

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1972

УДК 551.501.776

Т. Н. БИБИКОВА

БАЗИСНАЯ СЪЕМКА ОБЛАЧНОСТИ ДВУМЯ СФЕРИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ

В статье рассматривается вопрос о возможности вычисления при помощи базисной фотограмметрической съемки двумя сферическими зеркалами высот облачных полей небольшой вертикальной протяженности, имеющих более или менее одинаковую высоту нижнего основания.

В связи с бурным развитием спутниковой метеорологии вопросу изучения облачности мезо- и макромасштаба уделяется большое внимание. Для более детального исследования облачности мезовихрей, полосовой, ячейковой облачности струйных течений и т. д. весьма полезно сопоставление спутниковых и наземных наблюдений.

Одним из методов изучения таких облачных полей является фотографический метод. Так как масштаб вышеперечисленных явлений составляет от десятков до нескольких сотен километров, то необходимо применять такую наземную (фотографическую) аппаратуру, которая бы давала возможность получить на одном кадре как можно большую площадь.

Над вопросом расширения поля зрения фотоаппарата работы велись давно. Так, Георги в 1932 г. применил для фотографирования небесного свода посеребренные шары диаметром 45 см [1]. В 1934 г. Р. Вуд предложил фотографировать с помощью камеры, получившей название «рыбий глаз» [2]. Угол зрения в первом случае был больше 180° , во втором 180° , но на краях снимка получались большие искажения. Так, этот дефект пытались исправить в 1936 г. Зюринг [4], в 1939 г. Депперман [3], Хргиан А. Х. [5]. В 1949 г. А. И. Лебединский при наблюдении за полярными сияниями применил выпуклое сферическое зеркало [6], а в 1955 г. создал наиболее совершенную систему, состоящую из комбинации двух сферических зеркал (одного выпуклого и одного вогнутого), с углом зрения 180° . В 1956 г. Аркс сконструировал подобную систему с одним сферическим и одним параболическим зеркалами, где масштабная сетка практически линейно зависела от угла над горизонтом на всем снимке [7, 8]. В своих исследованиях Аркс показал, что при фотографировании небесного свода хорошие результаты получаются даже с одним сферическим зеркалом.

На кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ съемка всего небесного свода на один кадр через сферическое зеркало¹ применялась с 1957 г. при изучении общей картины расположения облачности и ее изменения во времени [9].

Для выяснения физики образования и развития облачных полей необходимо знать одну из основных характеристик облачности: ее высоту. Однако съемка с одного пункта любым фотоаппаратом не дает возможности определить высоту облачности. В экспедициях кафедры физики атмосферы для определения высот облаков применяется фотограмметрическая съемка специальными (разработанными на кафедре) аппаратами [10, 11]. При изучении протяженных облачных полей (высококучевых, волновых, перистых и т. д.) приходится делать несколько снимков и составлять монтаж, что очень трудно.

В 1967 г. для нахождения пространственных координат точек облачности больших облачных полей применили базисную съемку через сферические зеркала.

Вычисление пространственных координат точек облачности по снимкам, полученным через сферические зеркала

Прежде всего выбирается базис фотографирования от 3 до 5 км (из расчета 1 : 10 до максимально удаленных облаков), на концах которого устанавливаются выпуклые сферические зеркала с радиусом кривизны $R=370$ мм. Для ориентирования полученных снимков необходимо иметь направление на север (обычно получается фотографированием в

зеркале выставленной заранее марки) и азимут базиса (он определяется астрономическим путем по Солнцу).

Полученные снимки с данного базиса используют прежде всего для вычисления высоты облачного поля. Для этого рассмотрим рис. 1, где представлена схема плановой засечки точек облачности. Заштрихованная часть в обработку не включается из-за больших погрешностей, о чем будет сказано ниже. На двух снимках необходимо опознать и

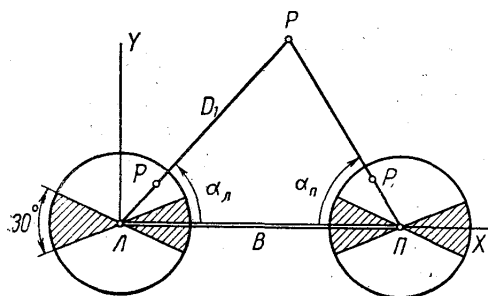


Рис. 1. Схема плановой засечки точек облачности

наколоть одни и те же точки облачности. Измерив радиус от центра снимка до наколотой точки и горизонтальный угол от направления базиса до измеренного радиуса, вычисляют $D_л$ — горизонтальную проекцию наклонной дальности до соответствующей измеренной точки облачности для левого конца базиса по формуле

$$D_л = \frac{b \sin \alpha_л}{\sin (\alpha_л + \alpha_п)}, \quad (1)$$

где b — длина базиса, приведенного к горизонту (горизонтальное проложение базиса), $\alpha_{п,л}$ — горизонтальный угол между базисом и направлением на соответствующую точку облачности для правого и левого концов базиса.

¹ В Советском Союзе наиболее широкоугольным объективом является «Руссар-38» с углом зрения 148°. На краях снимка получаются большие искажения.

Поправка за кривизну Земли и рефракцию не учитывается. Как показала оценка величин для удаления 50 км, эта поправка составляет 164 м. Как будет выведено ниже, ошибка в определении удаления для $D_{\text{л}}=50$ км составляет 1 км, т. е. ее величина на порядок больше поправки за кривизну Земли и рефракцию.

Измерение радиуса (от центра снимка до соответствующей точки облачности) и угла $\alpha_{\text{л,д}}$ удобно производить на радиалтриангуляторе или на стекометре, имеющем круговое вращение кассет, в которые закладывают снимки.

Для определения высоты облачности необходимо знать вертикальный угол γ между плоскостью горизонта и направлением на точку облачности (для левого конца базиса), который, согласно [12], определяется соотношением

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left[\frac{R+H}{R} \sin \left(\arctg \frac{r_k}{f} \right) \right] + \arctg \frac{r_k}{f}, \quad (2)$$

где

$$\arctg \frac{r_k}{f} = \beta, \quad (3)$$

r_k — радиус от центра снимка до наколотой точки, R — радиус кривизны сферического зеркала, H — высота фотоаппарата над сферическим зеркалом, β — угол между центральным лучом и лучом, проходящим через центр проекции и наколотую точку, f — фокусное расстояние объектива в момент съемки. (Следует иметь в виду, что фокусировка фотоаппарата для фотографирования через сферическое зеркало производится не на бесконечность, а на величину $H + \frac{R}{2}$.)

Для расчетов удобнее иметь зависимость угла $\beta=f(\gamma)$, которая, как следует из [12], определяется формулой

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{2 \frac{R+H}{R} - \cos \frac{\theta}{2}}. \quad (4)$$

Зная угол над горизонтом, γ или зенитное расстояние $\theta = \frac{\pi}{2} - \gamma$ соответствующей точки области и $D_{\text{л}}$ до нее, можно вычислить высоту

$$h = D_{\text{л}} \operatorname{tg} \gamma, \quad (5) \quad \text{или} \quad h = D_{\text{л}} \operatorname{ctg} \theta. \quad (6)$$

При этом $H=h_{\text{л}}+H_{\text{л}}$, где $h_{\text{л}}$ — высота определяемой точки облачности над точкой съемки левого конца базиса, $H_{\text{л}}$ — высота левого конца базиса над уровнем моря, H — абсолютная высота точки облачности.

Используя азимут базиса, можно вычислить по имеющимся формулам плановое положение точек облачности и в геодезической системе координат.

Получив ряд высот точек облачности на снимке, мы уже можем построить плановое положение облачного поля, изображенного на снимке. Следует отметить, что данный способ используется в основном для построения облачных полей небольшой вертикальной мощности, для которых высота нижнего основания колеблется незначительно. Это облачные поля высококучевых, высококучевых чечевицеобразных, слоистокучевых, перистых облаков. Для облаков, имеющих большое вертикаль-

ное развитие, необходимо будет все время учитывать изменение масштаба (по удалению) в зависимости от высоты точек облачности.

Вычисление палетки для получения планового положения облачности

Взяв среднюю высоту нижнего основания облачного поля (полученную как результат вышеуказанных вычислений), принимаем за ее основу для вычисления палетки, с помощью которой можно получать плановое положение облачности, изображенной на снимке.

Для этого на полученном снимке через равномерный шаг по формуле (3) вычисляют углы β и по формуле (2) зависящие от них углы γ . Для вычисленной указанным ниже способом средней высоты облачности по углам γ можно найти удаления $D_{\text{д}}$. На рис. 2 приведены кривые зависимости горизонтальной проекции наклонной дальности от радиуса на снимке для высот

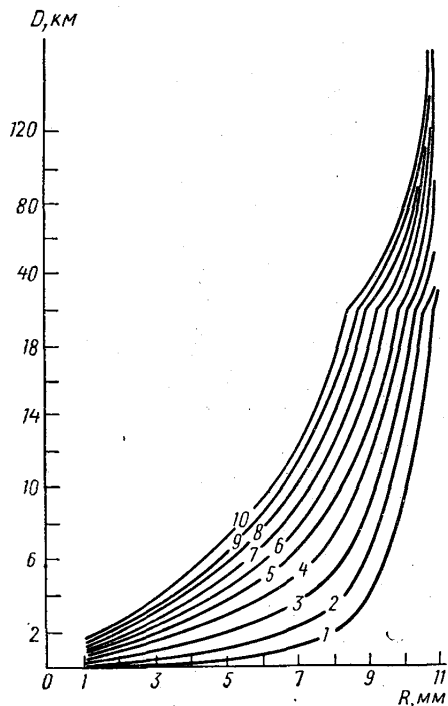


Рис. 2. Зависимость горизонтальной проекции наклонной дальности от радиуса на снимке, полученном через сферическое зеркало для $R=370$ мм. Цифры означают среднюю высоту облачного слоя

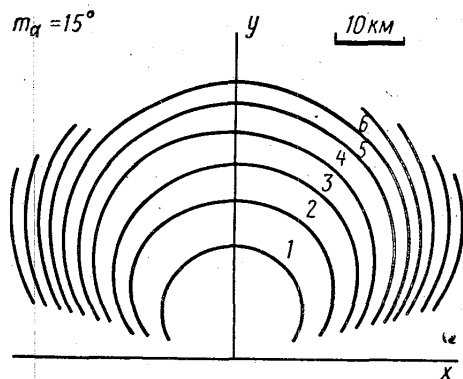


Рис. 3. Распределение средней квадратической ошибки вычисления горизонтальной проекции наклонной дальности

облачности от 1 до 10 км (через каждый километр высоты)¹. Все вычисления сделаны для сферического зеркала с радиусом кривизны 370 мм, применявшегося в экспедиции в 1967 г. Для других R нужен пересчет. Затем снимок делится на секторы через каждые 10° и проводятся окружности, кратные целому числу километров (по удалению), снятые с графика на рис. 2 для данной средней высоты облачности. Палетку можно нанести на прозрачную основу или непосредственно на фотоснимок. Если для обработки используют увеличенные снимки, то радиус, снятый с графика, умножают на увеличение.

Получение планового положения облачности осуществляется следующим образом. На листе бумаги наносится точка центра проекции

¹ Так как съемка ведется на обычную киноплёнку, то размер кадра 24×34 мм, а это значит, что максимальный радиус изображения облачности на снимке равен 11 мм.

(местоположение сферического зеркала). Из нее через 10° проводятся лучи и concentрические окружности радиусом, соответствующим удалению на палетке, в выбранном масштабе. Палетка накладывается на снимок, совмещается один из лучей с направлением на север, а центр палетки совмещается с центром снимка. Затем по клеткам переносится изображение со снимка на план. Ввиду того что эта работа очень трудоемка, на кафедре физики атмосферы ведется разработка устройства, позволяющего производить автоматическую развертку изображения облачности в план.

Оценка точности

Оценим точность вычисления $D_{\text{л}}$. Для этого рассмотрим формулу (1). Беря логарифмическую производную и заменяя приращения квадратами ошибок измеренных величин, для средней квадратической ошибки M получим выражение

$$m_{D_{\text{л}}}^2 = D_{\text{л}}^2 \left[\left(\frac{m_b}{b} \right)^2 + \text{ctg}^2 \alpha_{\text{л}} \left(\frac{m_{\alpha_{\text{л}}}}{\rho'} \right)^2 + \text{ctg}^2 M \left(\frac{M_m}{\rho'} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где m_{α} — ошибка вычисления горизонтальных углов $\alpha_{\text{л,п}}$, m_b — ошибка вычисления базиса, $\rho' = 3438$.

Учитывая точность измерения горизонтальных углов на снимке, полученном через сферическое зеркало ($m_{\alpha_{\text{л}}} = m_{\alpha_{\text{п}}} = \pm 15'$),

$$m_M^2 = m_{\alpha_{\text{л}}}^2 + m_{\alpha_{\text{п}}}^2 = 2m_{\alpha}^2; \quad m_M = m_{\alpha} \sqrt{2} = \pm 21',$$

и относительную ошибку вычисления базиса $m_b/b = 1:1000$, мы вычислили по формуле (7) график распределения средней квадратической ошибки определения горизонтальной проекции наклонной дальности D_1 (для первой четверти). Шаг по $\alpha_{\text{л}}$ был задан через 10° , а по D_1 через 5 км. Путем интерполяции проводились изолинии ошибок $m_{D_{\text{л}}}$, и в силу симметрии изображения в сферическом зеркале чертеж распространялся на всю полуплоскость. На рис. 3 приведен график распределения средней квадратической ошибки вычисления $D_{\text{л}}$. На осях x и y соответственно отложено удаление по линии базиса (с началом в левом конце) и перпендикулярно базису (в фотограмметрической системе координат). Цифрами на каждой кривой указано значение средней квадратической ошибки в километрах.

Из графика (рис. 3) видно, что точность определения $D_{\text{л}}$ сильно зависит от угла между направлением на облако и перпендикуляром к базису. Когда этот угол становится более 60° , задача вычисления $D_{\text{л}}$ становится неопределенной из-за резкого возрастания ошибки. Исходя из этого, нужно отбросить при обработке зону, заключенную в секторе, ограниченном лучами, отстоящими от линии базиса в обе стороны на 30° . (На рис. 1 указанная зона заштрихована.)

Аналогичным образом найдем среднюю квадратическую ошибку вычисления высоты точек облачности. Из формулы (6) получим

$$m_H^2 = H^2 \left[\left(\frac{m_{D_1}}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\cos \theta \sin \theta} \right)^2 \left(\frac{m_{\theta}}{\rho'} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где m_θ — ошибка определения зенитного расстояния. Величина ошибки D_π , входящая в формулу (8), берется из графика на рис. 3, а. Зенитное расстояние θ вычисляется по формуле (4), а величина его ошибки (средней квадратической) определяется формулой

$$m_\theta^2 = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} m^2 \beta}{\operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2} + \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{\left(2 \frac{R+H}{R} - \cos \frac{\theta}{2}\right)^2}} \quad (9)$$

Точность определения θ зависит от точности вычисления угла β , связанного с радиусом (на снимке) формулой (3). Средняя квадратическая ошибка вычисления угла β выражается формулой

$$m_\beta^2 = (\sin \beta \cos \beta)^2 \rho'^2 \left[\frac{m_{r_k}^2}{r_k} + \frac{m_f^2}{f} \right]. \quad (10)$$

Задав точность определения радиуса на снимке $m_r = 0,01$ мм, мы вычислили по формулам (9) и (10) график зависимости m_θ и m_β от r_k для различных θ и β .

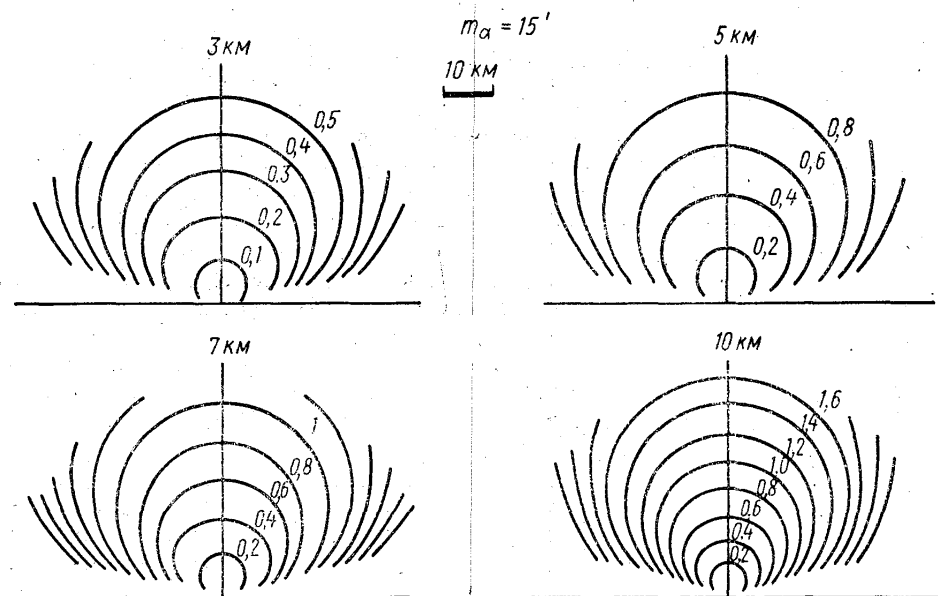


Рис. 4. Распределение средней квадратической ошибки вычисления высоты точек облачности (для средних высот облачного слоя 3, 5, 7, 10 км)

Исходя из этих графиков, была вычислена средняя квадратическая ошибка определения высоты точек облачности, которая приведена на рис. 4. При вычислении высоты по двум сферическим зеркалам в обработку не включается сектор, заключенный между лучами, отстоящими

вправо и влево от линии базиса на 30° . (На рис. 1 эта зона заштрихована.)

Определение высоты полей высококучевых облаков

Для иллюстрации всего вышесказанного нами были рассчитаны высоты полей высококучевых облаков, сфотографированных двумя сферическими зеркалами 8 августа 1967 г. в районе Щербатовки Рязанской области. Синоптическая ситуация в этот день была следующей. Проходил теплый фронт, что выражалось в поле облачности. С 17 час 20 мин до 18 час 35 мин наблюдались поля высококучевых облаков. В таблице цифрами отмечены точки, для которых были вычислены высоты по изложенной выше методике. Для контроля в этой же таблице даны высоты, вычисленные фотограмметрическим методом по базисным снимкам, сделанным специальными фототеодолитными насадками. Из сопоставления данных видим, что получается достаточно удовлетворительное согласие.

Определение высот высококучевых облаков

| Номера точек облачности | Высота точек по снимкам, через сферические зеркала, км | Высота точек по снимкам, полученным специальными фототеодолитами, км |
|-------------------------|--|--|
| 1 | 3,3 | 3,55 |
| 2 | 4,0 | 3,6 |
| 3 | 3,4 | 3,2 |
| 4 | 3,3 | 3,4 |
| 5 | 3,2 | 3,3 |
| 6 | 3,2 | 3,2 |
| 7 | 3,2 | 3,2 |
| 8 | 3,3 | 3,45 |
| 9 | 3,4 | 3,3 |
| 10 | 3,2 | 3,3 |

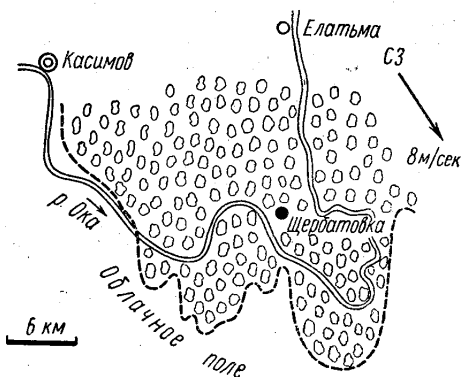


Рис. 5. Плановое положение высококучевых облаков 8 августа

Так как вертикальная мощность высококучевых облаков не превышала 300 м, то, взяв за среднюю высоту нижней границы облачности значение 3,3 км, мы смогли построить ее плановое положение, которое представлено на рис. 5. Благодаря тому что съемка производилась сериями из 3 снимков с интервалами в 2 мин, удалось вычислить скорость перемещения облачного поля. Она оказалась равной 8 м/сек, что соответствовало скорости потока на высоте облаков. Направление перемещения было северо-западным (указано на рис. 5 стрелкой) и совпадало с направлением общего потока.

Кроме того, обычно съемка ведется в течение всего светлого времени суток. Интервал между сериями колеблется от 15 до 30 мин. Это дает возможность проследить за эволюцией облачной системы и построить планово-временной разрез.

ЛИТЕРАТУРА

1. Georgii S. Fortlaufende Wolken und Nimmels aufnahmen Meteor. Zeitschr., В 50, 12, 1933.
2. Вуд Р. Физическая оптика. ОНТИ, М. — Л., 1936.
3. Depperman. Bull. Am. Met. Soc., 30, No. 8, 1949.
4. Süring R. Die Wolken. Leipzig, 1950.

5. Хргиан А. Х. К вопросу фотографирования облаков и одновременной съемки всего небесного свода. В тр. ЦАО, вып. 35, 1960.
6. Лебединский А. И. ДАН СССР, 102, № 3, 1955.
7. Агх W. S. Photographic Engineering 4(2), 1953, pp. 60—73.
8. Агх W. S. Sinoptic Photography Weater, XIII, No. 6, 1958.
9. Бибилова Т. Н. «Вестн. Моск. ун-та», мат., мех., астрон., физ., химия, № 2, 1960.
10. Кондратьев Н. Н. О методах и некоторых результатах базисной фотосъемки облаков. В тр. ЦАО, вып. 30, 1959.
11. Дюбюк А. Ф., Трубников Б. Н., Бибилова Т. Н. О влиянии горной топографии и моря на распределение летней облачности над Южным Крымом. В тр. Укр. НИГМИ, вып. 26, 1961.
12. Дюбюк А. Ф., Бибилова Т. Н. «Методология и гидрология», № 10, 1967 г.

Поступила в редакцию
29.4 1969 г.

Кафедра
физики атмосферы