

А.И. Гришин

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ПАССИВНЫМИ МЕТОДАМИ ЗОНДИРОВАНИЯ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 30.12.98 г.

Принята к печати 5.05.99 г.

Обсуждается метод определения высоты и скорости движения облачного поля пассивным методом при наблюдении из одной точки. Оцениваются возможности применения и погрешности данного метода. Приводятся результаты сравнительных измерений высоты и скорости движения облачности при помощи лидара и на основе предлагаемого метода.

Облачность в среднем покрывает 60% земной поверхности и для локальных регионов является важнейшим климатическим и погодообразующим фактором [1]. Прогнозирование облачности является задачей с множеством входных параметров, при решении которой в первую очередь необходимо учитывать взаимодействие облаков с барическими системами [2]. Данные системы определяют такие характеристики облачности, как высота и скорость перемещения, которые измеряются различными методами. Одним из наиболее перспективных методов зондирования высоты и скорости движения облачности является лидарный способ, позволяющий получать результаты оперативно и с высоким пространственным разрешением [3–5]. Однако применение лидарных методов связано с использованием достаточно сложной, дорогой техники, требует наличия квалифицированного персонала, что удорожает стоимость лидарных измерений и ограничивает область их применения. Целью данной работы является оценка возможности определения высоты и скорости перемещения облаков на основе пассивной методики.

Рассмотрим две схемы наблюдения за облачным полем, которое перемещается как единое целое в одном направлении. Первая схема для модели плоской поверхности представлена на рис. 1.

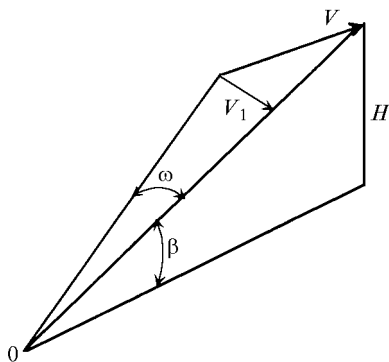


Рис. 1. Геометрическая схема наблюдения за облаками для модели плоской поверхности.  $O$  – точка наблюдения;  $V$  – линейное перемещение наблюдаемого участка облака за время наблюдения;  $V_1$  – его проекция на перпендикуляр к оси визирования;  $\omega$  – угловое перемещение элемента облака за время наблюдения;  $H$  – высота облака;  $\beta$  – угол места наблюдаемого элемента

Предполагается, что все элементы облачного поля движутся параллельно друг другу и векторы их движения компланарны земной поверхности. Если нормировать линейные и угловые перемещения на время измерений, то  $V$ ,  $V_1$  и  $\omega$  можно трактовать как соответствующие скорости. При наблюдении одного и того же элемента облака из двух разнесенных точек определение высоты и скорости облачности можно провести на основе триангуляционных методов. Поставим задачу определения высоты и скорости движения облаков на основе наблюдения из одной точки. Если считать значение  $\omega$  малым (короткое время наблюдения), то для  $V_1$  можно записать следующее выражение:

$$V_1 = \omega H / \sin \beta.$$

Как видно из уравнения, оно содержит два неизвестных ( $V_1$  и  $H$ ) и имеет смысл при  $\beta \neq 0$ . Увеличение числа уравнений за счет измерений при различных углах  $\beta$  не решает проблему, так как получаемая система уравнений имеет единственное тривиальное решение при  $H = 0$ .

Теперь рассмотрим другую схему наблюдения, учитывающую сферичность земной поверхности (рис. 2). В рамках тех же предположений, что и для модели плоской поверхности, можно записать следующее выражение:

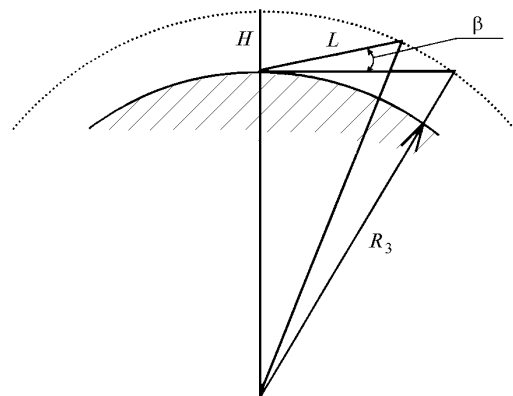


Рис. 2. Схема наблюдения за облаками с учетом сферичности Земли.  $H$  – высота облачности;  $L$  – расстояние до облаков, наблюдаемых в пригоризонтной области;  $R_3$  – радиус Земли

$$\omega_1 H = \omega_2 L. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – угловые скорости наблюдаемых элементов облачного поля для направления в зенит и в пригоризонтную зону соответственно. Если из визуальных наблюдений известно направление движения облаков, то можно выбрать направление по азимуту, перпендикулярному вектору движения облачного поля, тогда  $V_1 = V$ . В рамках данной геометрической схемы измерений уравнение (1) решается относительно  $H$  и  $V$ .

$$H = 2\omega_2^2 R_3 / (\omega_1^2 - \omega_2^2); \quad (2)$$

$$V = \omega_1 H. \quad (3)$$

В принципе, выражения (2) и (3) дают возможность расчета скорости движения и высоты облачности, однако практическая реализация данного метода затруднена. Это связано с тем, что наблюдениям в пригоризонтной области соответствуют большие оптические толщи, что вызывает уменьшение контраста облаков на фоне неба, тем самым затрудняя измерения или делая их невозможными.

Поэтому имеет смысл рассмотреть общую схему наблюдений при углах места, не равных нулю. Исходное уравнение для данного случая выглядит следующим образом:

$$(H + R_3)^2 = R_3^2 + L^2 - 2R_3 L \cos \alpha, \quad (4)$$

где угол  $\alpha = \pi/2 + \beta$ . В результате простых, но довольно громоздких вычислений это уравнение решается относительно  $H$ . В результате получаем следующее выражение:

$$H = 2R_3(1 + \cos \alpha \sqrt{k}) / (k - 1), \quad (5)$$

где  $k = \omega_1^2 / \omega_2^2$ . Легко проверить, что при  $\beta = 0$  формулы (5) и (2) эквивалентны. Скорость движения облачности для этого случая также определяется на основе выражения (3).

Анализ полученных формул показывает, что точность измерений на основе предложенной методики ограничивается погрешностями измерений угловых скоростей и направлений, а также методическими погрешностями за счет предположений, лежащих в основе данного способа. Оценим влияние каждого из данных факторов на суммарную оценку погрешности.

Измерение угловых скоростей можно проводить на основе теодолитных наблюдений. Так как погрешность измерения современных теодолитов весьма мала (единицы угловых секунд), то здесь может быть достигнута довольно высокая точность. Погрешность получаемых результатов зависит также от правильной оценки направления движения облаков. Получать эту характеристику можно как путем визуального наблюдения, так и методом анализа последовательности изображений облачного поля, регистрируемых при помощи направленной в зенит телевизионной камеры.

На рис. 3 представлены результаты расчета погрешностей в измерениях высоты облачности, обусловленных ошибками в определении угловой скорости  $\omega$  при углах  $\beta$ , равных 1, 2 и 3° (кривые 3, 2 и 1 соответственно). Анализ ошибок показывает, что зависимость  $\delta H$  от  $\delta \omega$  носит линейный характер, причем наклон линий зависит от угла наблюдения  $\beta$  и не зависит от высоты облачности  $H$ . Быстрое увеличение ошибки измерений с возрастанием угла  $\beta$  показывает, что существует оптимальный диапазон параметров измерений. Он определяется требуемой точностью измерений и ограничен оптическими характеристиками атмосферы, с одной стороны, и погрешностями определения угловых скоростей – с другой.

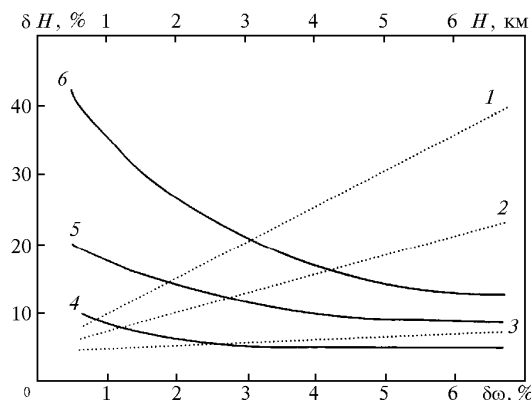


Рис. 3. Зависимость ошибки измерения высоты облачности  $\delta H$  от ошибки определения угловой скорости  $\delta \omega$  и высоты облаков  $H$

Кривые 4, 5 и 6 показывают зависимость  $\delta H$  при фиксированной точности измерений  $\omega$ , равной 1%, от высоты облачности  $H$  для углов наблюдения  $\beta$  1, 2 и 3° соответственно. Из графиков видно, что при увеличении высоты наблюдается быстрое уменьшение погрешности измерений, что указывает на возможность измерения более высоких облаков с меньшей погрешностью.

К ошибкам методического характера может привести предположение о равенстве высот и скоростей движения облаков, разнесенных на значительные расстояния. Для уменьшения погрешности за счет этих факторов для наблюдений необходимо выбирать наиболее крупные формы облачных полей, время жизни которых много больше времени измерений.

Экспериментальная проверка данного метода осуществлялась в Институте оптики атмосферы летом 1997 г. в течение недели. Измерениям соответствовала ясная, солнечная погода с дальностью видимости более 20 км. Исследуемые облака относились к кучевым с балльностью 10–20%, скорость перемещения изменялась в пределах 7–20 м/с, диапазон высот нижней границы облачности составлял 0,8–1,7 км. Контрольные измерения высоты облачного поля проводились при помощи ветрового корреляционного лидара «ЛИСА–1» с точностью 10–15 м, угловые перемещения регистрировались при помощи теодолита ЗТ–5КП.

Сравнение результатов, полученных двумя различными методами, показало, что в 65–70% случаев результаты измерений согласуются друг с другом вполне удовлетворительно. Средняя ошибка определения высоты облачности за весь период измерений составила 18%, что вполне достаточно для некоторых приложений. Дальнейшие пути уменьшения погрешности измерений на основе описанного метода возможны на основе применения специальных оптических систем, более мощных вычислительных средств и совершенствования алгоритмов обработки.

В частности, аппаратная реализация данного метода наилучшим образом может быть исполнена на оптических системах типа «ALL SKY», при помощи которых можно одновременно наблюдать всю небесную полусферу [6]. Кроме того, с помощью подобных устройств изображение небосвода может быть зафиксировано телекамерой и направлено в компьютер, где на основе современных алгоритмов осуществляется качественная обработка получаемых изображений [7]. Это позволяет, кроме достижения необходимой точности, полностью автоматизировать процесс получения искомой информации.

Таким образом, получено аналитическое выражение, позволяющее измерять высоту и скорость передвижения облаков на основе пассивной методики, и проведен эксперимент, подтверждающий применимость данного способа. Однако следует отметить и ограничения, свойственные данной методике. Серьезным ограничивающим фактором является сама структура облачности, нечеткость, размытость ее границ, а также ее трансформация за время измерений. При этом следует учесть, что для наблюдений по наклонным трассам время измерения возрастает за счет увеличения расстояния и, следовательно, для достижения необходимой точности нужно пропорционально увеличивать масштабы изучаемых структур. Облегчает ситуацию то обстоятельство, что при измерениях на разных дистанциях происходит автоматическое масштабирование, т.е. при увеличении расстояния лучше наблюдаются более крупные облачные формы.

Кроме того, необходимым условием работы данной схемы измерений является принадлежность наблюдаемых объектов к облачному полю, для которого существует равенство высот и линейных скоростей в двух пространственно разнесенных областях. Оценки показывают, что эти точки могут быть удалены на расстояния в десятки километров, поэтому для данной методики наиболее подходят облачные образования, принадлежащие крупномасштаб-

ным синоптическим объектам. Наличие многоярусной облачности, малый пространственный масштаб ее однородности, а также низкая прозрачность атмосферы могут существенно затруднить применимость данной методики.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам ИОА В.П. Галилейскому, А.М. Морозову, А.И. Колеватому, В.К. Ошлакову и А.И. Петрову за помощь в экспериментах и обсуждение результатов.

1. *Глобальный климат* / Под ред. Дж. Т. Хотона. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 502 с.
2. *Облака и облачная атмосфера* / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 640 с.
3. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.
4. *Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности* / Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1987. 259 с.
5. Lion K.N., Lohore H. Laser sensing of a cloud composition: a backscattering depolarization technique // *J. Appl. Meteor.* 1974. V. 13. N 3. P. 257–263.
6. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Панорамный фотометрический комплекс для контроля прямой и рассеянной солнечной радиации // *Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений* / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: изд-во СО РАН, 1997. С. 146–160.
7. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 790 с.

*A.I. Grishin. About a Possibility of Determining Nebulosity Altitude and Cloud Velocity by Passive Sounding Methods.*

The method of determination of the altitude and velocity of motion of the cloudy field by passive method at observation from one point is discussed. Possibilities of the applicability and errors of this method are estimated. The results of the comparative measurements of the altitude and velocity of motion of the nebulosity by lidar and proposed method are presented.