \eta_2^{(j)})$, $j = 1, \dots, N$, где N – число точечных объектов (звезд) на изображении, требуется проверить, можно ли считать, что второе изображение может быть получено из первого путем преобразования (4), и оценить его параметры.

Поскольку координаты изображений точечных объектов измерены с некоторой погрешностью, то связь между координатами и параметрами аффинного преобразования запишем в виде

$$\begin{pmatrix} \xi_2^{(1)} \\ \eta_2^{(1)} \\ \vdots \\ \xi_2^{(N)} \\ \eta_2^{(N)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1^{(1)} & \eta_1^{(1)} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_1^{(1)} & \eta_1^{(1)} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_1^{(N)} & \eta_1^{(N)} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_1^{(N)} & \eta_1^{(N)} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{2N-1} \\ v_{2N} \end{pmatrix} = A\mathbf{f} + \mathbf{v}. \quad (5)$$

Здесь вектор $\mathbf{f} \in R^6$ – вектор параметров аффинного преобразования, матрица A размера $2N \times 6$ связывает вектор параметров \mathbf{f} с координатами точечных объектов на эталонном изображении. Вектор $\mathbf{v} \in R^{2N}$ – вектор погрешностей измерения координат точечных объектов. Матрицу A считаем известной точно, вектор \mathbf{f} произволен, вектор \mathbf{v} считаем случайным с нулевым математическим ожиданием и матрицей ковариаций Σ . В настоящей работе считалось, что координаты вектора \mathbf{v} некоррелированы и дисперсия координат равнялась квадрату удвоенного расстояния между соседними пикселями цифрового изображения, так, что $\Sigma = \sigma^2 I$, здесь I – единичная матрица, $\sigma^2 = 4$ (пиксель)².

В соответствии с (5) гипотезу о существовании аффинной связи между изображениями двух камер можно принять, если найдется вектор $\mathbf{f} \in R^6$, для которого разность между вектором

$$\xi = (\xi_2^{(1)}, \eta_2^{(1)}, \dots, \xi_2^{(N)}, \eta_2^{(N)}) \in R^{2N}$$

и вектором $A\mathbf{f}$ можно описать как случайный вектор \mathbf{v} с заданными выше математическим ожиданием и ковариационной матрицей. Матрица $A: R^6 \rightarrow R^{2N}$, имеет пространство значений $R(A)$ размерности 6, а вектор $A\mathbf{f}$ всегда лежит в $R(A)$. Значит, вектор ξ в случае верной гипотезы может отстоять от подпространства $R(A)$ на вектор, равный ортогональному дополнению $R^\perp(A)$ подпространства $R(A)$. Как известно, ортогональная проекция \mathbf{v} может быть записана в виде $(I - AA^-)\mathbf{v}$, где A^- – матрица, псевдообратная A [11]. (Заметим, что при невырожденной матрице AA^* псевдообратная равна $A^- = (AA^*)^{-1}A^*$.) В случае верной гипотезы эта проекция равна ортогональной проекции вектора ξ на $R^\perp(A)$:

$$(I - AA^-)\mathbf{v} = (I - AA^-)\xi(I - AA^-)\mathbf{v} = (I - AA^-)\xi,$$

а квадрат длины этой проекции имеет математическое ожидание, равное

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}\|(I - AA^{-})\mathbf{v}\|^2 = \\ & = \sigma^2 \text{tr}(I - AA^{-})\Sigma(I - AA^{-})^* = (2N - 6)\sigma^2. \end{aligned}$$

Итак, в случае верной гипотезы квадрат нормы случайного вектора $\boldsymbol{\tau} = (I - AA^{-})\boldsymbol{\xi}$ является неотрицательной случайной величиной с известным математическим ожиданием. Пусть в эксперименте получено значение ξ_0 . Тогда согласно неравенству Чебышева в этом случае справедливо соотношение

$$P\left(\|\boldsymbol{\tau}\|^2 \geq \|(I - AA^{-})\boldsymbol{\xi}_0\|^2\right) \leq \frac{(2N - 6)\sigma^2}{\|(I - AA^{-})\boldsymbol{\xi}_0\|^2}.$$

Таким образом, чем больше $\|(I - AA^{-})\boldsymbol{\xi}_0\|^2$ по сравнению с $(2N - 6)\sigma^2$, тем меньше вероятность реализации $\boldsymbol{\xi}_0$ случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$ в (5) при верной гипотезе, и, следовательно, тем менее правдоподобна гипотеза о существовании аффинной связи между координатами точечного объекта на первом и втором кадрах. Количественной характеристикой этого правдоподобия служит дробь

$$\alpha(\xi_0) = \frac{(2N - 6)\sigma^2}{\|(I - AA^{-})\boldsymbol{\xi}_0\|^2},$$

называемая в теории измерительно-вычислительных систем надежностью статистической гипотезы [11].

Если надежность гипотезы достаточно велика, можно найти наилучшую в среднем квадратичном линейную оценку $\hat{\mathbf{f}} = R\xi_0$ коэффициентов \mathbf{f} аффинного преобразования. Матрица $R: R^{2N} \rightarrow R^6$, определяющая эту оценку, находится из решения задачи на минимум [11]:

$$R = \arg \inf_{R: R^{2N} \rightarrow R^6} \sup_{\mathbf{f} \in R^6} \mathbf{E}\|R\xi_0 - \mathbf{f}\|^2. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае решением задачи (6) является оператор $R = A^{-}$, оценка вектора \mathbf{f} равна $\hat{\mathbf{f}} = A^{-}\xi_0$, а ее погрешность $\sup_{\mathbf{f} \in R^6} \mathbf{E}\|R\xi_0 - \mathbf{f}\|^2 = \sigma^2 \text{tr}(A^*A)^{-1}$ [11].

3. Определение сдвига фрагмента изображения облака

Для определения высоты облака по формуле (3) необходимо знать отношение $\frac{\xi_0}{|\xi_1 - \xi_2|}$, равное размеру кадра, деленному на сдвиг изображения выбранной точки облака на первом снимке относительно второго. В настоящей работе вместо сдвига точки облака находится сдвиг целого фрагмента изображения. Для этого на первом и втором

изображениях следует выделить один и тот же фрагмент облака и определить величину сдвига первого фрагмента относительно второго. Этот сдвиг и дает значение модуля разности $|\xi_1 - \xi_2|$ для формулы (3).

Для решения этой задачи на первом кадре выделяется фрагмент изображения облака, который и следует найти на втором кадре. Поскольку изображения одного и того же объекта, сформированные разными фотокамерами, могут отличаться по яркости, контрастности, цветопередаче и другим параметрам, для поиска схожих изображений фрагмента в настоящей работе применялись методы морфологического анализа изображений [12, 16]. Центральным понятием морфологического анализа является форма изображения.

Форму изображения можно определить как множество изображений фрагмента облака, которые могут быть получены при всех возможных вариациях условий его формирования. К условиям формирования могут относиться, например, изменение условий освещенности, выдержки, цветокоррекции, некоторые способы последующего редактирования изображений. Задать форму изображения заданного фрагмента можно указав класс \mathbf{F} возможных преобразований изображения этого фрагмента, моделирующих изменение условий формирования облака. Обозначим через X множество всех точек кадра и выделим его подмножество H , на котором изображен выделенный фрагмент. Будем считать изображение заданного фрагмента функцией $\varphi(\xi, \eta)$ на $H: (\xi, \eta) \in H \subset X$. Форма изображения фрагмента запишется как множество $V_\varphi = \{\psi(\cdot, \cdot) : \psi(\xi, \eta) = F * \varphi(\xi, \eta), F \in \mathbf{F}\}$. Для удобства класс \mathbf{F} задают так, чтобы множество V_φ было выпуклым и замкнутым. В этом случае существует проектор P_φ на V_φ , а изображение ψ имеет форму V_φ (т.е. функция $\psi \in V_\varphi$) тогда и только тогда, когда проекция изображения $P_\varphi\psi$ совпадает с изображением ψ ($P_\varphi\psi = \psi$).

Для поиска фрагмента второго кадра, схожего по форме с выделенным фрагментом φ , по второму кадру передвигается подмножество H и при каждом его положении изображение ψ в нем сравнивается по форме с изображением φ . Критерием сходства является дробь

$$t(\psi) = \frac{\|\psi - P_\varphi\psi\|^2}{\|P_0\psi - P_\varphi\psi\|^2}.$$

Здесь $P_0\psi$ – проекция изображения ψ на множество изображений, равных константе [12, 16]. Дробь $t(\psi)$ тем меньше, чем меньше расстояние от ψ до V_φ и чем больше отличие $P_\varphi\psi$ от константы.

Найдя фрагмент второго кадра, наиболее схожий с выделенным фрагментом φ первого кадра, можем вычислить разность положений выбранных

фрагментов на первом и втором кадрах вдоль горизонтальной оси OX $|\xi_1 - \xi_2|$.

Результаты нахождения фрагментов изображений облаков, схожих по форме, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Стереопара изображений облаков, не согласованных по выдержке. Рамками отмечены фрагменты, наиболее близкие по форме

Здесь представлена стереопара изображений. На верхнем изображении в рамке содержится выбранный фрагмент изображения облака, на нижнем — в рамке фрагмент, наиболее близкий по форме к выбранному на верхнем изображении.

4. Оценка погрешности определения расстояния до облака

При неточно заданных параметрах фотосъемки погрешность определения D из соотношения (3) можно оценить по формуле

$$\Delta D = \left[\left(\frac{\partial D}{\partial B} \Delta B \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \xi_0} \Delta \xi_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \varphi_0} \Delta \varphi_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \xi_1} \Delta \xi_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \xi_2} \Delta \xi_2 \right)^2 \right]^{1/2}.$$

В табл. 1 приведены относительные погрешности определения высоты облаков для пары камер с полем зрения, известным с точностью $\pm 0,5^\circ$, и точностью определения стереобазы $\pm 0,1$ м в зависимости от разрешения камер, стереобазы и высоты облаков.

Таблица 1
Относительная погрешность определения высоты нижней границы облака в зависимости от его высоты, базы стереосъемки, разрешения камер для поля зрения камер около 60°

Высота облака, км	0,7	1,2	2,0	4,0	0,7	1,2	2,0	4,0
	640 × 480 пикселей				1600 × 1200 пикселей			
17	15%	27%	42%	83%	6%	10%	17%	34%
30	8%	14%	24%	47%	3%	6%	9%	19%
60	4%	7%	12%	24%	2%	3%	5%	10%

Точность определения высоты облаков уменьшается с увеличением расстояния до них, что, очевидно, связано с тем, что на фотографиях сравниваются угловые положения фрагментов облака, разница которых уменьшается при увеличении расстояния до объекта. Как видно из расчетов, увеличение разрешения камер и увеличение стереобазы ведет к повышению точности. При стереобазе 60 м и съемке с разрешением 1600 × 1200 пикселей в поле зрения 60° погрешность не превышает 10% до высот облаков 4 км.

5. Примеры оценки нижней границы облачности

Разработанная методика была опробована на серии стереоснимков, полученных на макете экспериментальной установки, состоящей из двух стационарно установленных и ориентированных в зенит цифровых фотокамер [8]. Расстояние между фотокамерами составляло 17 м и было ограничено размерами крыши ИФА им. А.М. Обухова РАН. Какая-либо аппаратура для точного выбора направления визирования камер не использовалась. Съемка проводилась с разрешением 640 × 480 пикселей при фокусном расстоянии 28 мм в эквиваленте 35 мм пленки. Поле зрения составляло около 60° .

В табл. 2 приведены результаты юстировки фотокамер по изображениям четырех звезд. В первом столбце дан номер звезды, второй и третий содержат координаты звезды на первом снимке (в пикселях), четвертый и пятый — ее координаты на втором снимке. По этим координатам оценен вектор аффинных преобразований. Шестой и седьмой столбцы дают оценки координат звезд на втором снимке, а восьмой и девятый — значения ошибок в вычислении этих координат. Надежность гипотезы о существовании аффинной связи между изображениями звезд в данном случае равна $\alpha(\xi_0) = 0,3$, что позволяет принять эту гипотезу.

Для валидации результатов проводилось одновременное измерение высоты с помощью ручного лазерного дальномера ЛПР-1. Дальномер ЛПР-1

**Результаты применения аффинного преобразования,
параметры которого (4) получены по результатам юстировки фотокамер по изображениям четырех звезд
(координаты даны в пикселях матрицы фотоаппарата)**

№ звезды	Координата $\xi_1^{(j)}$	Координата $\eta_1^{(j)}$	Координата $\xi_2^{(j)}$	Координата $\eta_2^{(j)}$	Оценка $\xi_2^{(j)}$	Оценка $\eta_2^{(j)}$	Ошибка $\xi_2^{(j)}$	Ошибка $\eta_2^{(j)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$j = 1$	843	798	734	735	736	735	-2	0
$j = 2$	935	792	829	721	825	720	4	1
$j = 3$	1141	572	1093	533	1094	533	-1	0
$j = 4$	1016	483	1009	481	1007	480	2	1

позволяет определять расстояние до двух первых отражающих объектов, находящихся в зоне от 145 до 5000 м с погрешностью не более 10 м. Для определения высоты прицел дальномера направлялся на облако, находящееся в зените. Результаты оценок нижней границы облачности по стереосъемке и данные лазерного дальномера приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнение результатов измерения расстояния до нижней границы фрагмента облака двумя методами.
Разрешение камер 640×480 пикселей**

Измерение по стереопарам		Данные лазерного дальномера ЛПР-1
Дата, время измерения	Высота, м	Высота, м
6.05.2014, 17:10	750 ± 110	740
7.05.2014, 10:15	900 ± 150	900
14.05.2014, 14:35	2260 ± 850	2085
15.05.2014, 10:20	3020 ± 2000	3900
01.08.2014, 11:45	3020 ± 2000	3400
06.08.2014, 18:45	2260 ± 850	2800
08.08.2014, 14:30	1290 ± 320	1240
11.08.2014, 16:02	1810 ± 700	2000
13.08.2014, 12:00	3020 ± 2000	2035
15.08.2014, 13:00	1290 ± 320	1600

Параметры съемки облачности выбирались камерами в автоматическом режиме и не всегда совпадали. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенных подходов. При этом реальная погрешность оказалась заметно меньше расчетной, что, по-видимому, связано с завышенными оценками погрешности параметров фотоаппаратуры.

Заключение

Рассмотрена методика экспериментального определения нижней границы облачности по стереосъемке с использованием простой и недорогой аппаратуры. Предложен метод, который может быть использован для автоматической обработки результатов измерений и получения высоты нижней границы облаков. При стереобазе 60 м и съемке с разрешением 1600×1200 пикселей в поле зрения 60° погрешность не превышает 10% до высоты облаков 4 км. Оптимизация параметров фотосъемки, в том числе увеличение стереобазы, может существенно

повысить достигнутую точность определения высоты нижней границы облачности. С использованием результатов выполняемой съемки в дальнейшем возможна разработка метода автоматической оценки скорости движения нижнего яруса облаков и балльности облачности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 14-07-00409 (разработка теории метода) и РНФ № 14-47-00049 (обработка экспериментальных измерений).

1. Голицын Г.С., Мохов И.И. Оценки чувствительности и роли облаков в простых моделях климата // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14, № 8. С. 803–814.
2. Иванов В.А., Постыляков О.В. Оценка интегрального содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы по наблюдениям рассеянной в зените солнечной радиации // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 471–475.
3. Иванов В.А., Елохов А.С., Постыляков О.В. О возможности оценки объема выбросов NO₂ в городах по зенитным спектральным наблюдениям рассеянной солнечной радиации вблизи 450 нм // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 544–549. DOI: 10.1134/S1024856012060061; Ivanov V.A., Elokhorov A.S., Postilyakov O.V. On the Possibility of Estimating the Volume of NO₂ Emissions in Cities Using Zenith Spectral Observations of Diffuse Solar Radiation near 450 nm // Atmos. Ocean. Opt. 2012, V. 25, N 6. P. 434–439.
4. Postilyakov O., Borovski A., Ivanov V. On determination of formaldehyde content in atmospheric boundary layer for overcast using DOAS technique // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96804O.1–96804O.10. DOI: 10.1117/12.2205925.
5. Голицын Г.С., Мохов И.И. Исследования по советской программе климатологии облачности и радиации // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1989. Т. 25, № 8. С. 891–895.
6. Дворяшин С.В. Дистанционное определение отношения объемных коэффициентов поглощения воды и льда в облаках в области спектра 2,15–2,35 мкм // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38, № 4. С. 523–528.
7. Zuev S.V., Krasnenko N.P. Passive method for cloud base height detection // Proc. SPIE. V. 6522. P. 65221S.1–65221S.6. DOI: 10.1117/12.723217.
8. Andreev M., Chulichkov A.I., Medvedev A.P., Postilyakov O.V. Estimation of cloud base height using ground-based stereo photography: Method and first results // Proc. SPIE. 2014. V. 9242. P. 924219.1–924219.7. DOI: 10.1117/12.2069824.

9. *Andreev M.S., Chulichkov A.I., Emilenko A.S., Medvedev A.P., Postilyakov O.V.* Estimation of cloud height using ground-based stereophotography: Methods, error analysis and validation // Proc. SPIE. 2014. V. 9259. P. 92590N.1–92590N.7. DOI: 10.1117/12.2069800.
10. *Зуев С.В., Красненко Н.П.* Экспериментальная проверка измерителя высоты облачности // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 86–89.
11. *Пытьев Ю.П.* Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 428 с.
12. *Пытьев Ю.П., Чуличков А.И.* Методы морфологического анализа изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 336 с.
13. *Mrovlje J., Vrancic D.* Distance measuring based on stereoscopic pictures // Proc. 9th International PhD Workshop on Systems and Control: Young Generation Viewpoint. Izola, Slovenia, 2008. V. 2. P. 1–6.
14. *Hartley R., Zisserman A.* Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 672 p.
15. *Walcher H.* Position sensing – Angle and distance measurement for engineers. 2 ed. Butterworth-Heinemann Ltd., 1994. 256 p.
16. *Чуличков А.И., Демин Д.С., Куличков С.Н.* Оценки относительного времени задержки сигналов, основанные на анализе их формы // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 6. С. 17–21.

A.I. Chulichkov, M.S. Andreev, G.S. Golitsyn, N.F. Elansky, A.P. Medvedev, O.V. Postilyakov.

On determination of height of cloud base using ground-based stereophotography.

The paper proposes and investigates the method of measuring the height of the cloud base using the stereo pair of images taken using two digital cameras. The method of determination of camera orientation parameters required to solve the problem uses images of the night star sky. To calculate the distance to the cloud, the image shift of a fragment of the cloud as a whole is used. The selection of the fragment in the photos is performed using methods of morphological image analysis. When the stereo base is 60 m and taking pictures with a resolution of 1200 pixels in the field of view of 60° the error does not exceed 10% at the height of the cloud base less than 4 km. Optimization of the parameters of photography, including the increase of the stereo base, can significantly improve the accuracy of the estimation the height of the cloud base. Examples of estimation of the height of cloud base on the layout of the experimental setup are compared with the measurements of the laser range finder.