



УДК 551.508

ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАССОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ФОТОМЕТРА В БЕРЕГОВЫХ ЗОНАХ

Х. С. Халилова

Национальная Академия Авиации, г. Баку, Азербайджанская Республика

Предложен метод оптимизации береговых солнечно-фотометрических трассовых атмосферных измерений малых газов. Для оптимизации всей процедуры измерений применен вариационный метод. Исходным положением проводимой оптимизации является вводимое ограничительное условие, налагаемое на интеграл функции зависимости коэффициента мутности от длины проходимой трассы. Решена задача оптимального выбора длины волны проводимых измерений в зависимости от изменяющейся на трассе аэрозольной мутности атмосферы по критерию минимизации влияния аэрозоля на точность измерения малых газов по трассе. Проведенный анализ позволил графически определить зависимость используемой длины волны от длины пройденной дистанции по трассе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОПТИМИЗАЦИЯ, МАЛЫЕ ГАЗЫ, СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР, МУТНОСТЬ, АЭРОЗОЛЬ

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_10

<https://elibrary.ru/sfkwus>**1. ВВЕДЕНИЕ**

Как было отмечено в классической работе Ангстрема [1], предложенный им коэффициент мутности атмосферы β изменяется по географической широте (ψ), и по высоте рассматриваемой местности (h) по следующему выражению

$$\beta = (0,025 + 0,100\cos^2\psi) \cdot \exp(-0,7h) \quad (1)$$

где h измеряется в км выше уровня моря.

Отметим, в исторической работе Ангстрема [2] была предложена формула для вычисления оптической толщины атмосферного аэрозоля

$$\tau_{aer} = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

где α -показатель Ангстрема; λ -длина волны в мкм.

Как отмечается в работе [3], последующие исследования разных исследователей показало, что значение α может превышать 2,0 для свежего аэрозоля (дыма), но в то же время приближаться к нулю для крупнодисперсного пустынного аэрозоля. При этом значение β изменяется в пределах 0,1–0,3.

Электронная почта авторов для переписки:

Халилова Хадиджа Сабир гызы, e-mail: x.xalilova@mail.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

В дальнейшем, с развитием масштаба проводимых аэрозольных исследований в рамках деятельности всемирной сети AERONET было изучено зависимость β от метеорологических показателей, таких как влажность (RH), скорость ветра. Также изучалась зависимость β от движения воздушных масс, внутрисуточная зависимость и др. [3-5].

Как показали исследования проведенные в [6], отмечалось существенное изменения показателей мутности атмосферы при разных траекториях движения воздушных масс, что косвенно подтверждает верность исходной формулы, показывающей зависимость β от географической широты. Вместе с тем антропогенный аэрозоль, составляющий значительную долю суммарной аэрозольной загрязненности атмосферы, также оказывается зависящей от географических координат в силу неравномерного распределения населения на планете. Все эти факторы дают все основания полагать, что показатель β всегда имеет некоторый градиент по некоторой фиксированной трассе расположенной на поверхности планеты. Таким образом, если ставится задача проведения трассовых измерений каких-либо газов с помощью наземного мобильного спектрометрического измерителя, переносимого по трассе, то следует решать следующие задачи:

1. Как выбрать длину волны измерений;

2. Как учесть суммарное воздействие аэрозольной загрязненности атмосферы по трассе проводимых измерений;

3. Как учесть изменчивость степени аэрозольной загрязненности атмосферы по трассе;

Что касается применимости солнечных фотометров для проведения измерений малых газов в атмосфере, то необходимо отметить следующие обстоятельства:

4. Некоторые малые газы имеют достаточно широкий контур континуального поглощения. Например, озон (O_3) имеет континуальное поглощение в диапазоне 0,5–0,7 мкм;

5. В последние десятилетия появились солнечные фотометры с числом измерительных каналов (200–300) [7-9];

Вышеуказанные обстоятельства дают все основания сформулировать следующую оптимизационную задачу проведения многоволновых трассовых измерений малых газов:

При заданной географической направленности трассы длиной l следует определить оптимальный вид функциональной зависимости $\lambda = \lambda(\beta)$ и $\lambda = \lambda(l)$ при известной зависимости $\beta = \beta(l)$ по критерию минимального интегрального воздействия атмосферного аэрозоля на точность проводимых по трассе солнечно-фотометрических измерений. Далее излагается предлагаемый метод для решения поставленной задачи.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Задача исследования формулируется следующим образом. По трассе ($0 - l_n$) осуществляются мобильные измерения малых газов с использованием солнечных фотометров в диапазоне длин волн ($\lambda_{min} - \lambda_{max}$) (рис. 1).

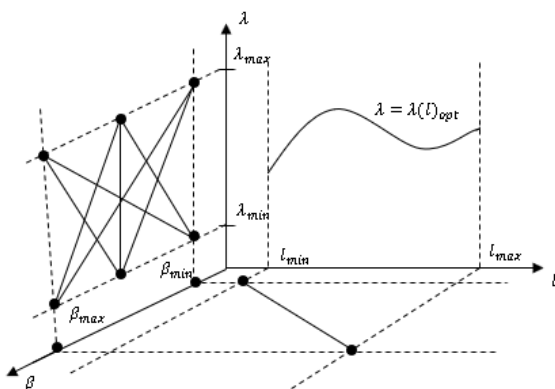


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи исследования. Индексами *min* и *max* обозначены минимальные и максимальные значения рассматриваемых переменных λ , l и β

Исходно заданными для решения оптимизационной задачи являются:

1. Известная зависимость β от текущей длины трассы, т. е. функция

$$\beta = \beta(l) \quad (1)$$

2. Ограничительное условие на искомую функциональную зависимость $\lambda = \lambda(\beta)$ в виде

$$F_0 = \int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \lambda(\beta) d\beta = C; \quad C = const \quad (2)$$

Требуется определить оптимальной вид функции $\lambda(\beta)$ при которой суммарное влияние атмосферного аэрозоля на результат проводимых измерений достигает минимума.

Следует отметить, базовой основой для проведения солнечно-фотометрических измерений является закон Бугера-Бера, согласно которому поток оптической радиации на входе наземного солнечного фотометра определяется по формуле

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-m(\tau_{aer} + \tau_{gas})] \quad (3)$$

где: $I(\lambda)$ -поток оптического излучения на входе фотометра; $I_0(\lambda)$ – поток оптического излучения на внешней границе атмосферы; m – оптическая воздушная масса; τ_{aer} – оптическая толщина атмосферного аэрозоля; τ_{gas} – оптическая толщина измеряемого малого газа.

С учетом (3) мультипликативную погрешность δ_m измерения $I(\lambda)$ определим как

$$\delta_m = I_0(\lambda)[\exp(-m\tau_{gas}) - \exp(-m\tau_{aer}) \cdot \exp(-m\tau_{gas})] = I_0(\lambda)\exp(-m\tau_{gas})[1 - \exp(-m\tau_{aer})] \quad (4)$$

Как видно из (4) при $\tau_{aer} \rightarrow 0$ имеем $\delta_m \rightarrow 0$. Следовательно, в качестве целевого функционала оптимизационной задачи логично взять следующее выражение

$$F_1 = \int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \tau_{aer}(\lambda(\beta)) d\beta \quad (5)$$

Суть решаемой оптимизационной задачи заключается в вычислении такой функции $\lambda(\beta)$ при которой функционал F_1 достиг бы минимального значения.

С учетом (1), (2) выражение (5) напомним, как:

$$F_1 = \int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \beta \lambda(\beta)^{-\alpha} d\beta \quad (6)$$

Учитывая (2) и (6), составим целевой функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$F_3[\lambda(\beta)] = \int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \beta \lambda(\beta)^{-\alpha} d\beta + \gamma \left[\int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \lambda(\beta) d\beta - C \right] \quad (7)$$

где: γ – множитель Лагранжа.

Согласно [10] решение задачи (7) должно удовлетворять условию:

$$\frac{d\{\beta \lambda(\beta)^{-\alpha} + \gamma \lambda(\beta)\}}{d\lambda(\beta)} = 0 \quad (8)$$

Из условия (8) получаем:

$$\lambda(\beta) = \sqrt[\alpha+1]{\frac{\beta \cdot \alpha}{\gamma}} \quad (9)$$

С учетом (2) и (8) условно приняв $\beta_{min} = 0$ получим:

$$C = \alpha^{+1} \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma}} \cdot \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} \right) \cdot \beta_{max}^{\frac{\alpha+2}{\alpha+1}} \quad (10)$$

Из (10) находим:

$$\gamma = \alpha \left[\frac{(\alpha + 1)}{(\alpha + 2)} \cdot \frac{\beta_{max}}{C} \right]^{\alpha+1} \cdot \beta_m^{(\alpha+2)} \quad (11)$$

С учетом (9) и (11) получаем:

$$\lambda(\beta) = C_1 \cdot \alpha^{+1} \sqrt{\beta}, \quad (12)$$

где

$$C_1 = \frac{C(\alpha + 2)}{(\alpha + 1) \cdot \beta_{max}^{\frac{2\alpha+3}{\alpha+1}}} \quad (13)$$

Таким образом, при условии (12), (13) целевой функционал F_3 достигает экстремума. Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную подинтегрального выражения целевого функционала. Имеем

$$\frac{d^2[\tau_{aer}(\lambda(\beta))]}{d\lambda(\beta)^2} = \beta \cdot \alpha(\alpha + 1)\lambda(\beta)^{-(\alpha+2)} \quad (14)$$

Таким образом искомая вторая производная всегда является положительной величиной. Следовательно, при решении (12), (13) суммарное влияние атмосферного аэрозоля на точность проводимых трассовых измерений малых газов достигает минимального значения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве конкретного примера если взять $\alpha = 1$ то из (12) и (13) получим

$$\lambda(\beta) = \frac{3C}{2\beta_m^{5/2}} \cdot \sqrt{\beta} \quad (15)$$

Условное отображение (15) в трехмерном пространстве $\{l, \lambda, \beta\}$ показано на рис. 2.

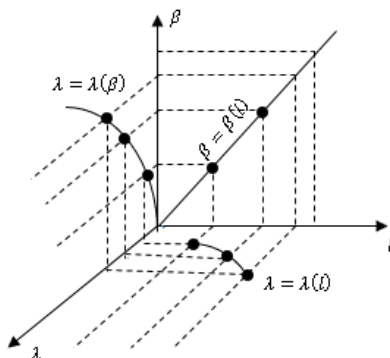


Рис. 2. Пример построения графика функции $\lambda = \lambda(l)$ на трехмерном пространстве $\{l, \lambda, \beta\}$

Как видно из диаграмм, показанных на рис. 2 известные функции $\lambda(\beta)$ и $\beta(l)$ позволяют графическое построение функции $\lambda = \lambda(l)$, т. е. оптимальную закономерность изменения длины волны по трассе измерений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен метод оптимизации трассовых атмосферных измерений малых газов с использованием солнечных фотометров. Исходным положением проводимой оптимизации является наличие данных о функции $\beta(l)$ по длине проходимой трассы и ограничительное условие, налагаемое на интеграл функции $\lambda(\beta)$. Сформулирована и решена задача оптимального выбора длины волны проводимых измерений в зависимости от изменяющейся на трассе аэрозольной мутности атмосферы. Решение указанной оптимизационной задачи по критерию минимизации влияния аэрозоля на точность измерения малых газов по трассе позволило графически определить оптимальную зависимость используемой длины волны от длины пройденной дистанции по трассе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Angstrom A.* Techniques of determining the turbidity of the atmosphere// *Tellus* 13. 1961. P. 214.
2. *Angstrom A.* The parameters of atmospheric turbidity// *Tellus* 16. 1964. P. 64-75.
3. *Voinea S., Stefan S.* Study of the Angstrom turbidity over Romanian Black Sea coast// *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*. Vol. 182. 2019. P. 67-78.
4. *Zaiani M., Irbah A., Djafer D., Listowski C., Delance J., Kaskaoutis D., Boualit S. B., Chouireb F., Mimouni M.* Study of atmospheric turbidity in a northern tropical region using models and measurements of global solar radiation// *Remote Sens.* 2021. 13. 2271. <https://doi.org/10.3390/rs13122271>.
5. *Mukherjee I., Chakraborty N.* Study on correlation of angstrom turbidity coefficient (β) with aerosol optical depth (τ) over a period of two years (2004-2006) for the special mangrove ecosystem of Sundarbans// *Open journal of air pollution*. 2012. P. 74-81. <http://dx.doi.org/10.4236/ojap.2012.13010>.
6. *Yakubu A. T., Chetty N.* Optical properties of atmospheric aerosol over Cape Town, Western cape of South Africa: Role of biomass burning// *Atmosfera* 34(4). 2021. P. 395-416. <https://doi.org/10.20937/ATM.52811>.

ISSUES OF CONDUCTING OPTIMAL TRACE MEASUREMENTS OF SMALL GASES USING A SOLAR PHOTOMETER IN COASTAL ZONES

Khalilova K.S.

A method for optimizing coastal solar-photometric trace atmospheric measurements of small gases is proposed. A variational method was used to optimize the entire measurement procedure. The initial position of the optimization is the introduced restrictive condition imposed on the integral of the function of the dependence of the turbidity coefficient on the length of the traversed route. The problem of optimal choice of the wavelength of measurements is solved depending on the aerosol turbidity of the atmosphere changing on the route by the criterion of minimizing the effect of aerosol on the accuracy of measuring small gases along the route. The analysis made it possible to graphically determine the dependence of the wavelength used on the length of the distance traveled along the route.

KEYWORDS: OPTIMIZATION, SMALL GASES, SOLAR PHOTOMETER, TURBIDITY, AEROSOL