Геополитика и экогеодинамика регионов.
Том 6 (16). Вып. 4. 2020 г. С. 214–220.

УДК 551.5

Х. Г. Асадов[1],
С. Н. Абдуллаева[2]

Методика рационального выбора зависимости оптической толщины атмосферы Линке, от оптической воздушной массы атмосферы

[1]НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика
[2]Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. *Статья посвящена предлагаемой методике определения зависимости оптической толщины атмосферы Линке от оптической воздушной массы атмосферы. Известные результаты различных ученых в этой области отличаются на 25% и отсутствует четкий порядок рационального выбора одного из них. В настоящей статье предложена методика определения такого вида указанной функциональной зависимости которая обеспечила бы экстремум интеграла формулы Линке. Предложенное модельное решение задачи показывает, что рациональным решением является такой выбор искомой функции, которая обеспечила бы максимум абсолютной величины разницы между выбранной функцией и решением модельной задачи, обеспечивающим экстремум интеграла формулы Линке.*

***Ключевые слова**: атмосфера, мутность. Оптическая толщина, оптимизация, оптическая воздушная масса.*

Введение

Вопрос об эффективности использования прямого солнечного излучения непосредственно связан с точностью оценки светимостью атмосферы, т. к. атмосфера фактически является единственным барьером, существенно ослабляющим мощность оптических солнечных лучей, поступающих на Землю. Исторически, для оценки влияния атмосферы на прохождение солнечных лучей на Землю были предложены и концептуально обоснованы такие физические показатели как аэрозольная мутность атмосферы Ангстрема [1]; широкополосный коэффициент мутности атмосферы Линке [2]; коэффициент мутности атмосферы Догниакса (Dogniaux) [3]. Прежде всего следует отметить, что мутность атмосферы связана с аэрозольной загрязненностью. Аэрозоли представляют собой твердые или жидностные частицы во взвешенном состоянии, имеющие размеры от нескольких нанометров до десятки микрометров.

Аэрозоли имеют различное происхождение, природными источниками аэрозолей являются вулканические извержения, пыльные бури, лесные пожары, морские волны и т. д. Антропогенными источниками аэрозоля являются сжигание ископаемого вида топлива, различные технологические процессы производства цемента, металлов и др. продукции. Мутность является важным показателем как загрязненности атмосферы, так и метеорологии и климатологии.

Постановка задачи

В общем случае, согласно [4], ослабление атмосферой прямого монохроматического солнечного луча определяется следующим выражением:

$$I_{n,\lambda} = I_{0n,\lambda} \cdot \tau_{\tau\lambda} \cdot \tau_{a\lambda} \cdot \tau_{\alpha\lambda} \cdot \tau_{g\lambda} \cdot \tau_{w\lambda} \quad (1)$$

где: $I_{0n,\lambda}$ – прямой монохроматический луч на внешней границе атмосферы, с длиной велны λ; $I_{n,\lambda}$ – часть того же луча, достигающая поверхность Земли; $\tau_{\tau\lambda}$ – пропускание атмосферы из-за Релеевского рассаяния Ми; $\tau_{\alpha\lambda}$ – пропускание атмосферы из-за поглощения озонового слоя; $\tau_{g\lambda}$ – пропускание атмосферы из-за поглощения различных малых газовых составляющих (кроме озона и водяных паров); $\tau_{w\lambda}$ – поглощение водяными парами.

Исторически, согласно [5], ослабление луча атмосферой было оценено сначала для монохроматической компоненты солнечного излучения в трудах Бугера.

Согласно Бугеру, пропускание атмосферы оценивается как

$$\tau_\lambda = \exp(-k_\lambda \cdot m) \quad (2)$$

где: k_λ – коэффициент ослабления на длине волны λ; m – относительная оптическая воздушная масса.

Применительно к широкополосному излучению Линке предложил оценить общую интегральную оптическую толщину безоблачной атмосферы δ в виде перемножения показателя δ_{CDA}, отображающего оптическую толщину атмосферы за исключением водяных паров и аэрозоля и коэффициента мутности Линке T_L, т. е.

$$I_n = I_0 \exp(-\delta \cdot m_a) = I_0 \exp(-\delta_{CDA} \cdot T_L \cdot m_a) \quad (3)$$

где: I_0 – интегральная широкополосная солнечная радиация, равная 1367 Вт/м^2; I_n – ослабленная прямая Солнечная радиация на поверхности Земли; m_a – относительная оптическая масса атмосферы.

Согласно [4], такая формулировка ослабления солнечной оптической радиации является особенно удобной для проведения широкополосных пиргелиометрических измерений. Вместе с тем, при использовании формулы (3) возникает проблема точного определения значения δ_{CDA} (здесь абревиатура CDA означает чистую сухую атмосферу, свободную от облаков, водяных паров и аерозолей); показатель T_L определяется в качестве того количества чистых сухих атмосфер, которые сообща привели бы к ослаблению I_0 до фактически наблюдаемого на Земле значения I_n из-за воздействия водяных паров и аэрозоля.

Что касается δ_{CDA}, то согласно трудам многих исследователей (см, например,[6-9]), этом показатель оказывается зависимым от m_a.

Так, например, согласно работе Кастена [6] имеется следующее соотношение

$$\delta_{CDA} = (9{,}4 + 0{,}9\, m_a)^{-1} \quad (4)$$

Отметим, что при выводе формулы (4) поглощение оптического излучения такими газами как CO, N_2O не были учтены.

В работе Лоуче (Louche) [7], была получена следующая зависимость

$$\delta_{CDA} = (5{,}4729 + 3{,}0312\, m_a - 0{,}6329 m_a^2 + 0{,}091 m_a^3 - 0{,}00512 m_a^4)^{-1} \quad (5)$$

В работе [4], предложена другая формула

$$\delta_{CDA} = 0{,}124 - 0{,}0285 \ln m_a \qquad (6)$$

Отметим, что каждая из формул (4), (5), (6) имеет свои преимущества и недостатки. Так, формула (4) достаточно проста для вычислений, однако, как было сказано выше, не учитывает поглощение некоторыми малыми газами; формула (5) учитывает поглощение оптической радиации малыми газами, вместе с тем, расчеты по формуле (5) отличаются от тех по формуле (4) на 25%. Формула (6) получена путем обработки методом наименьших квадратов, данных, полученных по уравнению (5) при $1 < m_a < 6$, а также по уравнению (4) при $m_a > 12$; в диапазоне $6 < m_a < 12$ формула (6) сответствует полиномиальной формуле Louche, полученной в [8].

Графики вычисленных значений δ_{CDA} по формулам (4), (5) и (6) приведены на рис. 1.

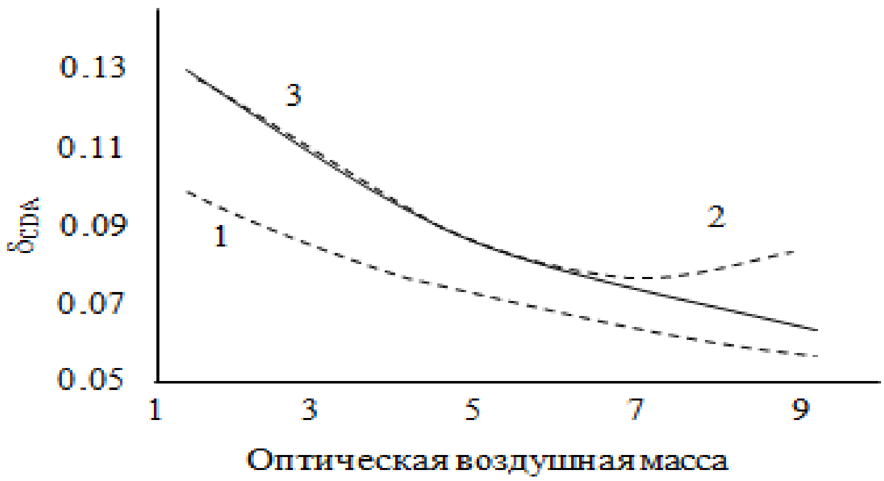

Рис. 1. Графики вычисленных значений δ_{CDA} по формулам (5), (6), (7) цифрами указаны:

1. Кривая, вычисленная по формуле (4).
2. Кривая, вычисленная по формуле (5).
3. Кривая, вычисленная по формуле (6).

Как видно из графиков, показанных на рис. 1, кривые 1 и 3 существенно различаются, а кривая 2 при $m > 9$ дает существенную погрешность.

Следовательно, перед исследовательями атмосферных оптических процессов возникает вопрос какую из вышеприведенных зависимостей $\delta_{CDA} = f(m)$ следовало бы применить при проведении оптических радиационных расчетов? Каковым должен быть критерий выбора одного из вышеуказанных зависимостей?

Ниже предлагается методика оптимального выбора зависимости $\delta_{CDA} = f(m)$.

Предлагаемая методика

1. Вычисляется следующий показатель

$$\text{C} = \frac{\sum_{i=1}^{3}\int_{1}^{10} f_i(m)dm}{3} \quad (7)$$

где $f_i(m)$ соответствует функции (4); $f_2(m)$ соответствует функции (5); $f_3(m)$ соответствует функции (6).

2. Вводится на рассмотрение понятие оптимально- расчетная функция $\delta_{CDA} = f_{\text{о.р}}(m)$.

   На функцию $f_{\text{о.р}}(m)$ налачается следующее условия:

2.1. Ограничительное условие:

$$\int_{1}^{10} f_{\text{о.р.}}(m) = \text{C} \quad (8)$$

2.2. Условие максимизации с помощью функции $f_{\text{о.р.}}(m)$ интегрированной по m величины достигшей земной поверхности ослабленной атмосферой широкополосной Солнечной радиации, т. е. выражение

$$I_{n.int} = \int_{1}^{m_{max}} I_0 \exp(-\delta_{CDA}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a)\, dm_a \quad (9)$$

с учетом

$$f_{\text{о.р.}} = \delta_{CDA}(m_a) \quad (10)$$

3. Составление и решение оптимизационной задачи нахождения такой оптимальной расчетной функции $f_{\text{о.р.}}(m)$ при которой нижеприведенный целевой функционал *F* достигает максимума

$$F = \int_{1}^{m_{max}} I_0 \exp\left[f_{\text{о.р.}}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a\right] dm_a + \lambda\left[\int_{1}^{m_{max}} f_{\text{о.р.}}(m_a)\, dm_a - C\right] \quad (11)$$

4. Из имеющеюся множества известных функций

$$S = \{f_i(m_a)\}$$

Определяется такая функция рациональная функция $f_{\text{о.р.р}}$, которая в наибольшей степени близка к решению $f_{\text{о.р.}f.}$ функционала (11).

Проведем теоретико-модельное исследование по применению предложенной методики.

Модельные исследования

Приведем модельное решение оптимизационной задачи (11).

Согласно [9] решение оптимизационной задачи (11) $f_{\text{о.р.}f.}$ должна удовлетворить

$$\frac{d\{I_0 \exp\left[-f_{\text{о.р.}}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a\right] dm_a + \lambda f_{\text{о.р.}}(m_a)\}}{d f_{\text{о.р.}}(m_a)} = 0 \quad (12)$$

Из условия (12) получим

$$-I_0 \cdot T_L \cdot m_a \cdot \exp\left[-f_{\text{о.р.}}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a\right] + \lambda = 0 \quad (13)$$

Из выражения (13) находим:

$$\exp\left[-f_{\text{о.р.}f}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a\right] = \frac{\lambda}{I_0 \cdot T_L \cdot m_a} \quad (14)$$

Логарифмируя (14) получим

$$f_{\text{о.р.}f}(m_a) \cdot T_L \cdot m_a = \ln \frac{I_0 \cdot T_L \cdot m_a}{\lambda} \quad (15)$$

Из (15) получим

$$f_{\text{о.р.}f}(m_a) = \frac{1}{T_L \cdot m_a} = \ln \frac{I_0 \cdot T_L \cdot m_a}{\lambda} \quad (16)$$

С учетом выражений (8) и (16) имеем

$$\int_1^{m_{max}} \frac{1}{T_L \cdot m_a} \ln\left[\frac{I_0 \cdot T_L \cdot m_a}{\lambda}\right] dm_a = \mathrm{C} \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$\frac{1}{T_L}\int_1^{m_{max}} \frac{1}{m_a} \ln[I_0 \cdot T_L \cdot m_a]\, dm_a - \ln\frac{1}{\lambda}\int_1^{m_{max}} \frac{1}{m_a} dm_a = \mathrm{C} \quad (18)$$

Обозначив определенные интегралы

$$\int_1^{m_{max}} \frac{1}{m_a} \ln[I_0 \cdot T_L \cdot m_a]\, dm_a = \alpha \quad (19)$$

$$\int_1^{m_{max}} \frac{dm_a}{m_a} = \beta \quad (20)$$

Из (18), (19), (20) получим

$$\frac{\alpha}{T_L} - \frac{[\ln(1/\lambda)]\cdot\beta}{T_L} = \mathrm{C} \quad (21)$$

Из (21) имеем

$$\ln\left(\frac{1}{\lambda}\right) = -\left[\mathrm{C} - \frac{\alpha}{T_L}\right]\frac{T_L}{\beta} = \left[\frac{\alpha}{T_L} - \mathrm{C}\right] \quad (22)$$

Из (22) получим

$$\frac{1}{\lambda} = \exp\left[\frac{T_L}{\beta}\left(\frac{\alpha}{T_L} - \mathrm{C}\right)\right]$$

(23)

или

$$\lambda = \exp\left[\frac{T_L}{\beta}\left(\mathrm{C} - \frac{\alpha}{T_L}\right)\right] \quad (24)$$

Учитывая (24) в (16) получим

$$f_{\text{o.p.}f}(m_a) = \frac{1}{T_L \cdot m_a} \cdot \ln \frac{I_0 \cdot T_L \cdot m_a}{\exp\left[\frac{T_L}{\beta}\left(\mathrm{C} - \frac{\alpha}{T_L}\right)\right]} = \frac{1}{m_a}\left[\frac{\ln(I_0 \cdot T_L \cdot m_a)}{T_L} - \frac{\left(\mathrm{C} - \frac{\alpha}{T_L}\right)}{\beta}\right]$$

(25)

Таким образом окончательное решение вышеприведенной модельной задачи имеет вид [25].

Проверка знака второй производной интегранта в (11) по $f_{\text{o.p.}}(m_a)$ показала, что она положительна.

Следовательно при решении (25) функционал (11) достигает минимальной величины. Отсюда следует вывод о том, что рациональный выбор функции $f\ (m_a)$ из множества *S* должен быть осуществлен по притерию достижения условия

$$f\ (m_a)_{\text{рац}} = \text{maxi}\{f_i(m_a) - f_{\text{o.p.}f}(m_a)\} \quad (26)$$

Выводы

Таким образом, общая концепция широкодиапазонной оценки суммарной солнечной радиации на уровне Зкмли, развитая такими учеными как Линке, Кастен Dognianx, Louche и др. имеет некоторую незавершенность, выраженную в том, что предложенные в разных трудах этих ученых функциональная зависимость оптической толщины атмосферы Лынке от относительной оптической воздушной массы отличаются на 25% и отсутствует более менее четкий порядок рационального выбора одного из них.

В настоящей статье предложена методика определения такого вида функциональной зависимости $\delta_{0\text{A}} = f_i(m_a)$, которая обеспечила бы экстремум интеграла формулы Линке.

Так как, проведенное модельное решение задачи показывает получение минимума указанного интеграла, то рациональным решением обьявляется такой выбор функции $f_i(m_a)$, которая обеспечила бы максимум интеграла абсолютной величины разницы между выбранной функцией и решением, обеспечивающим экстремум интеграла формулы Линке с учетом предварительно сформированного ограничительного условия наложенного на это решение.

Литература

1. Angstrom, A.: On the atmospheric of sun radiation and in dust in the air, Geogr. Ann., 2, 1929, P. 156–166
2. Linke, F.: Transmission Koeffizient und Trubungsfaktor, Beitr. Phys.Atmos., 1922, 10, P. 91–103
3. Dogniaux R. Representation Analytique des composantes du rayonnement solaire. Institut Royal de Meteorologie de Belgique. Serie A No. 83, 1974
4. Molineaux B., Ineichen P., Delaunay J. J. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity — inproving model performance // Solar Energy, 1995, Vol. 55, No. 2, P. 125–137
5. Middleton W. E. K. Random retlections in the history of atmospheric optic // J. Opt. Soc. Am. 50, 1960, P. 97–100
6. Kasten F. A simple parameterization of two pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. Meteorol. Rdsch. 1980, 33, P. 124–127
7. Grenier J. C., De La Casinierc A. and Cabot T. A spectral model of Linke's turbidity factor and its exsperimental implications. Solar Energy 52, 1994, P. 303–314
8. Louche A., Peri G., Iqbal M. An analysis of Like Turbidity factor. Solar Energy 37, 1986, P. 393–396
9. Эльгольц Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление, наука, Москва, 1972, 432 с.

H. G. Asadov[1], S. N. Abdullaeva[2]

Method for the rational choice of the dependence of the optical thickness of the Linke atmosphere on the optical air mass of the atmosphere

[1]Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Azerbaijan
[2]Azerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU), Baku, Azerbaijan

Abstract. *The article is devoted to the proposed method for determining the dependence of the optical thickness of the Linke atmosphere on the optical air mass of the atmosphere. The known results of various scientists in this area differ by 25% and there is no clear order of the rational choice of one of them. In this article, we propose a method for determining this type of the indicated functional dependence that would provide the extremum of the integral of the Linke formula. The proposed model solution to the problem shows that a rational solution is such a choice of the desired function that would provide a maximum of the absolute value of the difference between the selected function and the solution of the model problem, providing the extremum of the integral of the Linke formula.*

Keywords: *atmosphere, turbidity. Optical thickness, optimization, optical air mass.*

References

1. Angstrom, A.: On the atmospheric of sun radiation and in dust in the air, Geogr. Ann., 2, 1929, P. 156–166 (in English)
2. Linke, F.: Transmission Koeffizient und Trubungsfaktor, Beitr. Phys.Atmos., 1922, 10, P. 91–103 (in English)
3. Dogniaux R. Representation Analytique des composantes du rayonnement solaire. Institut Royal de Meteorologie de Belgique. Serie A No. 83, 1974 (in English)
4. Molineaux B., Ineichen P., Delaunay J. J. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity — inproving model performance // Solar Energy, 1995, Vol. 55, No. 2, P. 125–137 (in English)
5. Middleton W. E. K. Random retlections in the history of atmospheric optic // J. Opt. Soc. Am. 50, 1960, P. 97–100 (in English)
6. Kasten F. A simple parameterization of two pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. Meteorol. Rdsch. 1980, 33, P. 124–127 (in English)
7. Grenier J. C., De La Casinierc A. and Cabot T. A spectral model of Linke's turbidity factor and its exsperimental implications. Solar Energy 52, 1994, P. 303–314 (in English)
8. Louche A., Peri G., Iqbal M. An analysis of Like Turbidity factor. Solar Energy 37, 1986, P. 393–396 (in English)
9. El'gol'c L. E. Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie, nauka, Moskva, 1972, 432 s. (in Russian)

Поступила в редакцию 28.11.2020 г.