

М.М. Кугейко

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПОРНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Для трех моделей рассеивающих сред приводятся алгоритмы определения интегральных и локальных опорных (калибровочных) значений оптических характеристик с использованием информации, которая содержится в самих сигналах обратного рассеяния. Алгоритмы не требуют более широкого (чем для работоспособности известных методов восстановления профилей оптических характеристик по исследуемой трассе) привлечения различного рода упрощающих и модельных представлений об оптических свойствах среды. Показано, что какому-либо из данных алгоритмов удовлетворяет практически любая из атмосферных и гидросферных ситуаций.

Наиболее полный обзор алгоритмов обработки сигналов обратного рассеяния относительно оптических характеристик приведен в [1–3]. Различаются алгоритмы видами используемой априорной информации, характером дополнительных экспериментальных данных и последовательностью математических операций, выполняемых с измеренными значениями сигналов. Систематизация известных однолидарных алгоритмов с единой точки зрения (выявление принципиальных особенностей алгоритмов) и исследования их оптимальности проведены в [3].

Из анализа помехоустойчивости различных схем обработки сигналов обратного рассеяния следует, что устойчивость решения оказывается тем выше, чем больше вносится априорной информации об удаленных участках трассы зондирования [3]. Такая же идеология следует из работ [4, 5], что предполагает использование оценок  $\varepsilon(r_k)$  или  $T(r_0, r_k)$  на конечных участках исследуемой трассы (их получение возможно независимыми дополнительными измерениями). В условиях же невозможности проведения таких опорных измерений проблема калибровки в конечной точке трассы (и даже в начальной) не решена. Данной ситуации соответствует зондирование по наклонным и вертикальным трассам. Известные способы оценок опорных (калибровочных) значений, не требующие проведения дополнительных независимых измерений, приводят к неоднозначности решения (метод логарифмической производной) [3] или к большой неопределенности [1, 6].

Ниже приводятся алгоритмы получения калибровочных значений как  $\varepsilon(r_k)$ , так и  $T(r_0, r_k)$  с использованием информации, содержащейся в самих сигналах обратного рассеяния, в рамках предположений, требуемых для работоспособности известных способов интерпретации измеряемых сигналов относительно профилей оптических характеристик для всевозможных атмосферных и гидросферных ситуаций и на различных участках трасс, в том числе конечных. Рассматривается эффективность использования получаемых по предлагаемым алгоритмам оценок калибровочных значений для различных схем (методов) обработки сигналов. Предлагаемая теория определения опорных (калибровочных) значений оптических характеристик исключает независимые дополнительные измерения.

Будем исходить из уравнения оптической локации в приближении однократного рассеяния (полагая при этом, что доля поглощения в ослаблении пренебрежимо мала) [6]:

$$I_i = \int_{r_i}^{r_i + \Delta r} P(r) r^2 dr = \frac{AP_0 \bar{g}_\pi(r_i, r_i + \Delta r)}{2} T^2(0, r_i) [1 - \exp\{-2\bar{\varepsilon}_i((r_i + \Delta r) - r_i)\}] . \quad (1)$$

Рассмотрим произвольный участок трассы зондирования  $[r_1, r_4]$  (рис. 1, а). Запишем выражения для  $I_1 - I_5$ , соответствующих участкам  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_2, r_4]$ ,  $[r_3, r_4]$  и  $[r_2, r_3]$ , в виде

$$I_1 = B x_1 a_0 (1 - a_1), \quad I_2 = B x_2 a_0 (1 - a_1 a_2), \quad I_3 = B x_3 a_0 a_1 (1 - a_2 a_3), \quad I_4 = B x_4 a_0 a_1 a_2 (1 - a_3), \\ I_5 = B x_5 a_0 a_1 (1 - a_2), \quad (2)$$

$$\text{где } T^2(r_i, r_j) = \exp \left\{ -2 \int_{r_i}^{r_j} \varepsilon(r) dr \right\}; \quad T^2(r_1, r_2) = a_1; \quad T^2(r_2, r_3) = a_2; \quad T^2(r_3, r_4) = a_3; \quad T^2(0, r_1) = a_0;$$

$$0,5 AP_0 = B; \quad \bar{g}_\pi(r_1, r_2) = x_1; \quad \bar{g}_\pi(r_1, r_3) = x_2; \quad \bar{g}_\pi(r_2, r_4) = x_3; \quad \bar{g}_\pi(r_3, r_4) = x_4; \quad \bar{g}_\pi(r_2, r_3) = x_5.$$

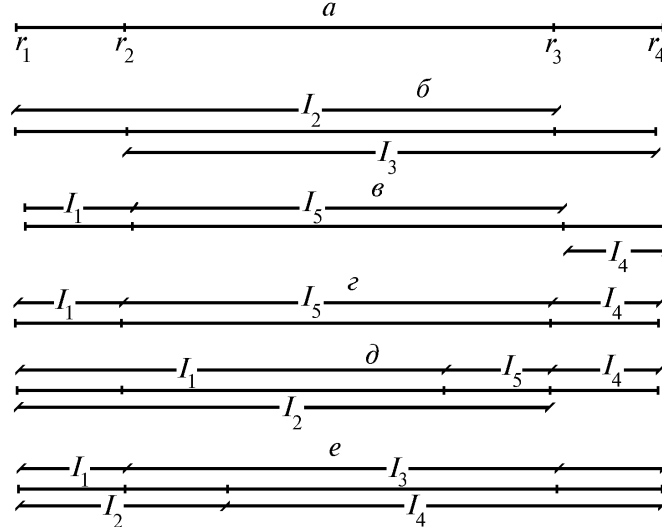


Схема расположения участков накопления сигналов обратного рассеяния для различных моделей рассеивающих сред при определении локальных и интегральных опорных значений оптических характеристик

Получим решения системы (2) для следующих моделей среды.

1. Предположим, что  $a_1 \approx a_3$ . В этом случае

$$I_2 = B x_2 a_0 (1 - a_1 a_2), \quad (3)$$

$$I_3 = B x_3 a_0 a_1 (1 - a_2 a_3).$$

Решение системы (3) относительно  $a_i$  имеет вид

$$a_1 = I_3 x_3 / I_2 x_2. \quad (4)$$

Используемое допущение  $a_1 \approx a_3$  означает примерное равенство прозрачностей участков  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_3, r_4]$  (рис. 1, б). Для малых (непротяженных) участков  $([r_i, r_j] \rightarrow 0)$  практически всегда выполняется данное условие. При этом если участки  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_3, r_4]$  будут соответствовать ширине канала регистрации сигнала обратного рассеяния (стробу), обычно малому, то (4) равно

$$T^2(r_1, r_2) = a_1 = I_3 / I_2, \quad \text{или} \quad \bar{\varepsilon}(\Delta r) = -1/2 \ln (I_3 / I_2), \quad (5)$$

т.к. отношение  $x_3/x_2 \approx 1$ , т.е. для протяженных перекрывающихся участков трассы зондирования  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_2, r_4]$ , отличающихся на величину  $\Delta r \rightarrow 0$ , среднее значение лидарного отношения  $\bar{g}_\pi(r_1, r_3) \approx \bar{g}_\pi(r_2, r_4)$  для большинства встречающихся реальных ситуаций. Не будет выполняться условие  $x_3/x_2 \approx 1$  и особенно  $a_1 \approx a_3$  только в случае попадания участка  $[r_1, r_2]$  или  $[r_3, r_4]$  на границу раздела двух различных рассеивающих сред (границу резкого изменения состава и концентрации рассеивающего вещества).

Получаемое по (5) значение  $\varepsilon$  на участке  $\Delta r$  можно применять в качестве опорного (калибровочного) для методик расчета оптических характеристик, требующих знания локальных опорных значений (при  $\Delta r \rightarrow 0$ ). Последовательное смещение функционалов  $I_2, I_3$  на величину пространственного разрешения можно использовать для получения и профилей  $\varepsilon(\Delta r)$  на участке трассы зондирования.

При использовании (5) для определения прозрачности  $a_1$  протяженного участка  $[r_1, r_2]$  (для  $(r_2 - r_1) \rightarrow \infty$ ) предположения  $a_1 \approx a_3$ ,  $x_2/x_3 \approx 1$  являются более жесткими (менее выполнимыми), чем для случая  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$ . Естественно получение алгоритмов интегральной калибровки (определение прозрачности протяженного участка) при использовании данных предположений об  $a_1$  и  $a_3$ . Для этого рассмотрим функционалы  $I_1 - I_4$ .

Решение системы уравнений для  $I_1 - I_4$  относительно  $a_2$  равно

$$a_2 = x_1 x_3 I_2 I_4 / x_2 x_4 I_1 I_3 . \quad (6)$$

Полученное выражение (6) наиболее удовлетворяет ситуации, показанной на рис. 1, в. При  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$ ,  $(r_4 - r_3) \rightarrow 0$   $T(r_1, r_2)$  и  $T(r_3, r_4)$  стремятся к единице практически в любых атмосферных и гидросферных ситуациях (а это и означает выполнение условия  $a_1 \approx a_3$ ). Равно единице и отношение  $(x_1 x_3)/(x_2 x_4)$  во всех случаях, соответствующих случайному процессу с некоррелированными значениями  $\epsilon$ ,  $g_\pi$  по трассе. Действительно, в этом случае

$$x_1 x_3 = \bar{g}_\pi(r_1, r_2) \bar{g}_\pi(r_2, r_4) = \bar{g}_\pi(r_1, r_2) \bar{g}_\pi(r_2, r_3) \bar{g}_\pi(r_3, r_4) ,$$

$$x_2 x_4 = \bar{g}_\pi(r_1, r_3) \bar{g}_\pi(r_3, r_4) = \bar{g}_\pi(r_1, r_2) \bar{g}_\pi(r_2, r_3) \bar{g}_\pi(r_3, r_4) .$$

Таким образом, если лидарные отношения по исследуемой квазистационарной трассе являются независимыми или слабокоррелированными величинами (а это соответствует множеству атмосферных и гидросферных трасс), то  $x_1 x_3 / x_2 x_4 \approx 1$ . С учетом этого выражение (6) равно

$$T(r_2, r_3) = [(I_2 I_4) / (I_1 I_3)]^{1/2} . \quad (7)$$

Получаемые по (7) значения прозрачности можно использовать в качестве опорных (калибровочных) для известных методик, требующих знания интегральных опорных значений прозрачностей протяженных участков трассы (вариант решения проблемы интегральной калибровки). Используемые при этом допущения в значительной степени менее жесткие, чем для варианта локальной калибровки (5), т.к. не требуют допущений о поведении лидарного отношения по трассе.

Варианты решения проблемы калибровки возможны и при использовании функционалов  $I_1, I_4, I_5$ , тогда при  $a_1 \approx a_3$  (рис. 1, з) и постоянстве лидарного отношения по исследуемой трассе

$$T(r_1, r_3) = (I_4 / I_1)^{1/2} ; \quad (8)$$

$$T(r_2, r_3) = \frac{I_4 I_5 / I_1 + I_4}{I_4 + I_5} . \quad (9)$$

Следует подчеркнуть, что в этом случае для установления опорных (калибровочных) значений не требуется привлечения более широких допущений (по сравнению с допущениями, при которых работают известные методики определения профилей оптических характеристик).

2. Рассмотренные выше алгоритмы получения опорных (калибровочных) значений из самих сигналов обратного рассеяния, информативных относительно профилей оптических характеристик, установлены в предположении  $a_1 \approx a_3$ . Однако решение системы уравнений из функционалов  $I_i$  возможно и с использованием предположения  $a_2 \approx a_3$  [7]. Схема расположения функционалов  $I_i$ , соответствующая данному варианту, изображена на рис. 1, д. В этом случае участки  $a_2$  и  $a_3$  должны располагаться в конце протяженного участка и быть малыми, т.е.  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$ ,  $(r_4 - r_3) \rightarrow 0$ . С учетом предположения  $a_2 \approx a_3$  решение системы уравнений для функционалов  $I_1, I_2, I_4, I_5$  (используемое предположение выполняется практически для всех атмосферных и гидросферных ситуаций, за исключением случая попадания одного из участков на границу раздела сред) относительно  $T^2(r_1, r_2)$  и  $\epsilon$  на участке  $\Delta r_k = [r_0, r_0 + \Delta r]$  можно записать как

$$T^2(r_1, r_2) = \left[ \frac{I_2 - I_1}{I_2 - I_1 I_4 / I_5} \right]^{1/2} ; \quad (10)$$

$$\epsilon(\Delta r_k) = -\frac{1}{2 \Delta r_k} \ln \left[ 1 - I(\Delta r_k) \frac{I_5 - I_4}{I_2 I_5 - I_1 I_4} \right] , \quad (11)$$

и их можно использовать соответственно в методиках с интегральной и локальной калибровкой.

В случае неоднородных рассеивающих сред (с большим разбросом  $g_{\pi}(r)$ ) применение алгоритма (10) определяется наличием участков, удовлетворяющих условию [7]:

$$\delta\beta_{\pi} < \exp \{2\varepsilon\Delta r\} - 1, \quad (12)$$

следующему из необходимости получения корректного результата (прозрачность не должна быть больше 1 или меньше 0), где  $\delta\beta_{\pi} = \Delta\beta_{\pi}/\beta_{\pi}$  – степень неоднородности среды.

Если на исследуемой трассе находятся два соседних участка  $[r, r + \Delta r]$ ,  $[r + \Delta r, r + 2\Delta r]$ , на которых  $\bar{\varepsilon}(r, r + \Delta r) \approx \bar{\varepsilon}(r + \Delta r, r + 2\Delta r)$ ,  $\bar{g}_{\pi}(r, r + \Delta r) \approx \bar{g}_{\pi}(r + \Delta r, r + 2\Delta r)$ , то функционалы  $I_1, I_2$  можно рассматривать как члены бесконечно убывающей прогрессии со знаменателем  $q = I_2/I_1$ . С учетом того, что  $I_m(r, \infty)$  вычисляется как сумма членов геометрической прогрессии,

$$\varepsilon(\Delta r_k) = -\frac{1}{2\Delta r_k} \ln \left[ 1 - \frac{I(\Delta r_k)}{I_1}(1-q) \right]. \quad (13)$$

Выражение (13) также можно использовать для получения опорного (калибровочного) значения для любого из методов с локальной калибровкой. Однако используемое при этом предположение требует наличия на трассе либо квазиоднородных участков, что возможно в ограниченных случаях, либо определения функционалов  $I_1$  и  $I_2$  на протяженных участках, что более предпочтительно при зондировании фонового аэрозоля.

3. Рассмотренный в п.2 алгоритм (10) позволяет определить прозрачность протяженных участков трасс зондирования, расположенных на начальных участках. Аналогичный результат (для прозрачности участков, расположенных на конечных участках исследуемых трасс) можно получить, если предположить, что  $a_1 \approx a_2$ . Этому предположению наиболее соответствует расположение функционалов, изображенное на рис. 1, *e*. Участки  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_2, r_3]$ , соответствующие функционалам  $I_1, I_5$ , должны быть при этом малыми ( $[r_1, r_2] \rightarrow 0$ ,  $[r_2, r_3] \rightarrow 0$ ). Решается система уравнений для  $I_1, I_3, I_4, I_5$  относительно  $a_1, a_3$ . Из первого и последнего уравнений системы следует, что

$$a_1 = x_1 I_5 / x_5 I_1. \quad (14)$$

Подставляя  $a_1$  в

$$\frac{I_3}{I_4} = \frac{x_3}{x_4} \frac{1}{a_1} \frac{(1 - a_1 a_3)}{(1 - a_3)},$$

Получаем

$$a_3 = T^2(r_3, r_4) = \frac{(I_4 x_3 - I_3 I_5 x_4 x_1 / x_5 I_1)}{(I_4 x_3 - I_3 x_4) (x_1 I_5 / x_5 I_1)}. \quad (15)$$

В рамках используемого известными методами предположения  $g_{\pi}(r)$ , равного const или медленно меняющегося от точки к точке, выражение (15) преобразуется к виду

$$T(r_3, r_4) = \left\{ \frac{(I_4 - I_3 I_5 / I_1)}{(I_4 - I_3) (I_5 / I_1)} \right\}^{1/2}. \quad (16)$$

Выражение (16), таким образом, также можно использовать для осуществления интегральной калибровки в методах восстановления оптических характеристик, использующих допущение о постоянстве лидарного отношения по исследуемой трассе.

Все полученные выше алгоритмы (в вариантах 1÷3) как для локальной, так и для интегральной калибровок не содержат ни аппаратных констант, ни зависимости от энергии зондирующих импульсов. Из этого следует устойчивость алгоритмов к разбросу энергии зондирующих импульсов от одной посылки к другой, отсутствие абсолютной калибровки системы, исключаются погрешности определения аппаратных констант. Более того, работоспособность алгоритмов получения опорных (калибровочных) значений по вариантам 2÷3 не нарушается и при наличии резкого перепада в значениях оптических характеристик на границах раздела сред. Действительно, для протяженных участков, включающих границы раздела, отличающихся на небольшую величину пространственного разрешения  $\Delta r$ , средние значения

$$\bar{g}_\pi(r_0, r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_\pi(\Delta r_i), \quad \bar{g}_\pi(r_0, r + \Delta r) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^{N+1} g_\pi(\Delta r_i)$$

при больших  $N$  ( $N = (r - r_0)/\Delta r$ ,  $\Delta r \rightarrow 0$ ) практически равны и  $m \approx 1$ , что и приводит к устойчивости алгоритмов калибровки к границам раздела (резкого перепада в значениях оптических характеристик) сред.

В то же время все полученные выше алгоритмы интегральной калибровки по вариантам 1÷3, а также алгоритм локальной калибровки по (4) устойчивы к наличию слоев с резко изменяющимися оптическими характеристиками (например, выбросов труб промышленных предприятий во время зондирования городского аэрозоля, облачного слоя, при зондировании атмосферы с самолета и т.п.) на участках определения прозрачности (для (4) в любом месте интервала  $[r_1, r_4]$ ). Это следует и из того, что данные слои одновременно включаются в функционалы  $I_i$  для протяженных участков, отличающихся на величину пространственного разрешения, обычно небольшую ( $\Delta r \rightarrow 0$ ), и средние значения  $\bar{g}_\pi(r_i, r_j)$ ,  $\bar{g}_\pi(r_i, r_j + \Delta r)$  этих участков практически равны.

Измеряемые функционалы  $I_i$  во всех изложенных в п.1÷3 алгоритмах интегральной и локальной калибровок используются в виде отношения соседних, отличающихся на величину  $\Delta r$  отсчетов. Вклады многократного рассеяния  $C_i$  для соседних отсчетов, отличающихся на величину  $\Delta r \rightarrow 0$ , практически одинаковы. Таким образом, алгоритмы вида (4) и (10) можно записать следующим образом:

$$a_1 = \frac{C_1 I_3}{C_1 I_2}, \quad a_1 = \frac{m C_1 I_2 - C_1 I_1}{m C_1 I_2 - n C_1 C_3 I_1 I_4 / C_3 I_3},$$

т.к.  $C_3 \approx C_2$  для (4) и  $C_1 \approx C_2$ ,  $C_3 \approx C_4$  для (10).

Независимость алгоритмов калибровки от  $C_i$ , характеризующих вклад многократного рассеяния, и приводит к незначительному влиянию многократного рассеяния на результаты определения калибровочных значений  $T$ ,  $\varepsilon$ . Незначительное влияние вклада многократного рассеяния в измеряемые сигналы в алгоритмах расчета оптических характеристик, использующих сигналы в виде относительного хода соседних, отличающихся на  $\Delta r$ , отсчетов отмечалось ранее в [1, 6].

Предлагаемые алгоритмы определения интегральных и локальных калибровочных значений используют информацию, которая содержится в самих сигналах обратного рассеяния, и не требуют более широкого (чем для работоспособности известных методов определения профилей оптических характеристик по трассе) привлечения различного рода упрощающих и модельных представлений об оптических свойствах исследуемой среды. Действительно, алгоритмы вариантов 2÷3 требуют гладкости  $g_\pi(r)$  и равенства средних значений  $\varepsilon(r)$  на произвольных (малых или больших) участках среды. Эти требования менее жесткие по сравнению с требованиями однородности среды или постоянства  $g_\pi$  и  $\varepsilon$  в соседних слоях (при этом необходимо знание начального значения  $\varepsilon$  и априорная информация о поведении  $g_\pi$  между слоями), характерными для так называемых численных методов решения уравнения оптической локации (по классификации [6]). То же можно сказать и о методах, основанных на аналитическом решении [6], требующих неизменности  $g_\pi$  по всей трассе или знания функциональной связи между  $g_\pi$  и  $\varepsilon$ . Более того, отсутствие в предлагаемых алгоритмах ограничений на длины участка определения функционалов  $I$  повышает устойчивость их к влиянию измерительных погрешностей.

Алгоритмы же определения калибровочных значений оптических характеристик по варианту 1 требуют использования вообще минимальных предположений, а именно: примерного равенства прозрачностей участков для двух малых участков (при  $\Delta r \rightarrow 0$ ) исследуемой среды. Практически это означает равенство прозрачностей участков, соответствующих стробу (каналу) измерительной аппаратуры, что соблюдается даже при значительных разбросах оптических характеристик ( $\exp\{-2\varepsilon\Delta r\} \approx 1$  при  $\Delta r \rightarrow 0$  и значительном разбросе  $\varepsilon$ ). Так, например, при  $\Delta r = 0,01$  км и  $\varepsilon = 0,1$ ;  $0,01$  км<sup>-1</sup> соответственно  $T(\Delta r)$  равны 0,998 и 0,9998. Правда, для данных алгоритмов нежелательно наличие границы раздела сред на  $[r_1, r_4]$ , так как в этом случае начинает сказываться влияние изменения  $g_\pi(r)$ . Для трасс без границ раздела сред, как показано аналитически при описании варианта 1, влияния разброса  $g_\pi(r)$ , обусловленного естественными флуктуациями или за счет турбулентности, практически не существует:  $(\bar{g}_\pi(r_1, r_2) \bar{g}_\pi(r_2, r_4) \approx \bar{g}_\pi(r_1, r_3) \bar{g}_\pi(r_3, r_4)$

для одного и того же участка  $[r_1, r_4]$ . Данные предположения, таким образом, являются наименее жесткими из всех используемых в известных методах.

Как видно из вышеизложенного, практически для любой атмосферной и гидросферной ситуации можно выбрать алгоритм определения опорного (калибровочного) значения оптической характеристики из измеряемого сигнала обратного рассеяния и исключить нежелательные дополнительные независимые измерения калибровочных значений  $T$  или  $\epsilon$ . При этом используется тот сигнал обратного рассеяния, который измеряется для определения оптических характеристик по исследуемой трассе.

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 173 с.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 316 с.
4. Klitt J. D. // Appl. Optics. 1981. V. 20. P. 211.
5. Klitt J. D. // Appl. Optics. 1983. V. 22. P. 514.
6. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. Лазерное зондирование атмосферного аэрозоля (теоретические аспекты) // Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 3–45.
7. Кугейко М.М., Малевич И.А., Зенченко С.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. N 2. С. 213–216.

Белорусский государственный  
университет, Минск

Поступила в редакцию  
28 июня 1996 г.

**M. M. Kugeiko. To Determination of Base Values of Optical Characteristics at Lidar Measurements.**

The algorithms have been proposed for the determination of integral and local base (calibration) values of optical characteristics for three scattering media models with using of information contained in backscattering signals themselves. These algorithms do not require more wide attraction (then is needed for the working ability of known methods of the optical characteristics profiles determination along the route under investigation) of different simplifying and modeling assumptions about optical properties of the medium. It has been demonstrated that practically all atmospheric and hydrospheric situations comply with one of these algorithms.