

М.Р. Гахраманова

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЗЕНИТНО-РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ОБЛАКОВ

M.R. Gahramanova

WAYS TO INCREASE THE ACCURACY OF GROUND ZENITH-RADIATION MEASUREMENTS OF OPTICAL DEPTH OF CLOUDS

Анализ точности известного зенитно-радиационного метода измерения оптической толщины облаков показал, что результат таких измерений подвержен сильному влиянию различных загрязнителей атмосферы, влияющих как на отражательные свойства вегетации, так и на пропускание атмосферы. Показано, что погрешность зенитно-радиационного метода, возникающая из-за загрязнителей атмосферы может быть лишь частично уменьшена, либо в зоне RED, либо в NIR проводимых измерений.

Ключевые слова: Облака, оптическая толщина, зенитно-радиационные измерения, облачный индекс, загрязнение атмосферы, растительность.

The analysis of accuracy of known zenith-radiation method for measuring of clouds optical depth has shown that results of such measurements suffer the strong impact of various pollutants of atmosphere, which effect on both the reflectance of vegetation and transmission of atmosphere. It is shown, that the error of zenith radiation method occurred due to pollutants of atmosphere can be decreased only partly in RED or NIR wavelength zones of carried out measurements.

Key words: Clouds, optical depth, zenith-radiative measurements, cloud index, atmospheric pollution, vegetation.

Хорошо известно, что наличие точных данных об оптической толщине облаков является важным условием вычисления радиационных свойств облаков. В работе [1] критически проанализированы два известных метода определения оптической толщины облаков путем измерения зенитной радиации на длинах волн 673 нм и 870 нм. Эти методы предусматривают наличие зеленой вегетации в окружающей местности. Актуальность рассмотрения этих методов объясняется тем, что ранее предложенный в работе [2] нормализованный дифференциальный облачный индекс *NDCI* не обеспечивал однозначную оценку оптической толщины облаков. Указанный вопрос рассмотрим на базе рис. 1, где схематически показано взаимодействие облака, вегетации и солнечной радиации. Отметим, что индекс *NDCI* определяется следующим образом [2]:

$$NDCI = \frac{I_{NIR} - I_{RED}}{I_{NIR} + I_{RED}},$$

где I_{NIR} , I_{RED} – переизлученная солнечная радиация, прошедшая цепочку «Вегетация – Облака» и повторно попадающая на поверхность Земли, и в том числе на вход наземного фотометра.

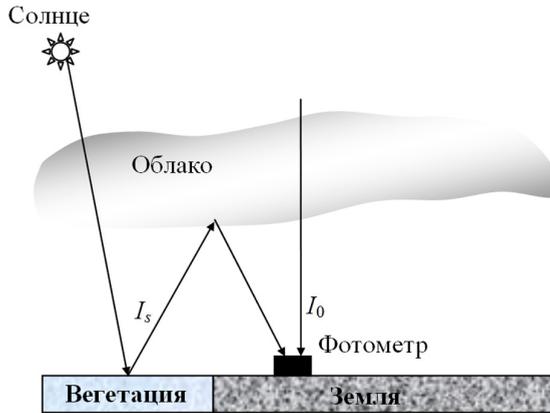


Рис. 1. Схематическое представление измерения оптической толщины облаков с использованием отраженной от вегетации радиации.

Как указывается в работе [1] такое определение облачного индекса не позволяет характеризовать и измерить оптическую толщину облака. В работе [1] это положение объясняется на основе графика показанного на рис. 2, где изображены точки *A* и *C*, для которых индекс *NDCI* имеет одинаковое значение, хотя эти точки характеризуют облака с совершенно различным значением оптической толщины.

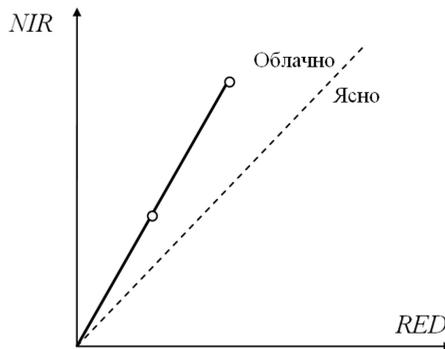


Рис. 2. Графическая интерпретация неоднозначности оценки оптической толщины облака с помощью индекса *NDCI*.

Вышеуказанное обстоятельство легло в основу разработки новых методов измерения оптической толщины облаков с помощью радиации Солнца, переотраженной от близлежащей вегетации [1]. В настоящей статье мы вкратце рассмотрим один из этих методов и укажем пути повышения его точности.

Метод, названный **REDvsNIR**, заключается в следующем. Проводятся измерения зенитной радиации на длинах волн 673 нм и 870 нм при присутствии вегетации

в близлежащей окрестности. Принимается плоско-параллельная модель облаков и Ламбертовская модель поверхности Земли. Согласно [1] результат наземного измерения радиации определяется как

$$I = I_0 + \frac{\rho I_s I_0}{1 - \rho R}, \quad (1)$$

где I_0 – радиация над земной неотражающей поверхностью вне вегетационного поля.

Второй член в выражении (1) определяет взаимосвязь облаков и подстилающей поверхности, где ρ – альbedo подстилающей поверхности; T_0 – пропускание атмосферы; R – сферическое альbedo облаков; I_s – радиация изотропического излучателя (вегетации) на поверхности.

Согласно [1] аппроксимируя T_0 как

$$T_0 = 1 - A_c + A_c \cdot T_{o.pp.}, \quad (2)$$

где A_c – пропускание облаков; $T_{o.pp.}$ – полное пропускание над черной земной поверхностью, можно получить следующие расчетные выражения для монохроматических зенитных радиаций $I_{RED}(\tau, A_c)$ и $I_{NIR}(\tau, A_c)$ [1]

$$I_{RED}(\tau, A_c) = I_{0,RED}(\tau) + \frac{\rho_{RED} I_{s,RED}(\tau) \cdot [1 - A_c - A_c \cdot T_{o.pp,RED}(\tau)]}{1 - \rho_{RED} R_{RED}(\tau)}, \quad (3)$$

$$I_{NIR}(\tau, A_c) = I_{0,NIR}(\tau) + \frac{\rho_{NIR} I_{s,NIR}(\tau) \cdot [1 - A_c - A_c \cdot T_{o.pp,NIR}(\tau)]}{1 - \rho_{NIR} R_{NIR}(\tau)}. \quad (4)$$

Для определения величины τ сначала I_{RED} и I_{NIR} вычисляются для некоторого диапазона величин τ и A_c в виде сверочной таблицы с учетом некоторой базы экспериментальных данных. Далее оптическая толщина облаков определяется путем сравнения измеренных величин I_{RED} и I_{NIR} с данными сверочных таблиц.

Как отмечается в [1] для плоско – параллельной модели облаков и наземной Ламбертовской поверхности, пропускание T определяется как

$$T = \frac{T_0}{1 - \rho_0 R}. \quad (5)$$

С учетом (1) и (5) получим

$$\begin{aligned} I_{RED} &= I_{0,RED} + \rho_{RED} \cdot T_{RED} \cdot I_{sRED}, \\ I_{NIR} &= I_{0,NIR} + \rho_{NIR} \cdot T_{NIR} \cdot I_{sNIR}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если оптические свойства облаков в двух каналах одинаково, то из (6) имеем

$$I_{NIR} - k \cdot I_{RED} = (\rho_{NIR} \cdot T_{NIR} - \rho_{RED} \cdot T_{RED}) \cdot I_s(\tau),$$

где

$$\begin{aligned} k &= \frac{I_{0,NIR}}{I_{0,RED}} = \frac{I_{s,NIR}}{I_{s,RED}}; \\ I_s(\tau) &= I_{sNIR} = I_{sRED} \cdot k \end{aligned}$$

Таким образом, получим

$$I_s(\tau) = \frac{I_{NIR} - k I_{RED}}{\rho_{NIR} \cdot T_{NIR} - \rho_{RED} \cdot T_{RED}}. \quad (7)$$

Далее в настоящей статье мы рассмотрим вопрос об обеспечении точности вычисления величины $I_s(\tau)$, в смысле нахождения условий неизменности знаменателя выражения (7) из-за внешних факторов. Очевидно, что наличие различных загрязнителей воздуха например, производственных труб, факельных установок, автомобильного транспорта и др. приводит к появлению следующих дуальных факторов, влияющих на точность вычисления $I_s(\tau)$:

1. Стресс вегетации;
2. Аэрозольное загрязнение атмосферы

Стресс вегетации приводит к появлению приращений у параметров ρ_{NIR} и ρ_{RED} , т.е. имеем

$$\rho_{NIR} = \rho_{NIR_0} + \Delta\rho_{NIR}, \quad (8)$$

$$\rho_{RED} = \rho_{RED_0} + \Delta\rho_{RED}. \quad (9)$$

Аэрозольное загрязнение атмосферы приводит к появлению приращений в пропуске атмосферы, т.е.

$$T_{NIR} = T_{NIR_0} + \Delta T_{NIR}, \quad (10)$$

$$T_{RED} = T_{RED_0} + \Delta T_{RED}. \quad (11)$$

С учетом (7) – (11) имеем

$$\rho_{NIR} \cdot T_{NIR} = \rho_{NIR_0} \cdot T_{NIR_0} + \rho_{NIR} \cdot T_{NIR} + T_{NIR_0} \cdot \Delta\rho_{NIR}. \quad (12)$$

Из выражения (12) находим условие нулевого прироста в первой члене у знаменателя выражения (7)

$$\frac{\rho_{NIR_0}}{T_{NIR_0}} = -\frac{\Delta\rho_{NIR}}{\Delta T_{NIR}}. \quad (13)$$

Также с учетом (7) – (11) можно вычислить следующее выражение:

$$\rho_{RED} \cdot T_{RED} = \rho_{RED_0} \cdot T_{RED_0} + \rho_{RED_0} \cdot \Delta T_{RED} + T_{RED_0} \cdot \Delta\rho_{RED}. \quad (14)$$

Из выражения (14) находим следующее условие нулевого прироста у второго члена в знаменателе выражения (7)

$$\frac{\rho_{RED_0}}{T_{RED_0}} = -\frac{\Delta\rho_{RED}}{\Delta T_{RED}}. \quad (15)$$

Переходя от приращений к дифференциалам выражения (13) и (15) запишем в следующем виде

$$\frac{\rho_{NIR}}{T_{NIR}} = - \frac{d\rho_{NIR}}{dT_{NIR}}, \quad (16)$$

$$\frac{\rho_{RED}}{T_{RED}} = - \frac{d\rho_{RED}}{dT_{RED}}. \quad (17)$$

Решение дифференциальных уравнений (16) и (17) дает

$$\rho_{NIR} \cdot T_{NIR} = 1, \quad (18)$$

$$\rho_{RED} \cdot T_{RED} = 1. \quad (19)$$

График выражения (17) и (18) приведены на рис. 3 и 4. Как видно из приведенных графиков, если учесть неравенство

$$T_{NIR} > T_{RED},$$

что объясняется уменьшением оптической толщины аэрозоля по длине волны, и

$$\rho_{NIR} > \rho_{RED},$$

что объясняется физиологией растений, то эквивалентное результирующее условие

$$T_{NIR} \cdot \rho_{NIR} > T_{RED} \cdot \rho_{RED}$$

будет противоречить выражениям (18) и (19) согласно которым

$$T_{NIR} \cdot \rho_{NIR} = T_{RED} \cdot \rho_{RED}.$$

Отсюда можно сделать вывод о том, что уменьшение погрешности определения $I_s(\tau)$ путем обеспечения стабильности произведений $T_{NIR} \cdot \rho_{NIR}$ и $T_{RED} \cdot \rho_{RED}$ возможно лишь частично, путем обеспечения стабильности одного из этих произведений. При этом выбор возможных вариантов частичного обеспечения стабильности должен быть осуществлен по критерию минимума суммарной нестабильности знаменателя выражения (7), а следовательно и минимума погрешности определения $I_s(\tau)$.

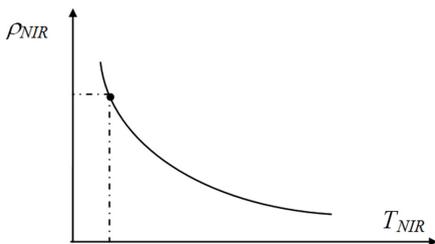


Рис. 3. График выражения (18).

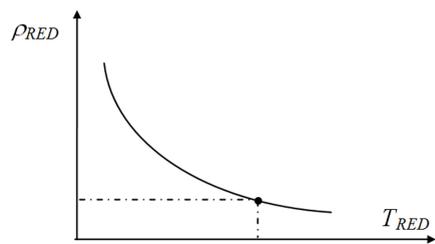


Рис. 4. График выражения (19).

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Анализ точности известного зенитно-радиационного метода измерения оптической толщины облаков показал, что результат таких измерений подвержен сильному влиянию различных загрязнителей атмосферы, влияющих как на отражательные свойства вегетации, так и на пропускание атмосферы.
2. Показано, что погрешность зенитно-радиационного метода, возникающая из-за загрязнителей атмосферы может быть лишь частично уменьшена, либо в зоне *RED*, либо в *NIR* проводимых измерений.

Литература

1. *Chiu J.C., Marshak A., Knyazikhin Y., Wiscombe W.J., Barker H.W., Barnard J.C., Luo Y.* Remote sensing of cloud properties using ground-based measurements of zenith radiance // *Journal of Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, D16201, doi: 10.1029/2005JD006843
2. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation // *Remote Sensing Environment*. 1979, No. 8, pp. 127-150