

УДК 535.233.42:623.465.757

## **Методика воспроизведения метеоусловий при имитационном моделировании авиационных оптико-электронных систем**

**Хисматов И.Ф.**

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,  
ГосНИИАС, ул. Викторенко, 7, Москва, 125167, Россия*

*e-mail: [ihsn@gosniias.ru](mailto:ihsn@gosniias.ru)*

**Статья поступила 21.10.2019**

### **Аннотация**

В статье рассматривается методика учета метеоусловий при имитационном моделировании полей яркости фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения (ОЭСКН) летательных аппаратов (ЛА). Методика основана на применении интерполяционных методов определения прозрачности и яркости наклонных трасс в атмосфере между объектами визирования и регистрирующей камерой. Предложен способ расчета яркости и прозрачности атмосферы на произвольных трассах по табличным данным об этих характеристиках на лучевых трассах.

**Ключевые слова:** метеоусловия, влажность, дальность видимости, поле яркости, оптическое излучение, модель, оптико-электронная система, моделирование.

### **Введение**

Анализ и оценка качества функционирования современных оптико-электронных систем конечного наведения (ОЭСКН) в заданных диапазонах

изменения метеоусловий не теряют своей актуальности, так как качество выполнения возложенных на них задач по автоматическому захвату и автосопровождению объектов интереса существенным образом влияет на показатели эффективности применения летательных аппаратов в различных операциях [1-8]. Это связано, с одной стороны, с возросшими требованиями по точности и скорости решения ими задач в автоматическом режиме в ограниченно сложных метеоусловиях, с другой стороны, со стремлением разработчиков к снижению затрат на изготовление систем конечного наведения, выражающимся в применении оптических систем и приёмников излучения невысокого качества. Выяснить пригодность выбранных технических решений к их реализации в опытных образцах ОЭСКН, при которой значения характеристик системы конечного наведения достигнут заданных в техническом задании уровней, позволяет применение методов имитационного моделирования. При этом возникает потребность в применении таких методов синтеза изображений фоноцелевой обстановки, которые бы качественно передавали бы характер воздействий метеорологических факторов на процессы функционирования системы конечного наведения.

Задача моделирования переноса оптического излучения в атмосфере в настоящий момент успешно решается [9-12], однако методы её решения остаются достаточно сложными, чтобы ими могли воспользоваться инженеры в практике моделирования оптико-электронных систем конечного наведения. В статье предлагается инженерный подход к учету «оптического» состояния атмосферы,

основанный, однако, на результатах моделирования с применением апробированных оптических моделей.

### **Обоснование методического подхода к учету метеоусловий при имитационном моделировании полей яркости фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения**

При функционировании ОЭСКН метеоусловия определяют оптическое состояние атмосферы, в которой переносится излучение элементов фоноцелевой обстановки. Оптическое состояние атмосферы выражается, во-первых, в значениях коэффициентов  $\tau_{sk}$  и  $\tau_{sm}$  ее прозрачности на трассах визирования элементарных площадок и между ними. Во-вторых, оно выражается в значениях яркости  $L_{aij}$  атмосферы на этих трассах при облучении зрачка и элементов фоноцелевой обстановки небосводом.

Оптическое состояние атмосферы, которое называют также «оптической погодой» [9, 13], принято характеризовать комбинациями трех параметров [9, 13]: метеорологической дальностью видимости  $S_M$ , температурой приземного воздуха  $t_v$  и его абсолютной влажностью  $w_v$ . Из них метеорологическая дальность видимости  $S_M$  является интегральной характеристикой, обобщенно учитывающей и химический состав воздуха, и его насыщенность аэрозолями различного происхождения, и концентрацию пылевых образований.

Метеорологические параметры являются входными величинами математических моделей, используемых для расчета прозрачности и яркости

атмосферы на горизонтальных и наклонных трассах. Анализ современного состояния математического моделирования оптики атмосферы в его инженерном приложении дан, например, в [9, 13]. В этих работах, а также в других [14, 15], в расчетах полей яркости фоноцелевой обстановки ОЭСКН рекомендуется применять те математические модели, которые наиболее адекватно учитывают спектральные линии поглощения и рассеяния оптического излучения атмосферными газами и аэрозолями. Примером таких моделей является программный продукт MODTRAN, разработанный геофизической лабораторией ВВС США. Отечественным примером является программный продукт «Атмосфера-ГИПО», разработанный специалистами АО «НПО «ГИПО» [10, 11]. Отмеченные программные продукты основаны на решении уравнения переноса излучения в веществе атмосферы и потому требуют относительно большое время счета.

Вместе этим, алгоритмы имитационного моделирования полей яркости на входном зрачке ОЭСКН, значения которой быстро изменяются в динамике наведения летательного аппарата на объекты фоноцелевой обстановки, предъявляет повышенные требования к скорости счета при вычислениях прозрачностей на трассах. Это связано с необходимостью выдерживания заданной частоты следования кадров при воспроизведении синтезированных полей яркости на комплексах полунатурного моделирования. Получение синтезированных изображений фоноцелевой обстановки при выполнении имитационного моделирования функционирования ОЭСКН в режимах автоматического захвата или автосопровождения объектов также связано с повышенными требованиями к скорости счета. Это обусловлено необходимостью получения такого количества

кадров, которое соответствует заданному временному отрезку функционирования ОЭСКН.

Например, при продолжительности конечного наведения 20 с и частоте следования кадров 50 Гц требуется синтезировать 1000 изображений. Если одно изображение будет синтезировано за 6 с, то один цикл математического моделирования ОЭСКН займет 1 ч. Набор статистического материала объемом 100 реализаций займет более двух недель рабочего времени, что в ходе подготовки к испытаниям в процессах отработки образца ОЭСКН обычно не допустимо. Так как разработанный метод имитационного моделирования при синтезе одного кадра размером  $640 \times 480$  элементов требует расчета яркости и прозрачности более чем на  $3 \cdot 10^5$  трассах, то потребное на это время может возрасти до неприемлемых значений.

Проблема обеспечения быстродействия решается применением высокопроизводительных аппаратных средств графических вычислений, а также программных средств распараллеливания вычислительных процессов. Однако, с увеличением размеров синтезируемых изображений кратно будут расти и количество трасс, на которых потребуется рассчитывать параметры атмосферы.

В связи с этим в данной работе предлагается применять интерполяционный метод вычисления яркости и прозрачности атмосферы на трассах визирования и облучения элементарных площадок отражающих объектов фоноцелевой обстановки. Суть его заключается в следующем.

Ввиду неоднородности атмосферы по высоте рассматриваемые оптические характеристики атмосферы на наклонных и горизонтальных трассах определяются не только тремя параметрами метеоусловий ( $S_M$ ,  $t_B$  и  $w_B$ ), но и геометрическими факторами. Эти факторы описываются тремя параметрами: высотами расположения элементов  $S$  и  $S_m$ , а также расстоянием между ними. Назначив диапазоны изменений метеорологических и геометрических параметров трасс, задав шаг изменения каждого параметра внутри своего диапазона, предлагается вычислять множество значений оптических характеристик атмосферы, каждое из которых будет соответствовать своей комбинации параметров. Полученное множество может быть использовано в алгоритмах интерполяции для приближенного определения прозрачности и яркости атмосферы в требуемых условиях. При этом для расчета оптических характеристик трасс в узлах построенной сетки возможно применение доступного программного продукта, эффективно реализующего апробированную математическую модель оптических характеристик атмосферы.

**Метод интерполяционного расчета прозрачности и яркости атмосферных трасс при имитационном моделировании яркостей фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения**

Постановка задачи определения яркости и прозрачности атмосферы на трассах визирования и между элементами фоноцелевой обстановки ОЭСН интерполяционным методом следующая.

Дано: программная реализация математической модели оптических характеристик атмосферы, позволяющая выполнять их расчеты в диапазоне геометрических и метеорологических параметров.

Требуется рассчитать прозрачность и яркость атмосферы на различных трассах и в заданных метеоусловиях, основанную на интерполяции между заранее вычисленными значениями.

Решение задачи начнем с формального описания параметров, определяющих значения прозрачности на выбранной трассе.

Как отмечалось, эти параметры можно разделить на две группы. Первую группу составляют параметры, описывающие геометрические факторы: высоты  $H_1$  и  $H_2$  точек начала и окончания трассы, протяженность трассы  $D$ . Вторую группу составляют параметры «оптической погоды»: метеорологическая дальность видимости  $S_M$ , температура и абсолютная влажность приземного воздуха  $t_B$  и  $w_B$ .

В динамике наведения летательного аппарата на объекты фоноцелевой обстановки геометрические параметры трасс визирования её элементов изменяются скоротечно, соответственно скорости изменения положения ЛА в пространстве. Параметры же второй группы в рассматриваемые периоды времени остаются неизменными, так как наименьший период движения их значений совпадает с суточным циклом (напомним, что рассматривается модель яркости фоноцелевой обстановки в условиях без помех). Поэтому предлагается процедуры интерполяции значений прозрачности разделить во времени на два независимых периода: предварительный и текущий. Предварительный период реализуется перед началом, а текущий — в процессе имитационного моделирования полей яркости и синтеза по

его результатам изображений фоноцелевой обстановки в динамике функционирования ОЭСН.

Количество геометрических параметров прозрачности атмосферы можно уменьшить до двух. Для этого рассмотрим произвольную трассу, располагающуюся на луче из точки  $A$  и до конца атмосферы. Точка  $B$  трассы лежит на некотором удалении  $D$ . Прозрачность  $\tau_A$  трассы от точки  $A$  до конца атмосферы можно представить в виде произведения величин  $\tau_{AB}$  и  $\tau_B$  — прозрачностей трассы  $AB$  и трассы от точки  $B$  и также до конца атмосферы. Тогда величину  $\tau_{AB}$  можно определить следующим образом:

$$\tau_{AB} = \tau_A / \tau_B. \quad (1)$$

Прозрачность лучевой трассы, распространяющейся до конца атмосферы, зависит от двух геометрических параметров: высоты  $H$  точки начала луча, на котором лежит трасса, и зенитного угла  $\mu$  наклона луча к вертикали (при допущении об азимутальной однородности атмосферы). Результат вычисления прозрачности на основе частного (1) может дать осцилляции при малых значениях  $\tau_A$  и  $\tau_B$ , однако, их можно сгладить или минимизировать алгоритмическим путем.

Таким образом, при фиксированных значениях параметров метеоусловий ( $S_M$ ,  $t_B$ ,  $w_B$ ) расчет прозрачности  $\tau$  атмосферы на произвольных трассах может быть выполнен на основании исходной информации о прозрачности лучевых трасс, определяемых двумя параметрами: высотой  $H$  точки начала и зенитным углом  $\mu$  наклона луча. Диапазон изменения высоты  $H$  — от нуля (уровня моря) до края атмосферы (в моделях это соответствует 30 км над уровнем моря), диапазон

изменения зенитного угла  $\mu$  — от нуля (вертикально вверх) до  $\pi$  (вертикально вниз). Тогда, задавшись шагами их изменения, можно расчетным путем с применением апробированного программного продукта получить двумерный массив  $\mathbf{T} = \{ \tau (H_i, \mu_j | S_M, t_B, w_B) \}$  значений прозрачности множества лучей в вертикальной плоскости. Все значения массива  $\mathbf{T}$  будут соответствовать фиксированным метеоусловиям, определяемым тройкой метеопараметров  $(S_M, t_B, w_B)$ .

Следующая задача — это расчет прозрачности лучевых трасс для произвольных метеоусловий из заданного диапазона.

Для простоты дальнейшего изложения введем следующие обозначения параметров массива  $\mathbf{T}$ :

- для геометрических параметров:  $x_1 = H$ ,  $x_2 = \mu$ ;
- для метеопараметров:  $y_1 = S_M$ ,  $y_2 = t_B$ ,  $y_3 = w_B$ .

Пусть задана трехмерная сетка метеопараметров  $\mathbf{Y}_X = \{y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}\}$ , в которой индексы изменяются с единичным шагом

$$k = \overline{1, N_k, 1}; l = \overline{1, N_l, 1}; m = \overline{1, N_m, 1}, \quad (2)$$

а значения изменяются следующим образом:

$$\begin{cases} y_1 = \overline{S_{M-\min}, S_{M-\max}, \Delta S_M}, \\ y_2 = \overline{t_{B-\min}, t_{B-\max}, \Delta t_B}, \\ y_3 = \overline{w_{B-\min}, w_{B-\max}, \Delta w_B}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $N_k, N_l, N_m$  — количество точек при дискретных изменениях метеопараметров  $S_M$ ,  $t_B$  и  $w_B$  соответственно;

$\Delta S_M$ ,  $\Delta t_B$  и  $\Delta w_B$  — шаги изменения метеопараметров  $S_M$ ,  $t_B$  и  $w_B$  соответственно.

Каждому узлу сетки  $Y_X$  будет соответствовать  $\chi$ -ая комбинация метеопараметров  $(y_{1k}, y_{2l}, y_{3m})$ . Для каждой такой комбинации вычисляется двумерный массив  $T_\chi = \{ \tau_\chi(i, j) \}$  прозрачностей лучевых трасс, в котором

$$\tau_\chi(i, j) = \tau(x_{1i}, x_{2j} | y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}) \}.$$

В результате должно быть получено  $N_X = N_k \cdot N_l \cdot N_m$  двумерных массивов  $T_\chi$ .

Теперь можно записать методику подготовки исходных данных и расчета прозрачности лучевых трасс для произвольных метеоусловий из заданного диапазона, выполняемого в процессе имитационного моделирования полей яркости:

а) Из заданного диапазона изменений метеоусловий (3) выбирается необходимая комбинация метеопараметров  $(S_M, t_B, w_B)$ . Для нее перед запуском вычислительного цикла имитационного моделирования полей яркости ФЦО методом интерполяции по трем параметрам метеоусловий формируется двумерный массив  $T$  значений прозрачности на лучевых трассах:

$$T = \left\{ \tau_{ij}(S_M, t_B, w_B) \right\} : \tau_{ij} = A_{\text{int}} \left[ \left\{ \tau(x_{1i}, x_{2j}, y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}) \right\} \right]_{y_1, y_2, y_3}, \quad (4)$$

где  $A_{\text{int}}$  — оператор интерполяции по параметрам  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$ .

б) Запускается вычисления имитационного моделирования полей яркости ФЦО. В процессе него по значениям сформированного массива  $T$ , находящегося в памяти вычислителя, методом интерполяции по геометрическим параметрам вычисляется прозрачность на заданной величинами  $H$  и  $\mu$  лучевой трассе:

$$\tau(H, \mu) = A_{\text{int}} \left[ \left\{ \tau(x_{1i}, x_{2j}, S_M, t_B, w_B) \right\} \right]_{x_1, x_2}, \tau(x_{1i}, x_{2j}, S_M, t_B, w_B) \in \mathbf{T}, \quad (5)$$

где  $A_{\text{int}}$  — оператор интерполяции по параметрам  $x_1$  и  $x_2$ .

Значение  $\tau(H, \mu)$  учитывает заданные метеоусловия функционирования ОЭСКН.

Аналогичный подход можно применить и для определения яркостей  $L_{aij}$  атмосферы на трассах визирования и облучения элементов фоноцелевой обстановки при имитационном моделировании её полей яркости.

Излучение атмосферы состоит из рассеянного в ней излучения Солнца, отраженного излучения от земной поверхности и собственного излучения, обусловленного ненулевой температурой её вещества. Поэтому яркость излучения атмосферы также определяется двумя группами параметров: геометрическими и метеорологическими. К геометрическим параметрам в общем случае также можно отнести высоты  $H_1$  и  $H_2$  точек начала и окончания трассы, протяженность трассы  $D$ . Группу метеорологических параметров в случае расчета яркости атмосферы относят параметры «оптической погоды» — метеорологическая дальность видимости  $S_M$ , температура и абсолютная влажность приземного воздуха  $t_B$  и  $w_B$ , а также положение Солнца над горизонтом, задаваемое зенитным углом  $\mu_C$ .

Количество геометрических параметров, определяющих яркость атмосферы на узких трассах, характеризуемых малыми значениями телесных углов, также можно уменьшить до двух. Для этого рассмотрим трассу, лежащую на луче от точки А до края атмосферы. Луч имеет наклон к вертикали, характеризуемый зенитным углом

$\mu_a$ . Рассмотрим также на этом луче еще одну трассу, которая начинается в некоторой точке В, отстоящей от точки А на удалении D. Вторая трасса также распространяется до конца атмосферы.

Поместим в точку А площадку  $S_A$  и вершину некоторого телесного угла  $\Omega_A$ , ось которого лежит на луче АВ, а сам он опирается на край атмосферы. Для простоты допустим, что площадка  $S_A$  перпендикулярна лучу АВ. Покажем, что яркость

$L_{aA-AB}$ , создаваемая на площадке  $S_A$  излучением атмосферы на трассе АВ внутри телесного угла  $\Omega_A$ , можно определять из соотношения:

$$L_{aA-AB} = L_{aA-A} - \tau_{AB} L_{aB-B}, \quad (6)$$

где  $L_{aA-A}$  — яркость на площадке  $S_A$ , создаваемая излучением лучевой трассы А, Вт/(м<sup>2</sup>ср);

$L_{aB-B}$  — яркость на площадке  $S_B$ , создаваемая излучением лучевой трассы В, Вт/(м<sup>2</sup>ср);

$\tau_{AB}$  — прозрачность атмосферы на трассе АВ.

Площадка В расположена в точке В перпендикулярно лучу АВ.

Разобьем получившуюся трассу набором перпендикулярных к ней сечений  $\{S_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ , так, чтобы каждый из промежутков между сечениями имел малую оптическую толщину. В результате получим  $N$  источников на трассе А, излучение которых можно характеризовать яркостями  $L_{aA-i}$  на площадке  $S_A$ .

Так как все источники видны с площадки под одним и тем же телесным углом, то яркость излучения, создаваемого на площадке  $S_A$  излучением телесного угла  $\Omega_A$ ,

будет состояться из яркостей излучения, создаваемых на ней всеми источниками на трассе, то есть:

$$L_{aA-A} = \sum_{i=1}^N L_{aA-i}, \quad (7)$$

Разделим сумму на два слагаемых, соответствующим трассам АВ и В:

$$L_{aA-A} = \sum_{i=1}^{N_{AB}} L_{aA-i} + \sum_{i=1}^{N_B} L_{aA-i}, \quad (8)$$

где  $N_{AB}$  — количество источников на трассе АВ;

$N_B$  — количество источников на лучевой трассе В.

Заметим, что

$$\sum_{i=1}^{N_{AB}} L_{aA-i} = L_{aA-AB}, \quad \sum_{i=1}^{N_B} L_{aA-i} = \tau_{AB} L_{aB-B}, \quad (9)$$

после чего выражение (8) можно переписать в виде:

$$L_{aA-A} = L_{aA-AB} + \tau_{AB} L_{aB-B}, \quad (10)$$

что и доказывает правомерность выражения (6).

Доказанное соответствует принципу Штраубеля для световых трубок.

Таким образом, для расчета яркостей атмосферных трасс, расположенных между двумя произвольными элементами фоноцелевой обстановки, достаточно иметь исходную информацию о яркостях соответствующих лучевых трасс. Яркость излучения, падающего на некоторую площадку  $S_A$  из атмосферы на лучевой трассе А, определяется двумя геометрическими параметрами: высотой расположения

площадки  $H$  и зенитным углом  $\mu_a$  наклона к вертикали лучевой трассы, распространяющейся из точки  $A$  до края атмосферы.

Добавим расчетную сетку метеоусловий  $Y_X$  четвертым параметром — зенитным углом  $\mu_C$  положения Солнца. Получим новую четырехмерную сетку параметров метеоусловий  $Y_{XC} = \{y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}, y_{4n}\}$ , в которой индекс последнего параметра изменяется с единичным шагом

$$n = \overline{1, N_n, 1}, \quad (11)$$

а его значения изменяются следующим образом:

$$y_4 = \overline{\mu_{C-\min}, \mu_{C-\max}, \Delta\mu_C} \quad (12)$$

где  $N_n$  — количество точек при дискретном изменении параметра  $\mu_C$ ;

$\Delta\mu_C$  — шаг изменения параметра  $\mu_C$ .

Каждому узлу сетки  $Y_{XC}$  будет соответствовать  $\phi$ -ая комбинация метеопараметров  $(y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}, y_{4n})$ . Для каждой такой комбинации вычисляется двумерный массив  $\Lambda_\phi = \{L_{a\phi}(\alpha, \beta)\}$  яркостей лучевых трасс, в котором  $L_{a\phi}(\alpha, \beta) = L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta} | y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}, y_{4n})$ . В результате должно быть получено  $N_{XC} = N_k \cdot N_l \cdot N_m \cdot N_n$  двумерных массивов  $\Lambda_\phi$ .

Теперь, аналогично прозрачности на лучевых трассах, запишем методику подготовки исходных данных и расчета яркости лучевых трасс атмосферы для произвольных метеоусловий из заданного диапазона, выполняемого в процессе имитационного моделирования полей яркости:

а) Из заданного диапазона изменений метеоусловий (4, 12) выбирается необходимая комбинация метеопараметров ( $S_M, t_B, w_B, \mu_C$ ). Для нее перед запуском вычислительного цикла имитационного моделирования полей яркости ФЦО методом интерполяции по четырем параметрам второй группы формируется двумерный массив  $\Lambda$  значений яркостей атмосферы на лучевых трассах:  $\Lambda$

$$\Lambda = \{L_{\alpha\beta}(S_M, t_B, w_B, \mu_C)\} : \quad (13)$$

$$L_{\alpha\beta} = A_{\text{int}} \left[ \left\{ L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}, y_{4n}) \right\} \right]_{y_1, y_2, y_3, y_4}$$

где  $A_{\text{int}} \left[ \left\{ L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, y_{1k}, y_{2l}, y_{3m}, y_{4n}) \right\} \right]_{y_1, y_2, y_3, y_4}$  — оператор интерполяции по параметрам  $y_1, y_2, y_3$  и  $y_4$ .

б) Запускается вычисления имитационного моделирования полей яркости ФЦО. В процессе него по значениям сформированного массива  $\Lambda$ , находящегося в памяти вычислителя, методом интерполяции по геометрическим параметрам вычисляется яркость атмосферы на заданной величинами  $H$  и  $\mu_C$  лучевой трассе:

$$L_a(H, \mu) = A_{\text{int}} \left[ \left\{ L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, S_M, t_B, w_B, \mu_C) \right\} \right]_{x_1, x_2}, \quad (14)$$

$$L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, S_M, t_B, w_B, \mu_C) \in \Lambda,$$

где  $A_{\text{int}} \left[ \left\{ L_a(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, S_M, t_B, w_B, \mu_C) \right\} \right]_{x_1, x_2}$  — оператор интерполяции по параметрам  $x_1$  и  $x_2$ .

## **Алгоритм воспроизведения метеоусловий при моделировании полей яркости и синтезе изображений фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения**

Метод интерполяционного расчета прозрачности и яркости атмосферных трасс может быть применен в расчетах полей яркости при синтезе изображений фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения. Тем самым может быть обеспечено воспроизведение факторов воздействий метеоусловий при их имитационном моделировании. Схема алгоритма показана на рисунке 1.

Перед началом цикла имитационного моделирования полей яркости и синтеза изображений кадров фоноцелевой обстановки необходимо определиться с географическим районом Земного шара, в условиях которого предполагается оценивать функционирование ОЭСКН. Это необходимо, так как в моделях геофизических параметров Земли существует признанное деление земного шара по климатологическому принципу. Выбор географического района определяет климатический район Земного шара, который описывается региональной моделью геофизических параметров атмосферы. При выборе климатического района можно следовать рекомендациям [9].

Блок 02 алгоритма предписывает выбор типа «оптической погоды» и времени суток, так как они устанавливают допустимые пределы изменения метеопараметров, характерных выбранному климатическому району: метеорологической дальности видимости  $S_M$ , температуры  $t_b$  и абсолютной влажности  $w_b$  приземного воздуха.

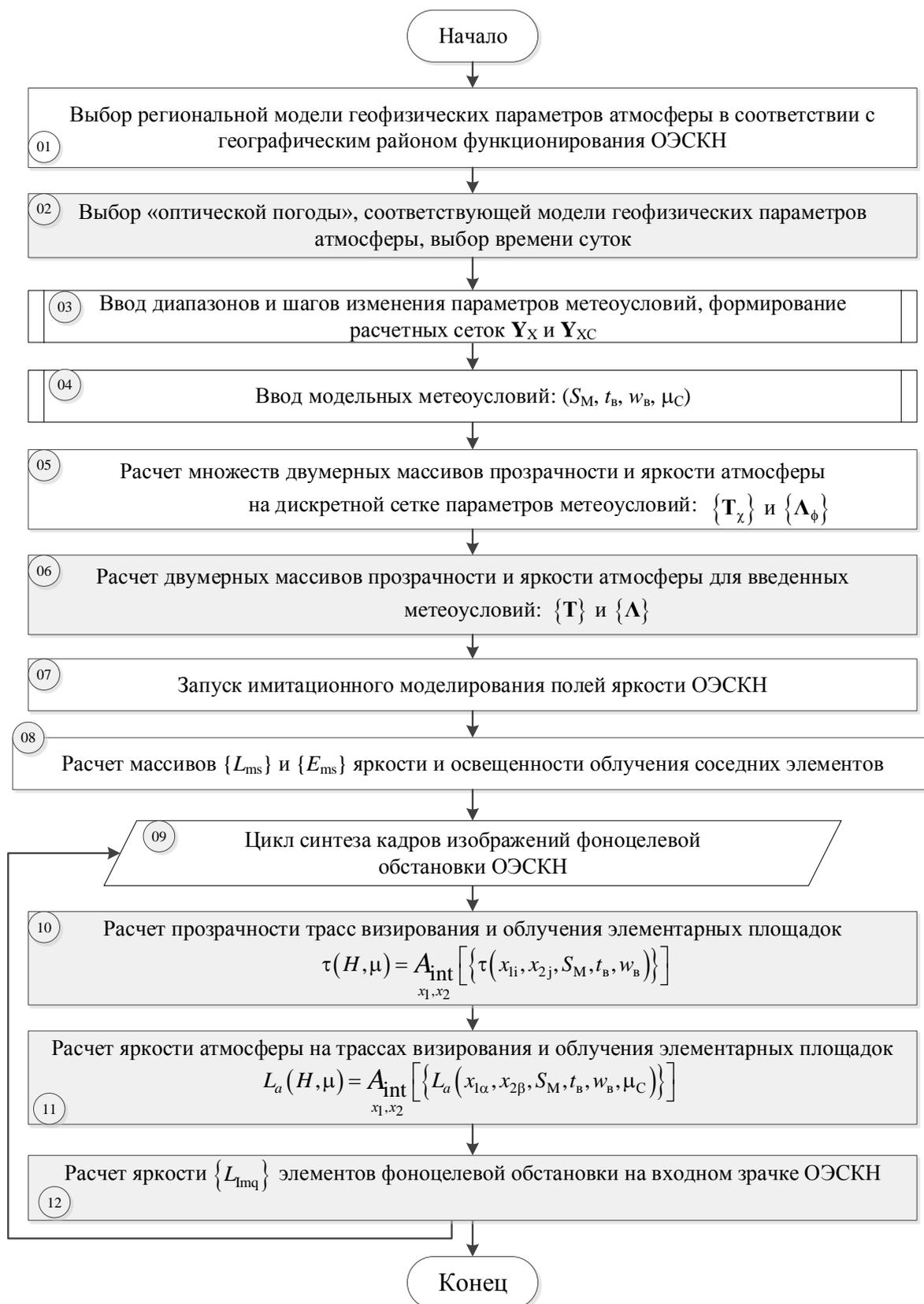


Рисунок 1 — Алгоритм воспроизведения метеоусловий при моделировании полей яркости фоноцелевой обстановки

После этого в блоке 03 алгоритма необходимо установить конкретные диапазоны и шаги их изменения в зависимости от поставленных целей исследований. Формируются расчетные сетки метеопараметров  $Y_X$  и  $Y_{XC}$ . В результате выполнения блока 03 формируется исходная информация, необходимая для реализации интерполяционного метода расчета прозрачности и яркости атмосферы на трассах фоноцелевой обстановки.

Конкретные параметры метеоусловий, для которых должно быть выполнено моделирование, вводятся в блоке 04. Там же вводится зенитный угол Солнца, если условия дневные.

В блоке 05 запускается расчет множества двумерных массивов прозрачности  $\{T_\chi\}$  и яркости  $\{\Lambda_\phi\}$  на лучевых трассах, который выполняется с применением одной из программных реализаций математической модели оптики атмосферы. Результаты блока 05 записываются в память вычислителя для применения в блоке 06. В нем выполняется расчет двумерных массивов прозрачности  $\{T\}$  и яркости  $\{\Lambda\}$  на лучевых трассах для введенных в блоке 04 метеоусловий. Подготовленные таким образом массивы  $\{T\}$  и  $\{\Lambda\}$  применяются в цикле синтеза изображений фоноцелевой обстановки.

Поэтому в блоке 07 выполняются процедуры запуска имитационного моделирования полей яркости ОЭСКН. Моделирование и синтез кадров изображений происходят циклично с периодом следования кадров видеосигнала моделируемой ОЭСКН. В каждом цикле, кроме прочих расчетов, выполняются блоки 10 и 11, в которых вычисляются прозрачности и яркости на трассах

визирования и облучения элементов фоноцелевой обстановки. Их результаты применяются в блоке 12 для вычислений яркостей  $L_{\text{img}}$  в потоках излучения, падающего на входной зрачек с направлений, задаваемых угловыми положениями чувствительных элементов матричного фотоприемного устройства.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют результаты применения разработанной методики к синтезу тепловизионных изображений трехмерных сцен сложной объектовой обстановки. Они позволяют визуально оценить разницу между получаемыми авиационной тепловизионной системой изображений. Простые метеоусловия, для которых получено первое изображение (рисунок 2) соответствуют метеорологической дальности видимости 20 км, влажности воздуха 45%, температуре воздуха 30°C.

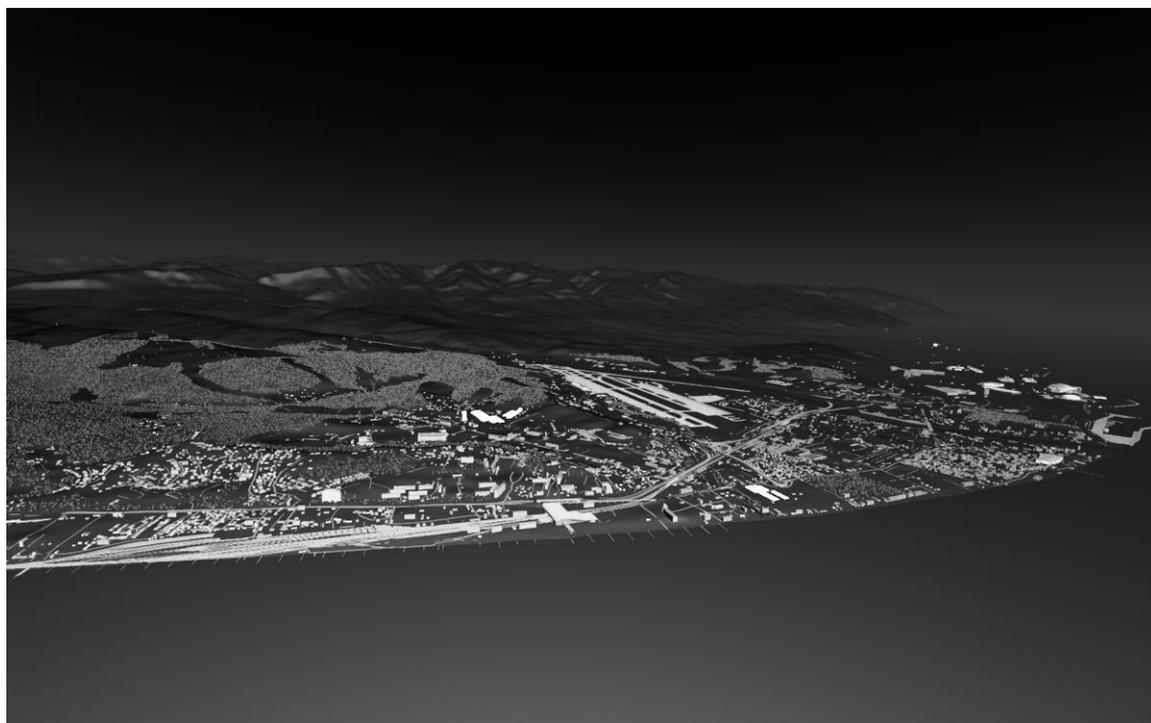


Рисунок 2 — Синтезированное тепловизионное изображение аэродрома в диапазоне 8-12 мкм, соответствующее регистрациям в простых метеоусловиях

На рисунке 3, иллюстрирующем результаты получения изображений в сложных метеоусловиях, заметны следующие особенности: отсутствие видимости горного массива, низкий контраст взлетно-посадочной полосы.



Рисунок 3 — Синтезированное тепловизионное изображение аэродрома в диапазоне 8-12 мкм, соответствующее регистрациям в сложных метеоусловиях (метеорологическая дальность видимости 2 км, влажность 90%, температура воздуха 30°C)

### **Заключение**

Изложенная в статье методика предназначена для применения в программных комплексах синтеза изображений фоноцелевой обстановки авиационных оптико-электронных систем конечного наведения. Она предоставляет методический аппарат, позволяющий обоснованно решать задачи учета метеоусловий при анализе

качества автоматического функционирования систем конечного наведения по захвату и сопровождению объектов интереса на траектории полета летательного аппарата. Применение разработанного методического аппарата позволяет воспроизвести при моделировании такие условия применения ОЭСКН, как визирование объектов на фоне горизонта, в условиях повышенной влажности воздуха или низких значений метеорологической дальности видимости.

Разработанный методический аппарат может быть применен при проведении исследовательских испытаний авиационных оптико-электронных систем [16], при создании комплексов их полунатурного моделирования [17]. Изложенная в статье методика была успешно реализована при создании программных модулей расчета прозрачности и яркости трасс визирования наземной фоноцелевой обстановки систем конечного наведения [18, 19]. Следует отметить, что предлагаемая автором статьи методика воспроизведения метеоусловий, разработанные математическая модель наземной фоноцелевой обстановки [18], методика и алгоритмы синтеза цифровых изображений [19] систем конечного наведения взаимосвязаны использованием математической модели коэффициента яркости конструкционных материалов и элементов ландшафта, которая предложена специалистами АО «НПО «ГИПО» [20-22]. Применение упомянутой модели позволяет учитывать в расчетах полей яркости объектов фоноцелевой обстановки их спектральные оптические характеристики, что существенно повышает достоверность синтезируемых изображений при моделировании авиационных оптико-электронных систем.

### Библиографический список

1. Кислицын Ю.Д., Хисматов И.Ф. Оценка вероятности визирования объектов при автоматическом выходе летательного аппарата на рубеж обнаружения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 9. С. 641 - 647.
2. Бариев Р.А., Балык О.А. Проблемы разработки и применения математических моделей и средств моделирования в процессе разработки и испытаний авиационной техники и вооружения // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2019. № 3 (43). С. 3 - 9.
3. Кислицын Ю.Д., Хисматов И.Ф. Показатели качества системы наведения при автоматической селекции объектов по эталонной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 8. С. 19 - 23.
4. Кислицын Ю.Д., Хисматов И.Ф. Оценка погрешностей селекции объектов при изменениях ракурсов наблюдения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 9. С. 18 - 23.
5. Сычев С.И. Практика и опыт моделирования высокоточных средств поражения в АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2019. № 3 (43). С. 10 - 19.
6. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Гончаренко В.И., Клевцов Р.П. Оперативная оценка ошибок попадания в цель свободнопадающих неуправляемых контейнеров беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2019. № 107.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107869>

7. Гусев С.Н., Сахно И.В., Хуббиев Р.В. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102169>
8. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденков А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
9. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Яцык В.С. Атмосфера и моделирование оптико-электронных систем в динамике внешних условий. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2015. – 629 с.
10. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Танташев М.В., Овсянников Я.В. Модель для расчета прозрачности атмосферы на произвольно ориентированных оптических трассах // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660671. Дата рег. в Реестре программ для ЭВМ 13.10.2014.
11. Танташев М.В., Филиппов В.Л., Овсянников Я.В., Вендеревская И.Г. Программа для расчета собственного излучения атмосферы в оптическом диапазоне электромагнитных волн // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660669. Дата рег. в Реестре программ для ЭВМ 13.10.2014.
12. Куншина М.С., Тиранов Д.Т., Филиппов В.Л., Яцык В.С. Моделирование полей яркости наземных фоноцелевых сюжетов в оптическом диапазоне спектра с учетом действия направленных источников подсветки // Оборонная техника. 2010. № 6 – 7. С. 28 - 33.

13. Танташев М.В., Трухина Н.Ю., Филиппов В.Л. Оптические модели атмосферы. Анализ, пути развития // Оборонная техника. 2010. № 6 – 7. С. 3 - 12.
14. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
15. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». – М.: Логос, 2004. – 444 с.
16. Ефремов В.А. Основные направления и научно-технические проблемы создания высокоточного авиационного оружия // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2018. № 3 (36). С. 21 – 40.
17. Хисматов И.Ф., Кислицын Ю.Д. Принципы построения комплексов полунатурного моделирования в целях оценки качества авиационных оптико-электронных систем конечного наведения «смотрящего» типа // Всероссийская научно-техническая конференция школа-семинар «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2015. – С. 384 - 396.
18. Хисматов И.Ф. Имитационная трехмерная модель поля яркости наземной фоноцелевой обстановки оптико-электронной системы конечного наведения // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2019. №4 (44). С. 19 – 38.
19. Хисматов И.Ф. Методика синтеза цифровых изображений фоноцелевой обстановки оптико-электронных систем конечного наведения в инфракрасном диапазоне // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2019. №4 (44). С. 39 - 55.

20. Тиранов Д.Т., Михайлов И.Д. Моделирование поляризационных характеристик поля яркости поверхностей фоно-целевых сцен и оценка их влияния на сигналы систем видения // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 60 - 64.
21. Тиранов Д.Т., Михайлов И.Д., Каплан В.Г., Непогодин И.А., Филиппов В.Л. Лазерный гониофотометр-поляриметр для исследования оптических характеристик конструкционных материалов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 54 - 58.
22. Тиранов Д.Т. Моделирование индикатрис коэффициентов яркости диффузно и направленно отражающих материалов при направленном облучении // Оборонная техника. 2010. № 6 – 7. С. 33 - 36.