

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 528.873.042

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЯРКОСТИ

© 2003 г. В. Г. Бондур\*, Н. И. Аржененко, В. Н. Линник, И. Л. Титова

Центральный научно-исследовательский институт "Комета", Москва

\*Тел.: (095) 274-08-96; e-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 20.11.2002 г.

На основе метода фазового спектра [5] предложены и реализованы подходы к моделированию многоспектральных изображений пространственно-неоднородных полей яркости, изменяющихся во времени. Разработаны блок-схема и программно-алгоритмическая реализация для синтеза таких полей с использованием аналитических моделей описания формы и распределения энергии в двухмерных пространственных спектрах различных природных образований, спектро-энергетических, географо-климатических моделей, моделей облачных полей и др. Приводятся примеры моделирования многоспектральных динамических полей яркости различных природных образований и оценивается адекватность предложенной технологии синтеза путем сопоставления с результатами экспериментальных измерений и результатами расчетов с использованием других моделей по различным критериям.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания и эффективного применения сложных аэрокосмических систем и аппаратуры дистанционного зондирования (ДЗ) необходимо наличие достоверной информации о состоянии полей входных сигналов в широком диапазоне условий наблюдения [1–6]. Получение достаточного объема такой информации в натурных экспериментах довольно сложно и требует значительных затрат [1–3]. Одним из подходов к обеспечению исходными данными задач проектирования и использования аэрокосмических систем может являться моделирование реализаций стохастических полей яркости, обусловленных наблюдаемыми объектами и окружающими фонами [5–14].

Поля сигналов на входе дистанционной аппаратуры, установленной на аэрокосмических платформах, в общем случае являются пространственно-неоднородными и нестационарными. Это связано с географическими и климатическими особенностями наблюдаемых объектов, изменением освещенности, случайному распределением горизонтально и вертикально-неоднородной облачности, ее эволюциями, эффектами затенения в поле обзора, и т.д. [15–20]. Поэтому при решении задач синтеза двухмерных реализаций полей яркости должны учитываться как характер текстур наблюдаемых объектов, их оптические характеристики в спектральных диапазонах аппаратуры ДЗ; условия освещения; метеорологическая обстановка; климатические характеристики наблюдаемых регионов [2–4], так и параметры, влияющие на величины сигналов, их нестационарность и пространственную неоднородность [3–5]. Это обуславливает сложность задачи синтеза и

требует разработки специальных методов для ее решения [5, 6].

В работе [5] описан метод фазового спектра для моделирования двухмерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры ДЗ. Преимущество последнего по сравнению с другими известными методами [7–11] заключается в теоретической обоснованности, использовании достоверных исходных данных по пространственным спектрам различных природных образований, которые обобщаются в виде пространственных спектральных моделей, а также в соответствии получаемых с его помощью результатов данным результатов реальных наблюдений [3, 5, 6].

В настоящей работе с использованием метода фазового спектра, разработанного в [5, 6], предложен программно реализованный алгоритм синтеза многоспектральных изображений динамических полей яркости с учетом их пространственной неоднородности.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРУЕМЫХ  
ПОЛЕЙ ЯРКОСТИ

Как уже упоминалось, особенностями наблюдаемых полей яркости являются: нестационарность, пространственная неоднородность, зависимость от длины волны электромагнитного спектра [1–6, 15, 16, 18].

*Спектральные особенности*

Как известно, изображения различных природных и антропогенных образований, получаемые аэрокосмическими системами ДЗ, сущест-

венно зависят от длины волны электромагнитного спектра [15, 16, 18–21].

Моделирование получаемых при этом полей яркости одновременно в нескольких спектральных диапазонах предполагает сохранение пространственной организации оптически активных компонентов при переходе от одних участков спектра к другим. В зависимости от спектральных диапазонов, в которых производится наблюдение, изображения различных объектов, являющихся элементами моделируемой сцены, могут либо сильно контрастировать друг с другом, либо быть неразличимы [6, 15, 16, 18–21]. При этом границы локальных неоднородностей физической среды, обусловленных элементами сцены или их внутренней структурой, не зависят от спектральных диапазонов наблюдения, в то время как текстура поля яркости может изменяться при переходе от одной области спектра к другой за счет сглаживания или усиления контрастов. Последнее приводит к изменению формы и параметров пространственных спектров одной и той же сцены в разных диапазонах спектра электромагнитных волн [3, 4, 6, 22]. При этом конкретные реализации фазовых спектров изображений связаны как с конкретным расположением объектов, так и с их яркостными характеристиками в используемом спектральном диапазоне.

### *Нестационарность*

Нестационарность полей яркости на входе аэрокосмических систем ДЗ связана прежде всего с перемещением облаков, изменением их размеров и вертикальным ростом, что изменяет как характер текстуры в фиксированной области поля обзора, так и абсолютные значения яркости в каждом его элементе. Кроме того, нестационарность обусловлена изменением условий освещения и затенением наблюдаемых элементов [3–6, 15]. Это изменяет абсолютные значения яркости каждого элемента поля обзора бортовой аппаратуры и вносит в наблюдаемые сцены дополнительные, зависящие от положения Солнца, компоненты. При моделировании эволюций облачности необходимо обеспечить, с одной стороны, "узнаваемость" каждого конкретного облака в последовательности кадров, разделенных временным промежутком, а с другой стороны, изменение положения и геометрической формы каждого облака со временем [2–4, 6, 15–17].

### *Пространственная неоднородность*

К источникам пространственной неоднородности полей яркости относятся [2, 3, 5, 6, 15, 17]: изменение угла наблюдения в пределах поля обзора, приводящее к соответствующим геометрическим искажениям; изменение типа зондируе-

мой поверхности в пределах поля обзора, вызывающее изменение текстуры и значений яркости в соответствии с географическими координатами; наличие разрывной облачности, которая случайным образом располагается в кадре; горизонтальная неоднородность атмосферы, приводящая к увеличению или уменьшению яркости при прочих равных условиях и т.п.

Необходимость учета тех или иных механизмов, обуславливающих пространственную неоднородность полей яркости и уровень генерализации их моделей, определяются исходными требованиями к задаче синтеза (типов летательного аппарата и средств ДЗ, пространственным разрешением, размером поля обзора и т.п.) [2, 3, 6].

Результаты исследований пространственных неоднородностей поля уходящего излучения показывают, что в отражательной части оптического спектра наблюдаемые поверхности являются ламбертовскими (кроме водной поверхности, снега и льда в области солнечного блика) [4, 6, 15, 18]. Облака имеют индикаторы более сложной формы. Значения спектральных альбедо также значительно различаются для зондируемой поверхности и облаков [6, 15, 18, 21].

В области спектра, где превалирует тепловое излучение, различия температур объектов земной поверхности между собой, как правило, значительно меньше, чем температур объектов и облаков [16]. Таким образом, неоднородность синтезируемых текстур обусловлена в значительной мере наблюдением разрывной облачности над зондируемой поверхностью, что может быть реализовано путем проведения синтеза случайных текстур по методу фазового спектра [5] отдельно для облаков различных ярусов и указанных поверхностей, с формированием итогового изображения из двух или более "слоев", которые могут перекрывать друг друга. Зондируемые поверхности при этом могут моделироваться по фрагментам, каждый из которых соответствует отдельному природному образованию со своими спектральными характеристиками [3, 5, 6].

Современные геоинформационные технологии позволяют с высокой точностью описать переходные процессы между различными ландшафтами с учетом "смешивания" двух или более типов объектов в каждом элементе карты, что обеспечивает при моделировании плавные изменения яркости сущи за счет затрат вычислительных ресурсов при работе с картами [23].

### *Фазовая проблема*

Пространственную организацию объектов в изображениях, формируемых аэрокосмическими системами ДЗ, в большей степени определяет фазовая часть спектра [3, 5, 6, 12, 14]. Так, смешение

сигнала не влияет на амплитуду преобразования Фурье, а приводит к появлению фазового множителя. Использование одного и того же фазового спектра, восстанавливающего границы областей с различной спектральной яркостью, обеспечивает тождественность пространственной организации компонент природного образования в изображениях различных диапазонов [5, 6].

Таким образом, поля яркости на входе бортовой аппаратуры аэрокосмических систем, которые с геометрической точки зрения представляют собой проекцию природных объектов в предметную плоскость, можно представить как результат взаимодействия “обобщенной фазы” (полностью обусловленной расположением всех оптически активных объектов, оптических неоднородностей внутри контура каждого объекта) и амплитудного спектра, связанного главным образом с формой, контрастами различных физических объектов, а также с микромасштабными неоднородностями яркости объекта, которые формируют высокочастотную часть пространственных спектров [5, 6, 24].

Описание конкретных фазовых спектров представляет собой сложную задачу из-за большого количества всех влияющих на этот процесс факторов и невозможности их адекватной интерпретации.

При моделировании и оценке параметров аэрокосмических систем ДЗ конкретное расположение неоднородных полей яркости в большинстве случаев не представляет интереса. Последнее связано с тем, что из-за случайной топографии географических объектов по отношению к точке визирования, колебаний поля обзора бортовой аппаратуры, погрешностей наведения и т.п., положение отдельных элементов природной среды в кадре изменяется случайным образом [4–6, 15, 16, 19–20]. В качестве модели фазовой составляющей примем равномерное распределение на интервале  $[-\pi; \pi]$ . Экспериментальное подтверждение этого факта содержится в [5, 6].

### СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФАЗОВОГО СПЕКТРА

Моделирование многоспектральных пространственно-неоднородных динамических полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры ДЗ может быть осуществлено с использованием методов синтеза случайных текстур. В качестве базовой математической модели для генерации реализаций двумерных стохастических текстур в настоящей работе используется метод фазового спектра, разработанный в [5, 6].

Метод основан на использовании информации о двумерных пространственных спектрах (ПС), гипотезы о распределении фазы и правил пространственной организации непроизводных элементов (морфологически однородных образований) в пределах моделируемого поля [3, 5, 6].

Специфика использования метода фазового спектра применительно к синтезу стохастических реализаций многоспектральных динамических пространственно-неоднородных полей яркости заключается в следующем:

- на основе данных о характеристиках аэрокосмической системы, параметрах аппаратуры ДЗ, условиях наблюдения, а также цифровых карт региона определяется состав природных объектов, находящихся в поле зрения [2–6];
- формируются пространственные и фазовые спектры для каждого наблюдаемого природного объекта [3, 5, 6, 13, 14];
- осуществляется генерация случайных текстур зондируемой поверхности и облачности методом фазового спектра [5, 6];
- для каждого пикселя картинной плоскости аппаратуры ДЗ с учетом сферической геометрии определяются тип наблюдаемого природного объекта, его высота и условия наблюдения [5, 6];
- рассчитываются значения характеристик яркости в заданных спектральных диапазонах [3, 5–7, 18, 20];
- производится преобразование поля текстуры поверхности в значения яркости, а поля текстуры облачности – в рельеф облачности над поверхностью Земли с учетом вертикальной эволюции и горизонтального движения облаков и далее – в значения яркости облачности [5, 6].

Генерация случайных текстур зондируемой поверхности и облачности производится дискретными методами по значениям спектральной плотности мощности, заданной в аналитическом виде, на равномерной сетке в декартовой системе координат. Такую сетку для указанных текстур назовем базовым кадром (БК), а для текстуры каждого слоя облачности – базовым кадром облачности (БКО). БК представляет собой прямоугольную область, покрывающую проекцию поля обзора дистанционной аппаратуры.

В случае наблюдения с двух летательных аппаратов (ЛА), БК представляет собой область, покрывающую проекции полей обзора обоих ЛА. БКО строятся отдельно для каждого облачного слоя и охватывают все потенциально попадающие в поле обзора облака с учетом их перемещения на протяжении всего фильма. При синтезе фильма БКО “протягивается” сквозь “рамку” БК в заданном направлении со скоростью горизонтального перемещения облаков.

Между точками на поверхности Земли и точками БК устанавливается соответствие, сохраняющее расстояние до точки наведения (которая принадлежит БК и БКО), и азимутальный угол с направлением на север. Это позволяет при проектировании наблюдаемой сцены в картинную плоскость и анализе взаимозатенения элементов

с различной высотой учитывать эффекты кривизны Земли, хотя фактически синтез текстуры осуществляется в плоскости БК.

Для учета изменения условий наблюдения и освещения в пределах поля зрения бортовой аппаратуры ДЗ производятся расчеты для точек на поверхности Земли, соответствующих каждому пикселу картинной плоскости (для этого используются геоцентрические координаты проекции пикселя на сферу с радиусом эллипсоида Красовского в точке наведения).

Для синтеза требуется использование следующих моделей, описывающих различные физические аспекты формирования поля яркости и его временных эволюций:

- географо-климатические модели [2, 5, 6];
- аналитические модели ПС различных природных образований [3–6];
- модели расчета энергетических характеристик яркости различных природных объектов при заданных условиях наблюдения [2, 3, 6, 25, 26];
- модели вертикальных эволюций и горизонтальных движений облачности.

Кроме того, для синтеза полей яркости требуется решения геометрических задач построения проекций картинной плоскости на поверхность Земли и в системе координат БК, задачи определения типов наблюденных природных объектов и их высоты, вычисления параметров наблюдения и освещения [2, 3, 6].

### АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СИНТЕЗА

Блок-схема алгоритма формирования изображений динамических пространственно-неоднородных полей яркости природных ситуаций, наблюдавших одновременно в нескольких спектральных диапазонах, разработанного на основе предложенного метода синтеза, представлена на рис. 1. Эта блок-схема является модификацией алгоритма синтеза, приведенного в [5]. Алгоритм состоит из 12 последовательных шагов.

#### *Шаг 1. Ввод и проверка исходных данных*

Пользователь формирует файл входных параметров, который содержит:

- данные об условиях наблюдения (календарная дата и время наблюдения, географические координаты точки наведения и подспутниковой точки, количество кадров в последовательности и их периодичность);
- описание наблюдавшей ситуации (балл общей облачности, тип и подтип синоптической ситуации, количество слоев облачности, тип и структура облачности, высота нижней границы облачности,

линейный размер облаков, скорость и азимут ветра на высоте нижней границы облачности);

– параметры бортовой аппаратуры (угловой размер элемента поля зрения, нижнюю и верхнюю границы спектрального диапазона, спектральную чувствительность, размеры выходного изображения).

Проверка исходных данных заключается в выявлении неправдоподобных природных ситуаций и форм облачности, неправильно заданных значений параметров.

#### *Шаг 2. Расчет параметров базовых кадров*

На этом этапе осуществляется расчет размера пикселя, размеров БК и БКО. Размер пикселя БК  $\Delta r^B$  рассчитывается как среднее длин дуг, соединяющих проекции четырех угловых точек пикселя картинной плоскости ЛА на Земле, соответствующего точке наведения. При наблюдении с двух ЛА вычисляется размер пикселя БК для каждого ЛА, и в качестве  $\Delta r^B$  выбирается наименьший. Для определения размеров БКО вычисляются координаты  $(x_i, y_j)$  проекции на него каждого пикселя границы изображения картинной плоскости и индексы ближайшего пикселя БК  $(k, l)$ . Одновременно ищутся минимальные и максимальные индексы  $k_{\min}, k_{\max}, l_{\min}, l_{\max}$  по каждой оси БК. При наблюдении с двух ЛА аналогично определяются минимальные и максимальные индексы для второго ЛА, затем проводится коррекция минимальных и максимальных значений.

Размеры БК определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} N_x^B &= k_{\max} - k_{\min} + I; \\ N_y^B &= l_{\max} - l_{\min} + I. \end{aligned} \quad (1)$$

При формировании временных последовательностей с заданной облачной ситуацией рассчитываются параметры БКО, включающего в себя собственно БК и зону, из которой за заданное время облака могут переместиться в поле зрения ЛА. При расчете параметров БК учитываются длительность последовательности, скорость и направление горизонтального движения облачков, определяемые по скорости и азимуту ветра на уровне высоты нижней границы облачности [26]. При формировании текущих кадров временной последовательности для каждого пикселя картинной плоскости устанавливается соответствующий пиксель БК и, далее, с учетом горизонтального сдвига облачности – пиксель БКО

#### *Шаг 3. Синтез поля случайной текстуры облачности в БКО*

Этот этап включает в себя подготовку исходных данных по ПС облачности, формирование



Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма синтеза.

пространственного и фазового спектров, дискретное быстрое преобразование Фурье [5].

Подготовка исходных данных по ПС включает в себя анализ входных параметров и параметров БКО и определение на его основе параметров модели ПС [3, 5, 6].

Аналитические модели ПС – реализация двумерной пространственной спектральной модели (ПСМ), обобщающей результаты обработки изображений полей яркости природных образований, полученных в аэрокосмических экспериментах для разных условий наблюдения [3–6, 22]. Они

строются с учетом особенностей метода синтеза и состава входных данных, которыми оперирует пользователь при синтезе изображений.

В общем случае спектральную плотность мощности можно представить в виде [4–6]

$$G(v_x, v_y) = \begin{cases} v^{-p}, & \text{если } f(v_x, v_y) \leq 0, \\ Q \cdot v^{-q}, & \text{если } f(v_x, v_y) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $f(v_x, v_y)$  – функция формы ПС;  $p$  и  $q$  – параметры наклона;  $Q$  – коэффициент.

Используемые ПСМ включают в себя [3, 6]:

- факторы условий, к которым относятся тип природного образования, его вид и разновидности, средние размеры непроизводных элементов текстуры;
- функцию формы ПС (под формой ПС понимают форму плоской фигуры, полученной по сечению спектральной плотности мощности на определенном уровне) и ее параметры;
- ПС в виде аналитической функции, описывающей распределение спектральной плотности мощности между гармониками в пределах и за пределами контура ПС и ее параметры (параметры наклона).

В качестве примера в табл. 1 представлены аналитические модели ПС, используемые для демонстрации метода синтеза.

Функция изотропной формы ПС задается уравнением окружности радиуса  $R$ . Функция эллиптической формы представляет собой уравнение эллипса, малая и большая полуоси которого зависят от поперечного  $l$  и продольного  $L$  размеров грядовых структур (волнистообразных). Вытянутая форма с дефицитом пространственных частот задается лемнискатой (частный случай овала Кассини) [3, 6]. Зависимость параметров формы от линейных размеров облачных элементов  $l$  и  $L$  – аналог проведения операции масштабирования в частотной плоскости.

Для изображений цепочек облаков вертикального развития форма ПС представляет собой сочетание изотропной и эллиптической форм. Эллиптическая форма описывает линейно-периодическую организацию облачности, изотропная – текстуру внутри одной гряды, обусловленную распределением отдельных облачных элементов, имеющих средний линейный размер  $l_m$  [6].

ПС изображений отдельных облаков нижнего яруса характеризуются сложной формой, скомпонованной из изотропной, которая определяет вид ключевых слоистообразной облачности, и вытянутой с дефицитом пространственных частот, отражающей волнистообразную внутреннюю текстуру и разорванные края облаков [4, 6, 22].

Изображениям почв, пустынь (без барханов) и зеленой растительности соответствуют изотропные ПС [4, 6, 22]. Радиус окружности зависит от характерного размера ландшафта.

Параметры наклона, соответствующие различным типам природных образований, целесообразно хранить в специальной базе данных. Весовые коэффициенты  $Q$  обеспечивает непрерывность ПС.

Для линейно-периодических текстур облачности (гряд) описание формы ПС приведено для случая ориентации гряд вдоль оси  $Y$  синтезируемого изображения. Изменение ориентации гряд

обеспечивается поворотом координат на соответствующий угол.

Разработанные аналитические модели ПС могут использоваться для некоторых типов природных образований, не включенных в пространственно-спектральные модели [3, 6], на основании предположения об идентичности текстур с объектами, представленными в этих моделях. Это касается плотных ( $Ci\ sp$ ), волнистообразных ( $Cc\ und$ ,  $Ac\ und$  и  $As\ und$ ) и кучевообразных ( $Cc\ cuf$ ,  $Ac\ cuf$ ) облаков верхнего и среднего ярусов, для которых можно предположить, что формы спектров будут такими же, как для соответствующих видов и разновидностей облаков нижнего яруса.

Расчет значений ПС осуществляется для каждой точки частотной области с координатами  $(v_x, v_y)$  с учетом поворота. Пространственные частоты (ПЧ)  $v_x$  и  $v_y$  определяются по формулам

$$v_x = k \cdot \Delta v_x; \\ v_y = \begin{cases} 1 \cdot \Delta v_y, & 1 \leq N_y^{BC}/2, \\ (1 - N_y^{BC})\Delta v_y, & 1 > N_y^{BC}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta v_x = 1/(N_x^B \cdot \Delta r^B)$  – дискрет по горизонтальной оси частот  $Ov_x$ ;  $\Delta v_y = 1/(N_y^B \cdot \Delta r^B)$  – дискрет по вертикальной оси частот  $Ov_y$ ;  $k$  меняется от 0 до  $N_x^B/2$ ; 1 – от 0 до  $N_y^B - 1$ .

Фазовый спектр для синтеза случайного поля ПС облачности генерируется как случайная величина для каждой точки частотной области с координатами  $(v_x, v_y)$  с помощью датчика случайных чисел, равномерно распределенных на интервале  $[-\pi, \pi]$  [5, 6].

После подготовки спектров осуществляется дискретное быстрое преобразование Фурье, результатом которого является поле случайной текстуры облачности  $\xi_{обл}^B(k, l)$ , используемое при построении индикатора  $I_{обл}^B(k, l)$  и рельефа облачности  $H^B(k, l)$ . При наличии двух слоев облачности этот этап повторяется и формируется поле текстуры облачности второго слоя.

#### Шаг 4. Формирование индикатора облачности

Индикация облачности проводится с использованием алгоритма пороговой обработки случайного поля ПС  $\xi_{обл}^B(k, l)$ . Порог индикации  $th$  рассчитывается из уравнения

$$\Pr\{\xi_{обл}^B(k, l) \geq th\} = 0.1 \cdot b, \quad (4)$$

где  $\Pr\{A\}$  – вероятность события  $A$ ;  $b$  – балл облачности.

**Таблица 1.** Аналитические модели пространственных спектров, используемые для демонстрации метода синтеза

Факторы условий			Тип формы ПС	Функция и параметры формы	Аналитическое описание ПС
Тип природного образования	Вид, разновидность	Линейный размер $l$ , км			
Облака вертикального развития: кучевые, $Cu$ ; кучево-дождевые, $Cb$	Отдельные облака Ячейки, $Cu\ hum$ , $Cu\ med$ , $Cb$	0.05–100 0.05–30 (поперечный размер)	Изотропная	$f(v_x, v_y) = v_x^2 + v_y^2 - R^2, R = \frac{1}{2l}$	$G(v_x, v_y) = \begin{cases} v^{-p}, & \text{если } f \leq 0, \\ R^{q-p} \cdot v^{-p}, & \text{если } f > 0 \end{cases}$
Гряды (цепочки), $Cb$	Гряды (цепочки), $Cb$	5–30	Сложная, сочетание изотропной и эллиптической форм (поперечный размер)	$f_1(v_x, v_y) = \frac{v_x^2}{a^2} + \frac{v_y^2}{b^2} - 1, a = \frac{1}{2l}, b = \frac{1}{2L},$ $f_2(v_x, v_y) = v_x^2 + v_y^2 - R^2, R = \frac{1}{l}$	$G(v_x, v_y) = \begin{cases} b^{-p}, & \text{если } f_1 \leq 0, \\ v^{-p}, & \text{если } f_1 > 0 \text{ и } f_2 \leq 0, \\ R^{q-p} \cdot v^{-q}, & \text{если } f_1 > 0 \text{ и } f_2 \leq 0 \end{cases}$
Отдельные облака, $Sc\ cuf$ , $St\ heb$ , $St\ fr$	Отдельные облака, $Sc\ cuf$ , $St\ heb$ , $St\ fr$	2–300	Сложная, сочетание изотропной и вытянутой с дефицитом ПЧ	$f_1(v_x, v_y) = v_x^2 + v_y^2 - b^2,$ $f_2(v_x, v_y) = (3v_x^2 + v_y^2)^2 - 8R^2(3v_x^2 - v_y^2),$ $b = \frac{1}{2l}, R = \frac{1}{2L}$	$G(v_x, v_y) = \begin{cases} b^{-p}, & \text{если } f_1 \leq 0, \\ v^{-p}, & \text{если } f_1 > 0 \text{ и } f_2 \leq 0, \\ b^{q-p} \cdot v^{-q}, & \text{если } f_1 > 0 \text{ и } f_2 \leq 0 \end{cases}$
Гряды (волны, валы), $Sc\ und$ , $St\ und$	Гряды (волны, валы), $Sc\ und$ , $St\ und$	2–30	Эллиптическая	$f(v_x, v_y) = \frac{v_x^2}{a^2} + \frac{v_y^2}{b^2} - 1, a = \frac{1}{2l}, b = \frac{1}{2L},$ $\rho = v / \sqrt{\frac{v_x^2}{a^2} + \frac{v_y^2}{b^2}}$	$G(v_x, v_y) = \begin{cases} v^{-p}, & \text{если } f \leq 0, \\ \rho^{q-p} \cdot v^{-q}, & \text{если } f > 0 \end{cases}$
Почва, пустыня, растительность	—	—	Изотропная	$f(v_x, v_y) = v_x^2 + v_y^2 - R^2, R = \frac{1}{2l}$	$G(v_x, v_y) = \begin{cases} v^{-p}, & \text{если } f \leq 0, \\ R^{q-p} \cdot v^{-p}, & \text{если } f > 0 \end{cases}$

В качестве оценки плотности распределения используется гистограмма поля текстуры.

Далее для каждого пикселя рассчитывается значение индикатора  $I_{\text{обл}}^B(k, l)$  по формуле

$$I_{\text{обл}}^B(k, l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \xi_{\text{обл}}^B(k, l) \geq th, \\ 0, & \text{если } \xi_{\text{обл}}^B(k, l) < th. \end{cases} \quad (5)$$

#### *Шаг 5. Формирование рельефа в БКО*

Формирование рельефа производится в БКО для каждого слоя. Поле случайной структуры  $\xi_{\text{обл}}^B(k, l)$  преобразуется к полю мощности  $h^B(k, l)$  и для каждого пикселя БК рассчитывается высота верхней границы облачности по формуле

$$H^B(k, l) = I_{\text{обл}}^B(k, l) \cdot [H_D + h^B(k, l)], \quad (6)$$

где  $H_D$  – детерминированная составляющая рельефа.

#### *Шаг 6. Формирование индикатора зондируемой поверхности и атмосферы в картинной плоскости каждого ЛА*

Формирование индикаторов по типам зондируемых поверхностей и модели атмосферы  $J_{\text{пп}}(i, j)$  осуществляется для каждого пикселя картинной плоскости каждого ЛА и заключается в определении для каждой точки проекции картинной плоскости на поверхность Земли кода типа зондируемой поверхности, кода широтной зоны и кода приземного аэрозоля. Для каждого пикселя картинной плоскости с индексами  $(i, j)$  рассчитываются соответствующие его проекции географические координаты  $(\phi_i, \lambda_j)$ . Из базы данных считываются код географического района, в который попала рассматриваемая точка, и затем соответствующий району в наблюдаемый сезон код зондируемой поверхности и код приземного аэрозоля [3, 5, 6]. Тип широтной зоны зависит от широты рассматриваемой точки: если  $\phi_i < 40^\circ$ , то точка находится в “тропиках”, а иначе – в “средних широтах”.

#### *Шаг 7. Синтез поля случайной текстуры зондируемой поверхности в базовом кадре обзора*

На этом шаге осуществляется подготовка исходных данных по пространственным спектрам зондируемых поверхностей, расчет пространственного и фазового спектров, дискретное быстрое преобразование Фурье, результатом которого является поле случайной текстуры каждой зондируемой поверхности  $\xi_{\text{пп}}^B(k, l)$ , наблюдаемой в поле обзора [5]. Этот этап аналогичен шагу 3. Для картинной плоскости каждого ЛА формиру-

ется поле текстуры зондируемой поверхности в соответствии с индикатором по типам последней и модели атмосферы  $I_{\text{пп}}(i, j)$ .

#### *Шаг 8. Определение типа наблюдаемого природного объекта, условий наблюдения и освещения в текущем пикселе картинной плоскости*

На этом этапе определяются тип наблюдаемого природного объекта, его высота, условия наблюдения и освещения и признак тени в текущем пикселе картинной плоскости ЛА с индексами  $(i, j)$ .

Определение типа наблюдаемого природного объекта  $T_{\text{по}}$  и его высоты  $H_{\text{по}}$  (в случае облачности) производится при проведении трассировки по лучу наблюдения. Если на линии наблюдения не оказалось ни одного облака, то наблюдается зондируемая земная поверхность, тип которой определяется по индикатору  $I_{\text{пп}}(i, j)$  в соответствующем пикселе. Если на трассе наблюдения встретилось облако, то типом  $T_{\text{по}}$  является тип наблюдаемого облака, а высотой  $H_{\text{по}}$  – высота точки наблюдения.

Признак тени вырабатывается при проведении трассировки по лучу Солнце–наблюденная точка аналогично определению типа наблюдаемого природного объекта. Если при движении вдоль луча от Солнца к наблюдаемой точке встретилась облачность, то признак затенения принимает значение “тень есть”.

На этом же шаге по положению наблюдаемой точки в пространстве вычисляются геометрические условия освещения и наблюдения: зенитный угол Солнца  $Z_\Theta$ , зенитный угол линии визирования  $Z_{\text{ЛВ}}$ , угол рассеяния  $\gamma$ .

#### *Шаг 9. Расчет средней интегральной яркости и дисперсии яркости наблюдаемого природного объекта в текущем пикселе картинной плоскости*

Средняя интегральная яркость  $B_{\text{по}}$  и дисперсия яркости наблюдаемого природного объекта  $D_{\text{по}}$  в текущем пикселе картинной плоскости вычисляются путем интегрирования спектральной яркости с учетом коэффициентов вариации.

Спектральная яркость природных объектов определяется путем пересчета типовых спектров на заданные условия наблюдения  $U(Z_\Theta, Z_{\text{ЛВ}}, \gamma)$  с использованием эмпирических зависимостей, вид которых определяется спектральным диапазоном. Типовые спектры яркости природных объектов для дневных условий, приведенные к стандартным условиям наблюдения  $U_s(Z_\Theta = 45^\circ, Z_{\text{ЛВ}} = 0^\circ, \gamma = 135^\circ)$ , а также для ночных условий наблюдения

при  $Z_{\text{ЛВ}} = 0^\circ$  и  $Z_{\text{ЛВ}} = 84^\circ$ , хранятся в специальной базе данных.

Средняя интегральная яркость определяется следующим образом:

$$B_{\text{ПО}} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda) B_{\text{ПО}}(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

где  $s(\lambda)$  – спектральная чувствительность аппарата;  $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$  – границы спектрального диапазона.

Дисперсия интегральной яркости рассчитывается по формуле

$$D_{\text{ПО}} = \sum_{m=1}^M B_{\text{ПО}}(\Delta\lambda_m) v_m, \quad (8)$$

где  $v_m$  – коэффициент вариации;  $B_{\text{ПО}}(\Delta\lambda_m)$  – интегральная яркость в интервале длин волн  $\Delta\lambda_m = [\lambda_{m-1}, \lambda_m]$ , для которого значение коэффициента вариации постоянно.

#### *Шаг 10. Расчет яркости для выходного изображения в текущем пикселе картинной плоскости*

Расчет яркости для выходного изображения  $B(i, j)$  осуществляется путем преобразования случайной текстуры зондируемой поверхности  $\xi_{nn}(i, j)$  или рельефа облачности  $H(i, j)$ . В преобразовании участвуют средняя интегральная яркость  $B_{\text{ПО}}$  и дисперсия яркости  $D_{\text{ПО}}$  наблюдаемого природного объекта для рассматриваемого пикселя картинной плоскости, вычисленных на предыдущем шаге, среднее значение и дисперсия случайной текстуры поверхности или мощности облачности.

При преобразовании случайной текстуры яркости необходимо учитывать, что функция плотности распределения яркости имеет асимметричный вид и близка к функции плотности логарифмически нормального распределения [6, 19–21]

$$f_B(z) = \frac{1}{z \cdot S_B \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln z - M_B)^2}{2S_B^2}\right\}, \quad z > 0, \quad (9)$$

где параметры  $M_B$  и  $S_B$  определяются по формулам

$$\begin{aligned} S_B &= \sqrt{\ln\left[1 + \frac{D_{\text{ПО}}}{B_{\text{ПО}}^2}\right]}, \\ M_B &= \ln[B_{\text{ПО}}] - \frac{S_B^2}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Поле яркости в картинной плоскости  $B(i, j)$  формируется следующим образом:

для зондируемой поверхности

$$B(i, j) = \exp\left\{\frac{\xi_{nn}(i, j) - M\{\xi_{nn}\}}{\sqrt{D\{\xi_{nn}\}}} S_B + M_B\right\}, \quad (11)$$

где  $\xi_{nn}(i, j)$  – случайное поле ПС поверхности;  $M\{\xi_{nn}\}, D\{\xi_{nn}\}$  – математическое ожидание и дисперсия величины  $\xi_{nn}$ ;

для облачности

$$\begin{aligned} B(i, j) &= \\ &= \exp\left\{\frac{(-1)^\delta \ln[H(i, j) - H_D] - m_h}{\sigma_h} S_B + M_B\right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $H(i, j)$  – рельеф облачности;  $H_D$  – детерминированная составляющая рельефа (см. формулу (6));  $m_h, \sigma_h$  – параметры поля мощности облаков  $h$  [6];  $\delta$  – коэффициент, равный 0, если средняя интегральная яркость не убывает по высоте, и 1 – в противном случае.

#### *Шаг 11. Запись результирующего изображения в выходной файл*

#### *Шаг 12. Учет эволюций облачности*

При формировании временных последовательностей изображений полей яркости облачности необходимо учитывать горизонтальные перемещения и вертикальный рост облаков.

Горизонтальное движение облаков обеспечивается путем “рассмотрения” той части БКО, которая будет соответствовать полю зрения ЛА в момент времени текущего кадра.

Вертикальные эволюции в облаках приводят к изменениям высоты верхней границы, и, следовательно, рельефа облачности, реализуемым следующим образом для текущего  $n$ -го кадра последовательности:

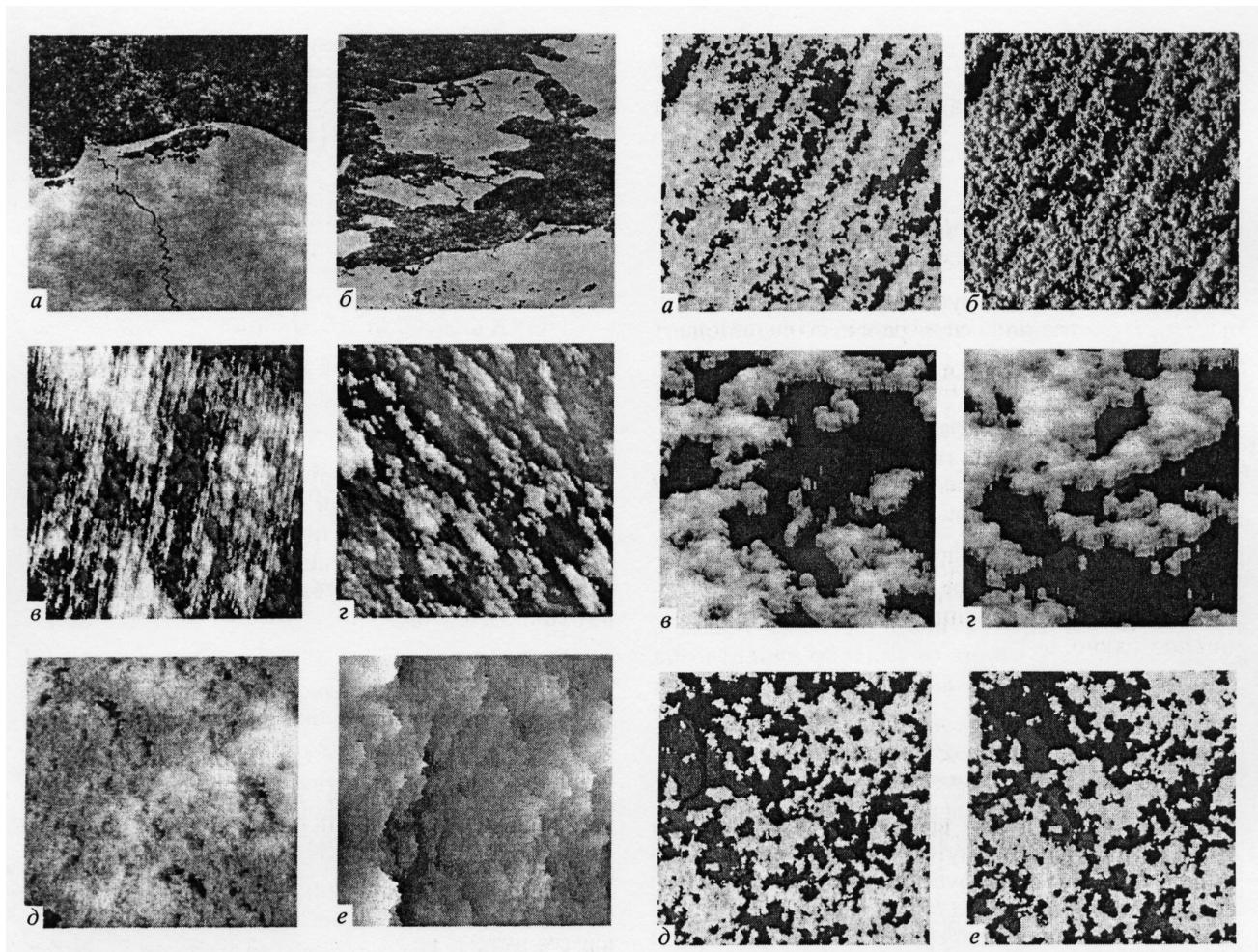
$$H_n^B(k, l) = H_{n-1}^B(k, l) + V \cdot \Delta t, \quad (13)$$

где  $H_n^B(k, l)$  – рельеф для  $n$ -го кадра;  $H_{n-1}^B(k, l)$  – рельеф для  $(n-1)$ -го кадра;  $V$  – скорость роста облаков;  $\Delta t$  – время между кадрами.

Рельеф облачности для первого кадра последовательности построен на шаге 5 ( $H_1^B(k, l) = H^B(k, l)$ ).

В том случае, если получившееся значение высоты превышает максимальную высоту верхней границы облачности, в окрестности этого облака в радиусе половины линейного размера рост прекращается и восстанавливается высота, рассчитанная для предыдущего кадра.

После проведения коррекции рельефа облачности для формирования следующего кадра повторяются шаги 8–11.



**Рис. 2.** Примеры синтеза пространственно-неоднородных полей яркости: *а, б* – сочетания водной поверхности и различных объектов суши; *в* – сочетания разрывной облачности верхнего и нижнего ярусов; *г* – сочетания двух слоев облачности в нижнем ярусе; *д, е* – проявления пространственной неоднородности при наблюдении сплошной облачности в различных ракурсах.

Предложенный алгоритм синтеза был реализован в виде программного комплекса для рабочих станций SUN SPARC в среде операционной системы Solaris и для персональных компьютеров в операционной системе Windows. Разработанное программное обеспечение позволяет формировать изображения полей яркости, наблюдаемых с одного или нескольких ЛА, в различных интервалах видимого и ИК-диапазонов спектра.

#### Примеры синтеза полей яркости природных образований в различных спектральных диапазонах

На рис. 2–4, в качестве примеров, представлены синтезированные фрагменты изображений полей яркости природных образований, наблюдаемых с

**Рис. 3.** Примеры синтеза нестационарных полей яркости: *а* – динамика яркости гряд кучевообразной облачности при наблюдении днем; *б* – в сумерках; *в* – динамика теней от облаков на суше при утреннем наблюдении; *г* – динамика теней при вечернем наблюдении; *д* – перемещение облаков: начальное положение; *е* – через 30 мин.

геостационарного космического аппарата. Размеры фрагментов соответствуют  $150 \times 150 \text{ км}^2$  на местности; пространственное разрешение 500 м.

На рис. 2 приведены результаты синтеза пространственно-неоднородных полей яркости, представляющих собой сочетание однородных природных образований. В качестве примеров на рис. 2а представлено изображение дельты р. Нил с сочетанием воды и суши с зеленою растительностью, на рис. 2б – изображение побережья Балтийского моря (Дания) с сочетанием воды и почвы, на рис. 2в, г – изображения двухъярусной облачности: нити высоких перистых облаков и нижние кучевые облака над почвой в районе Северной Африки (в), отдельные кучевые облака и пелена слоистых облаков над водой (г).

Наблюдение одной и той же природной ситуации в различном ракурсе также приводит к изменению пространственной организации поля яркости. На рис. 2 $d$ ,  $e$  представлены изображения ячеек 10-балльной кучеводождевой облачности, наблюдавшихся одновременно с двух космических аппаратов, один из которых расположен непосредственно над точкой  $50^{\circ}$  в.д.; подспутниковая точка второго космического аппарата находится на гринвичском меридиане. На рисунке хорошо видна разница в пространственной структуре полей яркости. При наблюдении в надир на формирование поля яркости основное влияние оказывают верхушки облаков, а также тени, отбрасываемые наиболее высокими клубами (рис. 2 $d$ ). При наклонном наблюдении яркость в картинной плоскости аппаратуры ДЗ обусловлена отражением на БКО, тени отсутствуют, поскольку Солнце расположено практически за ЛА (рис. 2 $e$ ).

Примеры синтеза динамических полей яркости представлены на рис. 3. Движение Солнца в течение суток приводит к динамике яркостных характеристик природных объектов в отражательном диапазоне спектра. На рис. 3 $a$ ,  $b$  изображены гряды кучевообразной облачности, наблюдавшиеся днем и в условиях сумерек соответственно. Днем освещается практически весь верхний слой облачности, отражение от которого обуславливает яркость в поле зрения аппаратуры (рис. 3 $a$ ). В условиях сумерек освещаются БКО, отбрасывающие длинные тени (рис. 3 $b$ ). На рис. 3 $c$ ,  $d$  демонстрируется динамика теней от облаков на суше при утренних и вечерних условиях наблюдения. Источником нестационарности также являются горизонтальные эволюции облачности, демонстрируемые на рис. 3 $d$ ,  $e$ . Анализ показывает, что за 30 мин., разделяющих два изображения, облака переместились в северо-восточном направлении на 30 км.

Результаты синтеза полей яркости, наблюдавшихся одновременно в нескольких спектральных диапазонах, демонстрируются на рис. 4. Изображения побережья Северного моря в ближнем ИК-диапазоне и полосе поглощения водяного пара представлены на рис. 4 $a$ ,  $b$  соответственно. Хорошо видно, что при переходе из диапазона 1.0–2.0 мкм в полосу поглощения 2.6–2.8 мкм происходит выравнивание значений яркости, приводящее к снижению контраста и практически к пропаданию границ между водой и сушей. Изображения кучевых облаков над Корсикой и Средиземным морем, наблюдавшиеся одновременно в видимом и среднем ИК-диапазонах спектра, приведены на рис. 4 $c$ ,  $d$ . В видимой области спектра яркость природных объектов обусловлена их отражательными способностями: облака имеют наибольшую яркость и, соответственно, самый светлый тон на изображении, яркость суши несколько превосходит яркость воды и отображается темно-серым тоном,

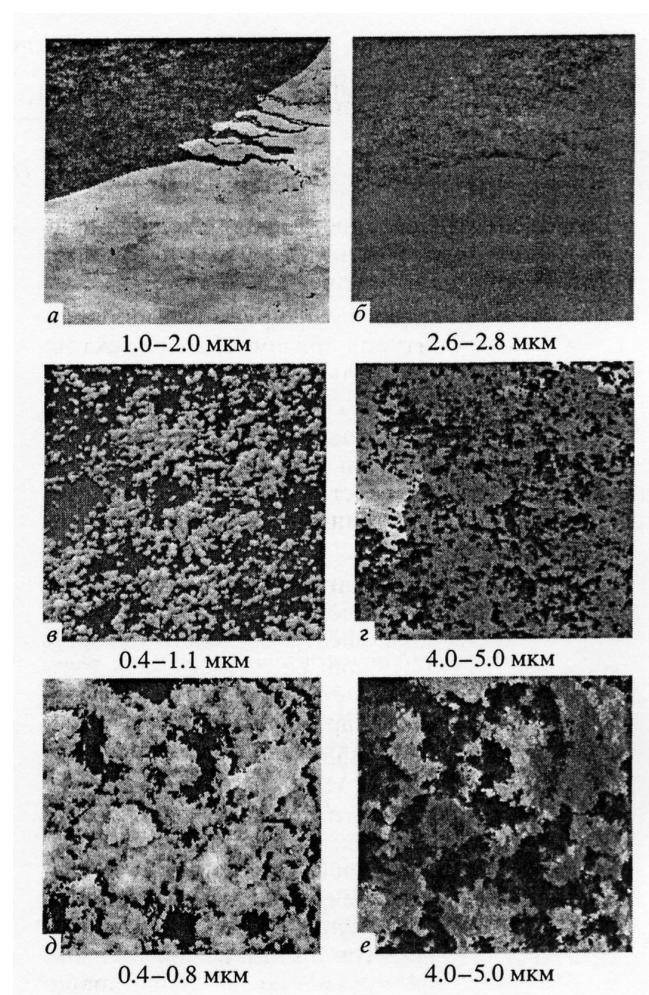


Рис. 4. Примеры синтеза многоспектральных полей яркости

вода имеет почти черный тон (рис. 4 $e$ ). В спектральном диапазоне 4.0–5.0 мкм, где яркость объектов определяется в основном излучательной способностью, происходит инверсия яркости облаков (рис. 4 $f$ ). Самую высокую яркость имеет наиболее нагретая суши. Температура воды несколько ниже температуры суши и отображается соответственно светло-серым тоном.

Двухъярусная облачность в видимом и среднем ИК-диапазонах представлена на рис. 4 $d$ ,  $e$ . В видимом диапазоне яркость слоистых облаков нижнего слоя и ячеек кучевых облаков верхнего слоя практически одинакова, поэтому облачность верхнего яруса можно отдешифровать только по теням, отбрасываемым на нижний слой (рис. 4 $d$ ). В спектральном диапазоне 4.0–5.0 мкм облака хорошо различаются из-за разности температур: более высокие и холодные ячейки кучевых облаков имеют самую низкую яркость и отображаются самым темным тоном, расположенные низко ра-

зорванные слоистые облака немного теплее и выглядят светлыми, наибольшую яркость имеет хорошо нагретая суша (рис. 4e).

### ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ

При оценке адекватности предложенных подходов необходимо учитывать, что работа программного обеспечения предполагает:

- воспроизведение в моделируемых изображениях рисунка контуров физических объектов, располагающихся в наблюдаемом районе, таких, как граница "вода-суша", контуры облаков и т.д.;

- воспроизведение в каждом пикселе изображения значений яркости в заданном спектральном диапазоне, соответствующих реально измеряемым для расположенного в этом месте физического объекта.

Эти характеристики влияют на математическое ожидание и дисперсию поля яркости, а также на его пространственный спектр, на основе которых можно построить функции различного вида (разности, отношения, контрасты, функции расстояний, оценки правдоподобия и др.) для оценки соответствия синтезируемых изображений реальным картинам.

Следует отметить, что при получении реальных изображений неизбежны различного рода погрешности, полная компенсация которых невозможна, а влияние на результаты сопоставления трудно оценить. Поэтому вынесение суждения об адекватности результатов синтеза реальным изображениям возможно только "в среднем", при анализе совокупности изображений, но не по отдельным изображениям, для которых должны рассчитываться и анализироваться выбранные критерии.

При этом валидацию абсолютных значений яркости целесообразно осуществлять по отдельной методике, так как изображения, которые

можно было бы использовать для оценки адекватности метода синтеза полей яркости, обычно регистрируются в относительных энергетических единицах и требуют радиометрической коррекции. Для этого необходима полная информация о параметрах используемой аппаратуры ДЗ, в связи с чем оценки адекватности энергетических характеристик, используемых при синтезе, а также процедуры их пересчета на различные условия наблюдения проводятся раздельно путем сопоставления с экспериментальными данными и результатами расчета по другим методикам [6, 25, 26].

Кроме статистических можно применять визуальные критерии сопоставления. Так, для того чтобы убедиться в качественном соответствии результатов синтеза данным объективной реальности, достаточно сравнить примеры, приведенные на рис. 2 – 4, с изображениями, используемыми при анализе и прогнозе погоды по наблюдениям метеорологических спутниковых систем [17].

В качестве статистических критериев оценки адекватности были выбраны параметры, приведенные в табл. 2.

Первые два критерия достаточно хорошо характеризуют поведение амплитуд яркости и, следовательно, перепады яркости элементов. Третий критерий подчеркивает границы контрастных элементов. Критерий наклона ПС позволяет объективизировать их сходство или различие в терминах исходных данных для синтеза.

Оценка математического ожидания локальных вариаций яркости изображения, используемая для расчета критерия средних локальных вариаций, производится по формуле:

$$\bar{\sigma}^{\text{local}} = \frac{1}{N_x - 2N_y - 2} \sum_{u=1}^{N_x - 2N_y - 2} \sum_{v=1}^{N_y} \sigma^{\text{local}}(u, v), \quad (14)$$

Таблица 2. Критерии и параметры, используемые для оценки адекватности

Название критерия и обозначение	Расчетная формула	Характеристики, используемые для расчета	Пороговые значения
Отношение математических ожиданий, $K_1$	$K_1 = \frac{M_s}{M_r}$	$M$ – оценка средней яркости изображения	0.66–1.5
Отношение стандартных отклонений, $K_2$	$K_2 = \frac{\sigma_s}{\sigma_r}$	$\sigma$ – оценка СКО яркости изображения	0.66–1.5
Отношение средних локальных вариаций, $K_3$	$K_3 = \frac{\bar{\sigma}_s^{\text{local}}}{\bar{\sigma}_r^{\text{local}}}$	$\bar{\sigma}^{\text{local}}$ – оценка математического ожидания локальных вариаций яркости изображения	0.66–1.5
Наклон ПС, $K_4$	$K_4 = \frac{ a_r - a_s }{a_r}$	$a$ – параметр наклона ПС, рассчитываемый по оценке спектральной плотности мощности изображения	0–0.4

Таблица 3. Результаты проверки адекватности результатов синтеза

Тип природного объекта	Процент соответствия для различных критериев			
	$K_1 = \frac{M_s}{M_r}$	$K_2 = \frac{\sigma_s}{\sigma_r}$	$K_3 = \frac{\bar{\sigma}_s^{\text{local}}}{\bar{\sigma}_r^{\text{local}}}$	$K_4 = \frac{ a_r - a_s }{a_r}$
Кучевообразная облачность над водой или сушей	100	93	71	93
Перистообразная облачность	100	100	88	100
Многоярусная облачность	100		95	100
Слоистообразная облачность	100	92	92	100
Высокослоистая облачность	100	100	100	100
Кучеводождевая облачность	100	86	100	100
Вода, безоблачно	100	100	100	100
Суша, безоблачно	82	91	82	91
Итого по всем типам объектов	98	94	89	98

где

$$\sigma^{\text{local}}(u, v) = \sqrt{\frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 (X(u+k, v+l) - \bar{X}^{\text{local}}(u, v))^2}{8}}, \quad (15)$$

$$\bar{X}^{\text{local}}(u, v) = \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 X(u+k, v+l), \quad (16)$$

где  $N_x, N_y$  – размеры исходного изображения в пикселях;  $X$  – исходное контрольное или синтезированное изображение.

При определении пороговых значений критериев принимается гипотеза о нормальном распределении вариаций яркости, как это часто делается в теории ошибок при отсутствии других разумных предположений. Сами пороговые значения определялись по уровню значимости 30%.

Проверка адекватности синтезированных изображений реальным по количественным критериям проводилась по данным, полученным с космической системы глобального наблюдения в различных поддиапазонах области спектра 2.6–3.6 мкм [1]. Для этого было использовано 83 изображения, полученные в дневные,очные и сумеречные часы при различных метеоусловиях. Результаты обобщения полученных данных приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, наиболее чувствительным к расхождениям результатов синтеза и реальных изображений является критерий локальных вариаций, который не выполнен в 9 случаях из 83. Это может быть связано с тем, что конфигурация границ контрастных объектов испытывает сильное влияние одновременно спектраль-

ной и частотно-контрастной передаточных характеристик используемой аппаратуры, которое не до конца учитывается при первичной обработке, в то время как синтезированные изображения можно считать полученными "идеальной" аппаратурой. Однако в целом рассмотренные четыре критерия выполнены в 71% случаев, что позволяет считать результаты проверки удовлетворительными.

Для сравнения ПС синтезированных и контрольных полей яркости, в качестве которых использовались изображения, зарегистрированные сканирующим устройством МСУ-СК [6, 22]. Для сравнения ПС реальных и синтезированных изображений применялись критерии максимума корреляции и среднего расстояния. Значения критериев сравнения (максимум корреляции больше 0.9, среднее расстояние меньше 0.2) демонстрируют хорошее совпадение ПС.

Для валидации абсолютных значений яркости синтезированных изображений было проведено сопоставление получаемых спектров яркости природных образований с результатами расчета по программе "LOWTRAN" и результатами натурных измерений спектров яркости. При проведении сравнения использовался критерий отношения спектральной яркости. Для большинства длин волн в диапазоне 0.4–5.0 мкм значения критерия, определяемые по результатам работы программы синтеза и "LOWTRAN", лежат в интервале 1–5.5 и с учетом среднеквадратического отклонения – в допустимых при решении многопараметрических задач подобного рода пределах.

Экспериментальные данные о спектрах яркости природных образований получены при исследованиях, проводившихся с борта орбитальных станций "Салют-6", "Салют-7" и "Мир" с помощью спектрометров МФС-1, "МСС-2", "МСС-2МВ",

“СКИФ”, спектрорадиометра “Микрон” и др. [1, 3, 6, 26]. Проведенное сопоставление результатов расчета по предложенному алгоритму с экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласие (значения критерия отношения спектральной яркости в большинстве случаев лежат в пределах 1–4.9).

Таким образом, из сопоставления текстурных и энергетических характеристик синтезированных изображений с данными, полученными экспериментальными и теоретическими методами, следует, что предложенный метод синтеза изображений обеспечивает получение адекватных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе экспериментально обоснованной модели генерации реализаций двумерных стохастических текстур – метода фазового спектра, частных моделей, описывающих пространственную и временную неустойчивость полей яркости, особенности наблюдения природных ситуаций одновременно в нескольких спектральных диапазонах, а также совокупности геометрических задач описания поверхности Земли и облачности в трехмерном пространстве, разработаны алгоритмы и программы синтеза многоспектральных динамических пространственно неоднородных двумерных полей яркости, реализованные на рабочих станциях и персональных компьютерах. Осуществлен синтез полей яркости различных природных ситуаций, демонстрирующий возможности разработанного метода. Проведено сопоставление результатов синтеза с экспериментальными данными, полученными с различных космических аппаратов и расчетами по другим моделям (в том числе LOWTRAN), подтвердившее его адекватность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- Бондур В.Г., Савин А.И. Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–33.
- Бондур В.Г. Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмическими системами ДЗ// Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.
- Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 1–2. С. 14–38.
- Бондур В.Г. Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратурой методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 28–44.
- Бондур В.Г. Модели полей излучения для систем ДЗ. Курс лекций. – М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 1998. 368 с.
- Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 5. С. 98–120.
- Прэтт У., Фожра О., Гагалович А. Применение моделей стохастических текстур для обработки изображений // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 54–64.
- Андреев Г.А., Базарский О.В., Глауберман А.С. и др. Анализ и синтез случайных пространственных структур // Зарубеж. радиоэлектрон. 1984. № 2. С. 3–33.
- Андреев Г.А., Потапов А.А. и др. Машинный синтез текстур, имитирующих земную поверхность // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 1. С. 115–121.
- Викторов А.С., Зайцев М.Л. Математическая модель ландшафтного рисунка грядово-ячеистых и ячеистых песков как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 51–58.
- Бондур В.Г., Мурынин А.Б. Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // Опт. атмосферы. 1991. Т. 4. № 4. С. 387–393.
- Bondur V.G., Kulakov V.V., Murinin A.B. Numerical Simulations of Spatial Nonuniform Sea Surface Optical Images // Theses of 14-th Internat. Conf. on Coherent and Nonlinear Opt. L., 1991. V. 3. P. 27.
- Bondur V.G., Murinin A.B. Images of Natural Formations Synthesized Numerically with Definite 2-D Spectra // Theses of 14-th Internat. Conf. on Coherent and Nonlinear Opt. L., 1991. V. 1. P. 11–12.
- Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Свейна Ф. и Дейвис Ш. С. М.: Недра. 1983. 415 с.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. - Л.: Гидрометеоиздат. 1978. 80 с.
- Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. Ветлова И.П., Вельтищева Н.Ф. Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 300 с.
- Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. Ч. 1. МО СССР. 1986. 159 с.
- Фу К.С., Ландгрит Д.А., Филлипс Т.Д. Информационная обработка сельскохозяйственных данных, полученных путем дистанционных измерений // ТИИЭР. 1969. Т. 57. № 4. С. 310–315.
- Яковлев А.А. О распределении спектральных яркостей облаков // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 3. С. 318–321.
- Аржененко Н.И., Бондур В.Г. Распознавание природных образований по результатам зондирования из космоса // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987.

22. Аржененко Н.И., Бондур В.Г. Классификация облачных форм по пространственным спектрам изображений // Опт. атмосферы. 1989. № 11.
23. Демерс М. Географические информационные системы. Основы.: Пер. с англ. М.: Дата+, 1999. 490 с.
24. Опенхайм А.В., Лим Дж.С. Важность фазы при обработке сигналов // ТИИЭР. 1983. Т. 69. № 5. С. 39–53.
25. Kneizys X., Shettle E.P. et al. Users Guide To LOWTRAN7. Hansom: Air Force Geophysics Laboratory. 1988. August 16. 146 p.
26. Веселов Д.П., Попов О.И. Сравнение измеренных из космоса ИК-спектров излучения облаков с результатами расчетов // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 2. С. 30–34.

## The Simulation of Multispectral Air-Space Images of Dynamic Brightness Fields

V. G. Bondur, N. I. Arzhenenko, V. H. Linnik, I. L. Titova

*Central Scientific and Research Institute "Kometa", Moscow*

The approaches for modeling of multispectral images of spatial-heterogeneous fields of brightness varied in time are offered and realized. The block-diagram and program-algorithmic realization for synthesis of such fields with use of analytical models of the description on form and distribution of energy in two-dimensional spatial spectra of various natural formations. spectral-energetic, geographic-climatic models. models of fields of cloudiness, etc. are developed. The examples of modeling of multispectral dynamic fields of brightness of various natural formations are given and the adequacy of the offered technology of synthesis by comparison to results of experimental measurements and results of computations with use of other models by various criteria is estimated.