

УДК 551-576.5

Пассивный моностатичный метод оценки высоты и скорости движения облачности

В.П. Галилейский, А.И. Гришин, А.М. Морозов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 19.01.2012 г.

Рассматривается метод оценки высоты и скорости движения облачности по наблюдениям угловых скоростей в различных точках облачного поля. Обсуждается способ аппаратной реализации описанного метода.

Ключевые слова: высота облачности, скорость движения облачности, цифровое изображение облачного поля, угловая скорость; the cloud height, the velocity of the clouds, a digital image of the cloud field, the angular velocity.

Облачность является важным погодным и климатообразующим фактором. Состав облачности, ее балл, оптическая плотность, альbedo в значительной степени определяют радиационный баланс между нисходящей солнечной энергией и уходящей, влияющий на термодинамические процессы в атмосфере в дневное время и отток тепловой энергии в космос в ночное время.

Существующие в настоящее время методы определения высоты и скорости движения облачности связаны, как правило, с активными средствами, а именно посылкой зондирующих импульсов (оптических, акустических) в направлении облачности и регистрации отраженного излучения. Несмотря на положительные стороны этих методов, главный их недостаток — сложность использования в условиях разрывной и малой облачности, когда зондирующее излучение распространяется минуя облака.

В последние годы расширяется интерес к системам контроля процессов на основе визуальных средств регистрации. Этому способствует высокий уровень развития компьютерной техники, средств передачи информации и детекторов изображения. Современные детекторы изображений на основе ССD-матриц и, в особенности, СМOS-матриц характеризуются высоким разрешением по полю изображения и по уровню сигнала, высокой чувствительностью, быстрым действием и малым уровнем шума. Если учесть, что человек большую часть информации об окружающем мире получает через зрительное восприятие, что наиболее естественно для него, то становится понятным, почему так востребованы визуальные методы контроля в различных областях научной и прикладной деятельности.

Данная статья посвящена методу определения высоты и скорости движения облачности на основе измерения ее видимых угловых скоростей. Этот метод угловых скоростей может быть использован в средствах визуального контроля состояния облачности.

Основные положения метода угловых скоростей следующие:

1. Наблюдатель находится на поверхности Земли радиуса R .
2. Облачность или контролируемый фрагмент облачного поля перемещаются параллельно земной поверхности по дугам большого круга относительно центра Земли с постоянной линейной скоростью $V \neq 0$ и направлением.
3. Высота нижней границы облачного поля $H_{\text{НГ}}$ неизменна.

В основе рассматриваемого метода — угловые скорости $\langle \omega(A, z) \rangle$ видимого перемещения облачного поля, измеренные в различных его точках, где A и z — азимут и зенитное расстояние.

Для случая «плоской» Земли и, соответственно, плоской нижней границы облачного поля дальность до точки на высоте H определяется как $L = H / \cos z$, а видимая угловая скорость пропорциональна косинусу зенитного угла, и зависимость этого параметра от высоты отсутствует:

$$\omega(z) = \omega_0 \cos z,$$

где $\omega_0 = V/H$ — угловая скорость в зените.

Вследствие сферичности земной атмосферы, при условии соблюдения положений 1–3, отношения величин наблюдаемых компонент угловых скоростей (по азимуту $\omega_A(A, z)$ и зенитному расстоянию $\omega_z(A, z)$) в различных точках облачного поля значительно зависят от высоты облачности. В некоторых частных случаях, например при измерении угловых скоростей

* Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Александр Михайлович Морозов (moroz@iao.ru).

облачности в азимутах, перпендикулярных направлению движения облачности, соотношения, определяющие высоту облачности, имеют простое аналитическое решение. Подобный подход описан в статье [1], в которой для вычисления высоты облачности использовалось отношение угловых скоростей k на зенитном расстоянии z и в зените $k = \omega_z / \omega_0$. Более общее описание этого метода для случая двух произвольных точек с зенитными расстояниями z_1 и z_2 имеет также аналитическое решение:

$$H = R \left\{ \frac{1}{1-k^2} \left[(1+k^2)^2 + 2k(k \cos 2z_1 - 2(1+k^2) \cos z_1 \cos z_2 + k \cos 2z_2) \right]^{1/2} - 1 \right\},$$

где $k = \omega_{z2} / \omega_{z1}$.

То, что для измерений могут быть привлечены только данные, полученные в узком секторе азимутов, перпендикулярных направлению движения облачности с максимальной разницей по зенитному углу, делает этот метод ограниченно применимым. Более интересна возможность использовать измерения по всему облачному полю небосвода.

Рассмотрим полную схему движения облачности в соответствии с тремя пунктами принятых положений. Обратимся к рис. 1, где C — центр Земли, O — наблюдатель на поверхности Земли, CZ — направление в зенит. Линиями $(1-1)$, $(0-0)$ и $(1'-1')$ показаны линии тока облачного поля, движущегося на высоте H со скоростью V .

За основную примем плоскость вертикала, в которой находится наблюдатель O , совпадающую с направлением движения облачности $(0-0)$. Плоскость большого круга aCa , проходящая через зенит наблюдателя и произвольную точку P облачного поля, составляет с главной плоскостью угол A , который для наблюдателя является азимутом точки, а угол z — зенитным расстоянием. Несмотря на равномерное поступательное движение облачности, для наблюдателя видимая угловая скорость $\omega(z)$ будет нелинейной, поскольку изменяется расстояние L до точки:

$$L = \sqrt{(R+H)^2 - R^2 \sin^2 z} - R \cos z, \quad (1)$$

$$\omega(z) = V/L. \quad (2)$$

Введем относительно центра Земли угол ζ между вертикалом наблюдателя CZ и точкой P . Тогда положение точки можно будет задать двумя угловыми координатами ζ и A .

Поскольку для земной облачности $H \ll R$, то центральный угол ζ , как правило, не превышает $3-5^\circ$ и, значит, можем положить:

— плоскость вертикала, проходящего через точку P , пересекает линии тока облачности $(1-1)$, $(1'-1')$ и $(0-0)$ под одинаковым углом A ;

— сферический треугольник ZPP является прямоугольным.

Разложим вектор скорости \mathbf{V} в точке P на компоненты относительно плоскости aCa и направления визирования:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\zeta + \mathbf{V}_A,$$

где \mathbf{V}_A — компонента, перпендикулярная плоскости; \mathbf{V}_ζ — касательная к дуге большого круга $(a-a)$. В свою очередь компонента \mathbf{V}_ζ расписывается на две:

$$\mathbf{V}_\zeta = \mathbf{V}_z + \mathbf{V}_l,$$

\mathbf{V}_l направлена вдоль луча зрения (радиальная), \mathbf{V}_z — перпендикулярно ему. В соответствии с полученными компонентами линейных скоростей можно получить в угловом выражении:

$$\begin{aligned} \omega_A &= V \sin A/L, \\ \omega_z &= V \cos A \cos(z - \zeta)/L, \\ \omega_l &= V \cos A \sin(z - \zeta)/L, \end{aligned} \quad (3)$$

где L определяется по формуле (1), а $\zeta = L \sin z / (R+H)$.

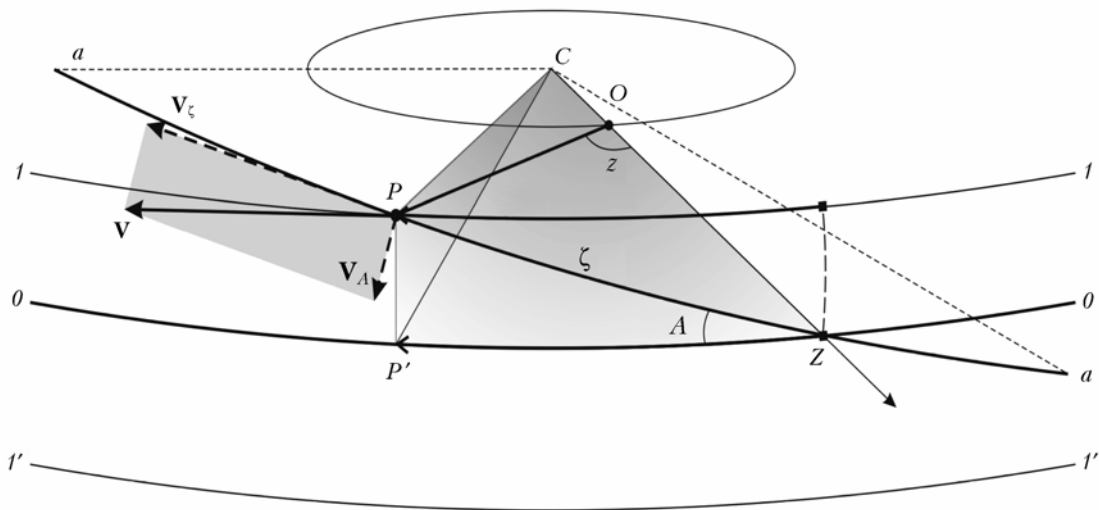


Рис. 1. Геометрическая схема наблюдения облачного поля с поверхности Земли

Для исключения в полученных соотношениях линейной скорости V возьмем отношение компонент в двух точках облачного поля P_1 и P_2 с координатами соответственно (A_1, z_1) и (A_2, z_2) :

$$\begin{cases} k_A = \frac{\sin A_2 L(z_1, H)}{\sin A_1 L(z_2, H)}; \\ k_z = \frac{\cos A_2 \cos(z_2 - \zeta(z_2, H)) L(z_1, H)}{\cos A_1 \cos(z_1 - \zeta(z_1, H)) L(z_2, H)}; \\ k_l = \frac{\cos A_2 \sin(z_2 - \zeta(z_2, H)) L(z_1, H)}{\cos A_1 \sin(z_1 - \zeta(z_1, H)) L(z_2, H)}, \end{cases} \quad (4)$$

где, как видно, остается одна неизвестная величина H . Привлекая соответствующие данные измерений отношения угловых скоростей $\tilde{k}_A = \omega_{A_2}/\omega_{A_1}$, $\tilde{k}_z = \omega_{z_2}/\omega_{z_1}$, и $\tilde{k}_l = \omega_{l_2}/\omega_{l_1}$ в точках P_1 и P_2 , получим уравнения, решение которых позволяет вычислить высоту нижней границы облачности H , а значит, и величину линейной скорости V .

Полученные уравнения (4), за исключением первого, аналитического решения относительно H не имеют, но решаются численными методами. Для вычисления высоты облачности могут быть использованы любые из этих соотношений. Однако если первые два из них $\tilde{k}_A(P_2, P_1)$ и $\tilde{k}_z(P_2, P_1)$ связаны с измерением видимых угловых перемещений деталей облачности и их достаточно легко измерить, то третье $\tilde{k}_l(P_2, P_1)$, визуальное связанное с изменением угловых размеров облачности, представляет собой достаточно сложную задачу.

Нужно отметить, что все эти уравнения при определенных значениях азимута становятся неопределенными и могут быть ограниченно применимы каждое в отдельности. Обойти эти ограничения можно, измеряя только видимую угловую скорость ω_v , которая есть сумма компонент по азимуту и зенитному углу:

$$\omega_v = \sqrt{\omega_A^2 + \omega_z^2} = \frac{V}{L} \sqrt{\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2(z - \zeta)}. \quad (5)$$

В этом случае расчетное уравнение для определения высоты будет иметь вид

$$\frac{L(z_1, H) \sqrt{\sin^2 A_2 + \cos^2 A_2 \cos^2(z_2 - \zeta(z_2, H))}}{L(z_2, H) \sqrt{\sin^2 A_1 + \cos^2 A_1 \cos^2(z_1 - \zeta(z_1, H))}} - \tilde{k}_v = 0,$$

где $\tilde{k}_v = \omega_{v_2}/\omega_{v_1}$ — отношение видимых угловых скоростей в точках P_1 и P_2 . Эта запись предпочтительнее, так как исключены неопределенности в уравнениях, а также улучшаются условия проведения измерений угловых перемещений.

В ходе изложения метода выводились формулы определения высоты облачности. Второй искомым параметр (линейная скорость) легко определяется по уже известной высоте и измеренным угловым скоростям облачности исходя из формул (1), (3), (5), если учесть, что измеряются только видимые компоненты угловой скорости ω_z и ω_A или ω_v .

На рис. 2 показаны области изменения различных компонент угловых скоростей при изменении зенитного расстояния точки поля облачности для различных азимутов ($A = 0, 45$ и 90°). Расчеты выполнены для условий $V = 10$ м/с, $H = 10$ км. Из расчетов видно, что если отдельные компоненты угловых скоростей ω_z и ω_A при определенных азимутах становятся неопределенными (рис. 2, а, б), то суммарная видимая угловая скорость ω_v остается значимой для измерений почти по всей небесной полусфере (рис. 2, в). Также здесь приведена зависимость радиальной скорости ω_l от зенитного расстояния (при $A = 0^\circ$) для различных высот облачности (рис. 2, г). Для $A \cong 90^\circ$ радиальная компонента равна нулю.

Следует отметить и ограничения, свойственные данной методике. Серьезными ограничивающими факторами являются 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, которые менее подвержены локальным изменениям.

Реализация данного метода наилучшим образом может быть исполнена на оптических системах типа «Fisheye» или «Allsky», при помощи которых можно наблюдать одновременно всю небесную полусферу [2, 3]. Цифровые фотокамеры, оснащенные подобными объективами, способны моментально фиксировать изображение всего облачного поля и передавать для обработки на компьютер. Это позволяет за счет увеличения объема измерительных данных с различных участков облачного поля достичь необходимой точности и полностью автоматизировать процесс получения искомой информации.

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.

Погрешность получаемых результатов во многом зависит 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 или системы типа Allsky.

На рис. 3 представлены результаты расчета погрешностей в измерениях высоты облачности, обусловленных ошибками в определении угловой скорости ω при углах места, равных $1, 5$ и 10° (кривые 3, 2 и 1 соответственно).

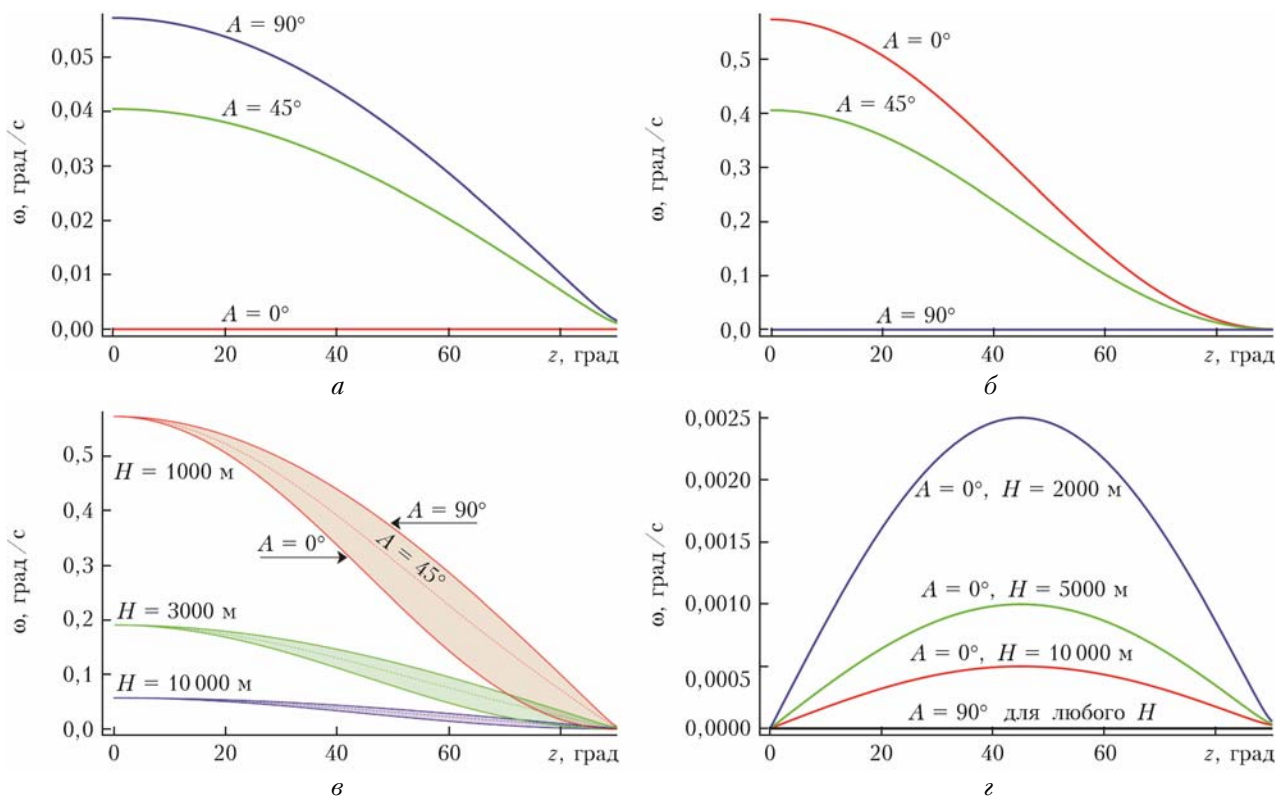


Рис. 2. Зависимость компонентов угловых скоростей поля облачности от видимого положения на небосводе. Приведены профили угловых скоростей в трех вертикальных плоскостях с азимутами $A = 0, 45$ и 90° относительно направления движения облачности. Расчеты выполнены для $V = 10$ м/с, $H = 10\,000$ м

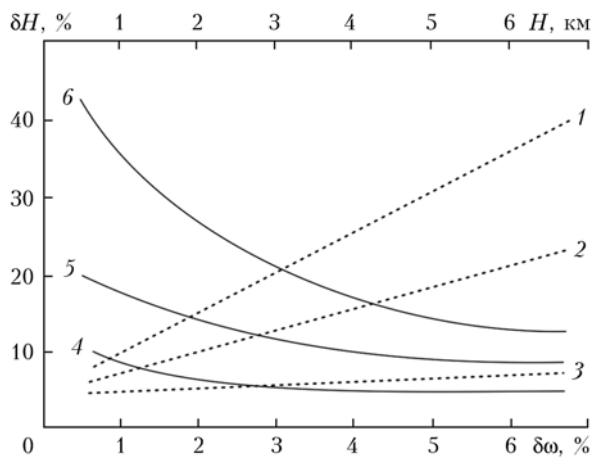


Рис. 3. Оценка погрешности определения высоты облачности в зависимости от ошибок $\delta\omega$ определения угловой скорости при различных углах места и от реальной высоты облачности

Анализ ошибок показывает, что зависимость δH от $\delta\omega$ носит линейный характер, причем наклон линий зависит от угла наблюдения и не зависит от высоты облачности H . Быстрое увеличение ошибки измерений с возрастанием угла показывает, что существует оптимальный диапазон параметров измерений. Он определяется требуемой точностью измерений и ограничен, с одной стороны, оптическими характеристиками атмосферы, с другой — погрешностями определения угловых скоростей.

Кривые 4, 5 и 6 показывают зависимость ошибки измерения высоты δH при фиксированной точности измерений $\delta\omega$, равной 1%, от высоты облачности H для углов наблюдения соответственно 1, 5 и 10° над горизонтом. Из графиков видно, что при увеличении высоты облачного поля наблюдается быстрое уменьшение погрешности измерений, что показывает на возможность измерения более высоких облаков с меньшей погрешностью.

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

Проверка предложенного метода проводилась в Академгородке г. Томска 20–25 июня 2010 г. Для регистрации облачного поля использовалась цифровая камера Canon EOS 40D с широкоугольным объективом типа Fisheye, имеющая поле зрения по большей стороне кадра 180° . В качестве контрольного прибора использовался флуоресцентный лидар [5], разработанный в ИОА СО РАН и позволяющий измерять высоту облачности с абсолютной погрешностью не более 10 м при условии вертикального направления зондирования. Данные накапливались и далее усреднялись по 256 реализациям.

Измерениям соответствовала слоисто-кучевая облачность типа C с бальностью от 40 до 100%. На рис. 4

представлены данные обработки по описанному методу последовательности изображений, полученные с помощью цифровой фотокамеры и на основе лидарных измерений.

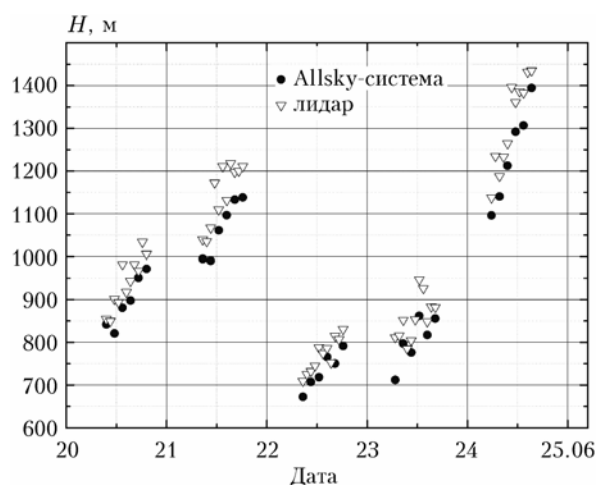


Рис. 4. Сравнительные измерения высоты облачности лидаром (треугольники) и Allsky-системой (кружки). Томск, Академгородок, 2010 г.

Видно, что данные, полученные различными методами, удовлетворительно совпадают друг с другом. Представленные графики демонстрируют две систематические особенности: суточный ход высоты облачности и небольшой сдвиг в оценке ее высоты. Возможное объяснение суточного хода связано с прогревом пограничного слоя атмосферы, усилением конвективных потоков и с подъемом точки росы [5–7]. Систематический сдвиг, возможно, связан с геометрическими особенностями лидарного зондирования на наклонных трассах и алгоритмом определения высоты облачности, заложенным в обработку лидарных сигналов.

В заключение можно сказать, что, несмотря на ограничения, описанный пассивный метод измерения высоты и скорости движения облачности может успешно применяться в условиях, когда требуется оперативная информация о характеристиках облаков и отсутствует аппаратура для активного зондирования атмосферы.

1. Гришин А.И. О возможности определения высоты и скорости движения облачности пассивными методами зондирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 7. С. 640–642.
2. Галилейский В.П., Зуев К.Г., Колеватов А.С., Морозов А.М., Ошлаков В.К., Петров А.И. Средство видеоконтроля для широкого круга технологических задач // Наука – производству. Институт оптики атмосферы. 2003. № 9. С. 66–70.
3. 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: Спектр, 1997. С. 146–160.
4. Гришин А.И., Креков Г.М., Крекова М.М., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я., Тимофеев В.И., Фатеева Н.Л., Лисенко А.А. Исследование органического аэрозоля растительного происхождения с помощью флуоресцентного лидара // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 328–338.
5. Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б. Нижняя граница облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 263–269.
6. Глобальный климат / Под ред. Дж.Т. Хотона. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 502 с.
7. Облака и облачная атмосфера / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 640 с.

V.P. Galileyskii, A.I. Grishin, A.M. Morozov. The passive monostatic method of estimation of the height and speed of the clouds movement.

A method of estimating the height and speed of movement of clouds from observations of the angular velocities at different points in the cloud field is considered. We discuss the hardware implementation of this method.