Графоаналитический метод компенсации влияния атмосферного аэрозоля при проведении измерений малых газов атмосферы с помощью гиперспектральных солнечных фотометров

Graph-analytical method for compensation of effect of atmospheric aerosol upon measurements of atmospheric trace gases using hyperspectral sun photometers

Асадов / Asadov H.
Хикмет Гамид оглы
(asadzade@rambler.ru)
доктор технических наук, профессор.
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства,
начальник отдела.
г. Баку

Абасзаде / Abaszadeh F.
Фуад Габиль оглы
(fabaszadeh@swt.az)
Национальное аэрокосмическое агентство,
докторант.
г. Баку

Ключевые слова: фотометр - photometer; измерения - measurements; атмосфера - atmosphere; аэрозоль - aerosol; поглощение - absorption.

Статья посвящена предложенному графоаналитическому методу компенсации влияния атмосферного аэрозоля при проведении измерений малых газов атмосферы с помощью гиперспектральных солнечных фотометров. Отмечено, что несмотря на принятие мер по устранению влияния атмосферного аэрозоля, проблема полного устранения этого влияния в гиперспектральных солнечных фотометрах остается актуальной. Разработан графоаналитический метод практически полного устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат гиперспектральных солнечно-фотометрических измерений включающий в себя этапы: (а) Проведение четырехволновых солнечно-фотометрических измерений; (б) Проведение графической процедуры вычисления оптической толщины исследуемого газа. Составлен операционный алгоритм реализации предложенного метода.

The paper is devoted to graph-analytical method suggested for compensation of effect of atmospheric aerosol in measuring of atmospheric trace gases using hyperspectral sun photometers. It is noted that despite taken measures on removal of impact of atmospheric aerosol the problem on full removal of such effects in hyperspectral sun photometers remains as actual. The graph-analytical method for practically full removal of impact of atmospheric aerosol on results of hyper-spectral sun-photometric measurements including such stages as (a) carrying out of four wavelengths sun photometric measurements; (2) carrying out of graphic procedure for calculation of optical depth of researched gas is developed. The operational algorithm for realization of suggested method is composed.

Развитие гиперспектральной измерительной техники на примере гиперспектрометров в течение последних трех десятилетий неизбежным образом оказало влияние и на тенденции развития солнечных фотометров. В течение последнего десятилетия появляются сведения о разработке солнечных фотометров с числом спектральных каналов превышающих сотню [1, 2]. Так, например, в работе [1] сообщается о разработке солнечного фотометра 4 STAR на основе принципа дифракционной спектроскопии, обладающего следующими основными характеристиками:

Спектральное разрешение: 2-3 нм, в диапазоне 350-1015 нм

Дипамический диапазон входного сигнала: 5-10 нм, в диапазоне 900-1700 нм

В работе [2] сообщается о разработке автономного морского гиперспектрального солнечного фотометра обладающего нижеуказанными основными характеристиками:

Спектральное разрешение:

В режиме работы 1: 6 нм в диапазоне 350-1050 нм

В режиме работы 2: 3,5 нм, в том же диапазоне

Традиционно основой появления погрешности измерений в солнечных фотометрах является атмосферный аэрозоль. Обычно разработчики солнечных фотометров предусматривают аппаратурные и програмные методы и средства для уменьшения этой погрешности.

Однако уменьшить эту погрешность до нуля пока не удается. Так, например, согласно [2] с помощью мер коррекции оптическая толщина аэрозоля, влияющая на результат измерения, установлена на уровне 0,05 для моского аэрозоля и 0,5 для пылевого аэрозоля.

Очевидно, что для принятия дальнейших мер по уменьшению влияния атмосферного аэрозоля на результат измерения современными солнечными

3 2019 nnnnnnn.indd 120 19.09.2019 11:07:44

фотометрами необходимо детально анализировать оптические и микрофизические свойства атмосферного аэрозоля. В этой связи, как нам представляется, особый интерес представляет изучение и учет многослойной структуры атмосферного аэрозоля. Как сообщается в работе [3], экспериментальные исследования аэрозольной загрязненности атмосферы над Средиземным Морем показали, что вертикальная структура нижней тропосферы состоит из нескольких мутных слоев, расположенных в высотном интервале 2-5-4 км. Ниже чистой, незагрязненной области тропосферы существуют три основных слоя аэрозоля.

Самый нижний слой содержит морскую аэрозоль. Слой пыльных частиц был обнаружен в высотах 1,2-5-2 км, вплоть до 4 км. Между этими слоями находился смесь вышеуказанных типов аэрозоля. При этом было обнаружено, что пылевые частицы формируют более чем половину суммарной оптической толщины атмосферного аэрозоля, изменяющегося в пределах 0,15-=-0,35. На рис. 1 показаны кривые зависимости коэффициента экстинкции указанных типов аэрозоля от высоты [3].

Следует отметить, что многослойная структура тропосферного аэрозоля также существует и в горной местности. Так, например, согласно работе [4], аэрозольный слой в горной местности определяется путем нахождения той области высоты, где отношение обратного рассеяния уменьшается с ростом высоты. Как видно из графика, показанного на рис. 2, отношение обратного рассеяния существенно различно по высоте в слое аэрозоля А - В.

где B_a - коэффициент обратного рассеяния аэрозоля;

B_m - молекулярное рассеяние, высоты [4].

Приведенные выше примеры послойного характера размещения тропосферного аэрозоля по высоте в некотором роде являются обоснованием того, что суммарная оптическая толщина атмосферного аэрозоля (т) часто вычисляется в виде обычной суммы оптических толщин мелкодисперсного (ту) крупнодисперсного **(тe)** аэрозоля по формуле [5-5-7].

(1)

Более полное обоснование возможности такого суммирования оптических толщин мелкодисперсного и крупнодисперсного франций атмосферного аэрозоля представлено в работе [7]. Согласно этой работе, совместное использование солнечных фотометров и многоволновых лидаров позволяет определить коэффициенты экстинкции обоих фракций аэрозола. Вместе с тем, как было показано в работе [8], для устранения влияния аэрозоля на результаты солнечно-фотометрических измерений знание этих коэффициентов не требуется. Приведем краткое доказательство данного утверждения, базирующееся на классической формуле Ангстрема:

$$= | 3\text{-}Г \qquad (2)$$

где: Р - мутность атмосферы Ангстрема, определяемая как

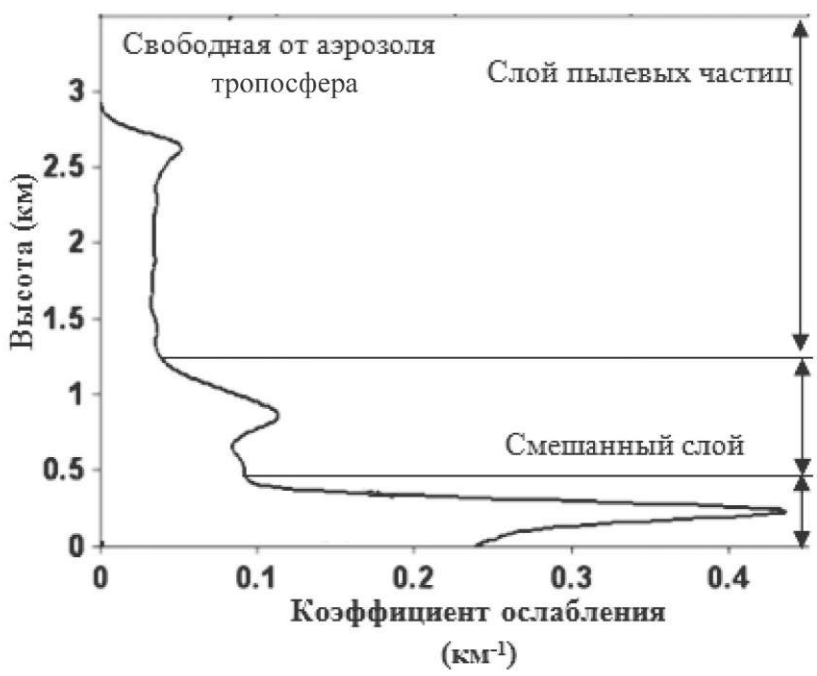

Рис. 1. Зависимость коэффициента ослабления трех типов аэрозоля от высоты

3 2019 ••••••••.indd 121 19.09.2019 11:07:49

$$P = m_a (Л, = \backslash мкм) \quad (3)$$

а - показатель Ангстрема.

В работе [8] ставилась задача устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат измерения малых газов с помощью солнечного фотометра. Для решения данной задачи предлагается проводить трехволновые измерения на длинах волн Я,ь X_2, ^-з где: $A_i < X_2 < X_3$. При этом предполагается, что на длинах волн A_i и Хз полос поглощений каких-либо газов нет. В результате проведенных измерений получим следующие оценки пропускания атмосферы на указанных длинах волн.

$$\Gamma(Я,_1) = \exp[-(т_в(A,_1))] \quad (4)$$

$$\Gamma(X_2) = \exp[-(т_в(X_2) + т_в(X_2))] \quad (5)$$

$$\Gamma(A,_3) = \exp[-(т_в(Л,_3))] \quad (6)$$

С учетом выражения (1) полагается, что для ($т_г$) и СО справедливы следующие выражения:

$$\quad (7)$$

$$V \quad p \; гX\sim \quad (8)$$

где: P_c - аэрозольная мутность атмосферы для крупнодисперсной фракции;

Р/ - аэрозольная мутность атмосферы для мелкодисперсной фракции аэрозоля;

a_c - показатель Ангстрома для крупнодисперсной фракции аэрозоля;

а/ - показатель Ангстрома для мелкодисперсной фракции аэрозоля.

Далее в работе [8] вводится промежуточный параметр

$$TM \quad (9)$$

где: k_u $к_2$- коэффициенты коррекции и с учетом выражений (4-9) формируется следующая система уравнений для вычисления коэффициентов коррекции к\ и

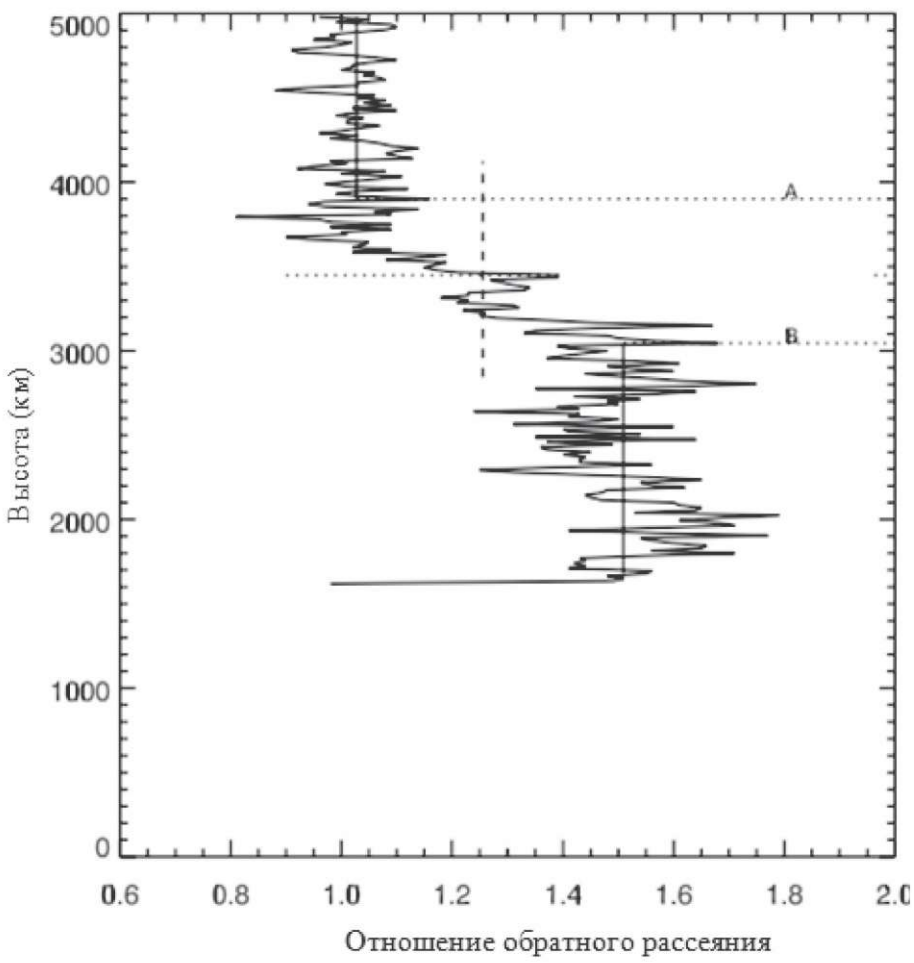

Рис. 2. График измерения отношения обратного рассеяния, определяемого как $B = \frac{B \quad B_{\prime\prime}}{B.}$

3 2019 nnnnnnn.indd 122 19.09.2019 11:07:44

(10)

к^ * ^ 4- * ^з ^ = ^ (11)

Решая систему уравнений (10), (11), вычисляют *к\, к₂* и, используя вычисленную на основе результатов измерений величину у, определяют Т2(Я₂), используя для этого выражение (9) и известные выражения для пропускания атмосферы.

Вместе с тем следует отметить, что методика, предложенная в [8], является несколько приближенной, т.к. формула Ангстрема (2) для мелкодисперсных фракций аэрозоля является весьма приближенной, что в конечном счете может привести к значительной погрешности измерений.

Рассмотрим возможность дальнейшего развития методики, предложенной в [8], с учетом современных моделей оптической толщины атмосферного аэрозоля.

Как сообщается в работе [9], оптическая толщина аэрозоля по современным представлениям определяется по следующей формуле

$$1\text{пх}(A,) = a_0 + a_1(1\text{пЯ},) + a_2(1\text{пX})^2 \qquad (12)$$

где: ао, аь являются постоянными величинами.

Из выражения (12) находим

$$\text{т}(A.) = \exp[a_0 + a_1(1\text{пЯ},) + a_2(1\text{пA},)^2] \qquad (13)$$

Допустим, что проведены четырехволновые измерения на длинах волн А,i, X_2, Хз и Х* где Я4 > А,з > X_2 > Xi совпадает с длиной волны поглощения исследуемого газа. При этом целью измерений является определение оптической толщины атмосферного газа, линия поглощения которого совпадает с длиной волны ^ Как и прежде ставится цель устранить влияние атмосферного аэрозоля на результат измерений.

Обозначив пропускания атмосферы на длинах волн *X2, Xi,* **Я,₄** как *1XX{), T\ X₂), T(X₃)* **и** *T(Xi)* напишем

$$\mathbf{TiXJ^1 = exp[exp[a_0 + a_1(ln;\backslash,_1) + a_2(lnX_1)^2]]} \qquad (14)$$

$$\mathbf{T\{X_2)\sim^1 = exp[exp[a_0 + a_1(lnX_2) + a_2}(\ln A._2)^2] + T_g(A,_2)]$$

$$\mathbf{\Gamma(A,_3)^{-1} = exp[\hat{}exp[a_0 + a_1(lnA,_3) + a_2}(\ln X_3)^2]\mathbf{J} \qquad (16)$$

$$\mathbf{T\ (Я,_4)^{-1} = exp\ [exp\ [a_0 + a_t\ (In\ X_4) + a_2\ (In\ X_4)^2\ ]]} \qquad (17)$$

Введем промежуточный параметр

$$Yi = \frac{}{[\ln T - c\hat{}r^1]\ \hat{}[\ln rc\hat{}r^1]} \qquad (18)$$

где: *d\, d₂, d^* - корректирующие коэффициенты.

Сучетом выражений (14-18) получим

$$Yi \frac{\exp[c?,a_0 + й?,a,(In\ Я,,) + d_l a_2 (In\ A,,)^2 J}{\exp > [Ч^{a_0} + {}^{d}2^{a}i\ (In\ \ ) + d_2 a_2 (In\ X_4 f\ ]} \frac{\exp[rf_3 a_0 + d_3 a_x (In\ A,_3) + d_3 a_2 (In\ X_3)^2]}{\exp[ia_0 + oij\ (In\ X_2) + a_2 (In\ X_2)^2 J + \text{т}\ Л\ \hat{}\ )} \qquad (19)$$

Допускаем следующее равенство:

$$\mathbf{exp[a_0 + a_1(lnA,_1)} + a_2(\ln A,_1)^2 + A_g J =$$

$$\mathbf{= exp[a_0 + a_1(lnA,_2) + a_2}(\ln A,_2)^2] + \mathbf{x_g\ (X_2)} \qquad (20)$$

где: A_g - эквивалентная величина t_g(A,2) в показателе на правой стороне выражения (20).

С учетом (20) выражение (19) принимает следующий вид.

$$Yi = \frac{\mathbf{exp\ \Gamma\hat{}a_0 + d_1\ оц\ (In\ Я,_x) + d_1\ a_2\ (In\ \ )^2 1}}{exp\ \backslash\_d_2 a_0 \mathbf{+ J_2 a_1(lnA,_4) + J_2 a_2}(\ln A._4)^2]},$$

$$\mathbf{exp\ [rf_3 a_0 + d_3 a_t\ (In\ X_3) + d_3\ a_2\ (In\ X_3)^2]}$$

$$\mathbf{exp[a_0 + aj(lnA,_2) + a_2}(\ln X,_2)^2] + A_g \qquad (21)$$

Из (21) напишем

$$d_1 + d_j — d_2 \quad = 1 \qquad (22)$$

$$d_1 \bullet (InX,) + d_3\ (InX,) - d_2\ (InX_4) = (InX_2) \qquad (23)$$

$$d_l\ \mathbf{-(lnA,,)^2} + d_3\ \mathbf{(In}\ X_3 f - d_2\ \mathbf{(lnX_4)^2 = (lnX_2)} \qquad (24)$$

Решив систему уравнений (22-24) относительно d_u fi?2j выражение (21) перепишем как

$$Yl \quad \frac{1}{\mathbf{exp(A_g)}} \qquad (25)$$

Из выражения (25) находим

$$\mathbf{A_g = ln}\ Yi. \qquad (26)$$

Вычислив величину A_g из выражения (26) следует определить величину $\text{т}_\text{г}$(1гЛ₂), используя для этого равенство (20).

Выражение (20) перепишем как

$$exp(x + A_g) = exp\ x + x_g\ (A._2) \qquad (27)$$

где:

$$\mathbf{x = X_0 + 0C[\ (1\text{пЯ}_2) + a_2\ (1\text{пX}_2)} \qquad (28)$$

Далее, используя метод графического перебора, определяем величину т^кЛг) (рис. 3). Для этого по оси абисса следует выложить значения x, а по ординате значения **exp**(x:) **и exp**(x+**Л**$_г$**).**

Постепенно увеличивая значение тД1пХ$_2$), фиксируем точку x_0, где соблюдается равенство (27).

В найденной точке x_0 справедливо равенство

$$\mathbf{exp(x_0+A_г) = exp д;_0+т_г(Л,_2)} \qquad (29)$$

Из (29) окончательно находим

$$^{т}g\ C^{1}2\ ) = {}^{eX}P(*0\ + {}^{A}g\ ) - {}^{eX}P\ x0$$

Таким образом, предлагаемый метод четырехволновых измерений позволяет осуществить измерение оптической толщины малых газов атмосферы с компенсацией влияния атмосферного аэрозоля.

Алгоритмически предлагаемый метод может быть изложен в виде следующей последовательности проводимых операций:

1. Определяются длины волн А,ь К$_2$, А,з, А4 где Л-і < Х$_2$ < Хз < Я,4 , а также выражения для Tifli)"^{1}, Т(Х$_2$у\ ТХ^з)"^{1}, (выражения (14-17)).

2. Вводится промежуточный параметр у, и корректирующие коэффициенты *d\, d$_2$, d-}*выражения (18), (19)).

3. Вводится эквивалентная величина A_g (выражение(20)).

4. На основе анализа выражения, полученного для Yi (выражение (20)), составляется система уравнений (22-24). Осуществляется решение этой системы уравнений относительно d\,d$_2$ и d3 по условию устранения влияния аэрозоля на значение у,.

5. Подставив вычисленные значения *d\, d$_2$, d*3 в выражение для у,, находим значение A_g (выражения (25) и (26)).

6. Используя метод графического перебора, определяем значение т^кЛг) (выражения (27), (28) рис.1).

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Отмечено, что несмотря на принятие мер по устранению влияния атмосферного аэрозоля, проблема полного устранения этого влияния в гиперспектральных солнечных фотометрах остается актуальной.

2. Разработан графоаналитический метод практически полного устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат гиперспектральных солнечно - фотометрических измерений включающий в себя этапы: (а) Проведение четырехволновых солнечно - фотометрических измерений; (б) Проведение графической процедуры вычисления оптической толщины исследуемого газа.

3. Составлен операционный алгоритм реализации предложенного метода.

Литература

1. Spectrometer for Sky - Scanning Sun - Tracking atmospheric research (4star): Instrument technology/ S.E. Dunagan [et al.] // Remote Sensing. - 2013. - No. 5. - P. 3872-3895.

2. Wood, J. Autonomous marine hyperspectral radiometers for determining solar irradiances and aerosol optical properties / J.Wood, T.J. Smyth, V. Estelles // Atmos.Meas.Tech. - 2017. - P. 1723-1737.

3. Dulac, F. Airborne study of a multi - layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne

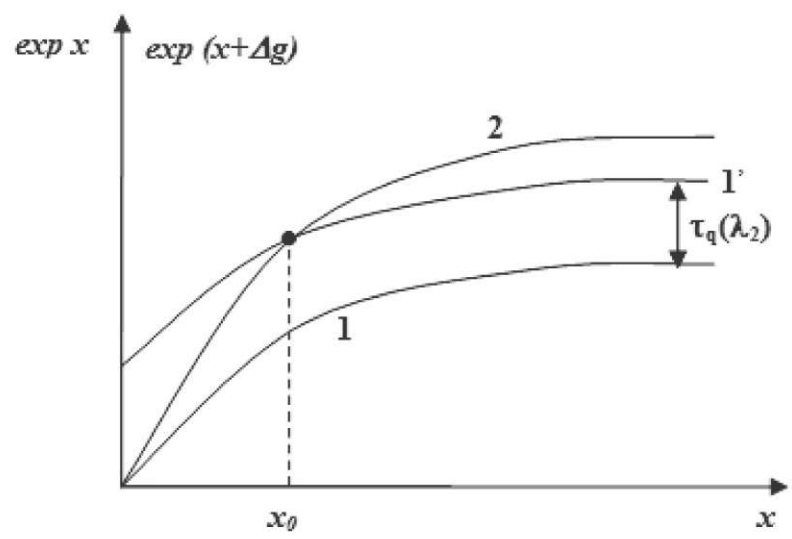

Рис.3 Определение Т^lnX^) методом перебора x при известной величине A_g. Цифрами обозначены: 1 — кривая функции exp (x) ; 2 – кривая функции $\mathbf{exp(x+\Delta_g)}$; *1'–кривая функции* $\mathbf{exp(x+\tau_g(\ln\lambda_2))}$

3 2019 •••••••.indd 124 19.09.2019 11:07:43

polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign/ F. Dulac, P. Chazette // Atmos. Chem. Phys. — 2003. — P. 1817—1831.

4. De Wekker, S. F. J. A comparison of aerosol — layer and convective boundary — layer structure over a mountain range during staaarte'97 / S.F.J. De Wekker, D. G. Steyn, S.Nyeki, // Boundary — Layer Meteorology. — 2004. — No. 113. — P. 249—271.

5. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth / N.T.O. Neill [et al.] // Journal of geophysical research. — 2003. — Vol. 108, No. 17. — P. 45 — 59.

6. Role of coarse and fine mode aerosols in MODIS AOD retrieval: a case study over southern India/ M.N. Sai Suman [et al] // Atmos. Meas. Tech. — 2014. — No. 7. — P. 907 — 917.

7. Aerial observation of aerosols transported from east Asia — Chemical composition of aerosols and layered structure of an air mass over the east China Sea / S. Hatakeyama [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. — 2011. — No. 11 — P. 497 — 507.

8. Synthesis of corrected multi-wavelength spectrometers for atmospheric trace gases / H. Asadov // Chinese Optics Letters. — 2019. — Vol. 7. — P. 361—363.

9. Wavelength dependence of the aerosol angstrom exponent and its implications over Delhi, India / S. Singh [et al.] // Aerosol Science and Technology. — 2011. — Vol. 45, No. 12. — P. 1488—1498.

3 2019 •••••••.indd 125 19.09.2019 11:07:50