

Моделирование полноцветных изображений Земли: симуляция поля радиационной яркости земной атмосферы и подстилающей поверхности

В.Н. ХОХЛОВ¹, В. ЛУКИН¹ и С.В. ХОХЛОВ²

¹ Российская Антарктическая экспедиция, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Vladimir Khokhlov, Valery Lukin & Sergey Khokhlov (2023) Modelling fullcolour images of Earth: simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface, *Annals of GIS*, 29:1, 143-161. <https://doi.org/10.1080/19475683.2022.2064911>

Аннотация: Данная статья посвящена проблеме реалистичной цветопередачи изображений космических объектов средствами компьютерной графики. В форме небольшого очерка авторы описывают сущность, источники и функциональность современных графических приложений. Особое внимание уделено применению современной графики в космической науке. Конкретной целью исследования является использование компьютерной графики в области дистанционного зондирования земной поверхности. Описывается метод синтеза изображений для создания реалистичных 3D-моделей цветных изображений Земли в видимом спектральном диапазоне, наблюдаемых с геостационарных орбит. Метод основан на усовершенствованной модели атмосферного излучения для произвольных условий наблюдения в неоднородной сферической атмосфере. Усовершенствованы физические модели горизонтально неоднородных распределений плотности, температуры и альbedo атмосферы Земли. Все расчеты выполнены в соответствии с моделью молекулярного рассеяния излучения в сферической атмосфере, учитывающей рассеяние солнечного света вперед и отражение от поверхности планеты. Это позволяет получить изображения Земли в различных фазах, наблюдаемые с произвольных высот. Полученные теоретические цветные изображения Земли сравнивались с черно-белыми снимками с современных геостационарных спутников.

Ключевые слова: альbedo; цветные изображения Земли; земная атмосфера; спутник; геостационарные орбиты.

Modelling full-colour images of Earth: simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface

Vladimir N. KHOKHLOV¹, Valery LUKIN¹ and Sergey V. KHOKHLOV²

¹ Russian Antarctic expedition, Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: This article is dedicated to the problem of realistic colour rendering of space object images using the tools of computer graphics. In the form of a short essay, the authors describe the essence, sources and functionality of modern graphics applications. Particular attention is paid to the application of modern graphics in space science. The specific purpose of the study is the use of computer graphics in the field of remote sensing of the Earth's surface. This article describes a method for synthesizing images to develop realistic 3D models of colour Earth images in the visible spectral range, observed from geostationary orbits. The method is based on the improved model of atmospheric radiation for arbitrary sighting conditions in an inhomogeneous spherical atmosphere. Physical models of horizontally inhomogeneous distributions of atmospheric density, temperature and albedo of the Earth were improved. All calculations were performed in accordance with the model of molecular scattering of radiation in a spherical atmosphere, taking into account sunlight forwardscattering and reflection from the planet's surface. This allows us to obtain images of the Earth in its various phases, observed from arbitrary heights. The obtained theoretical colour images of the Earth were compared with black and white images from modern geostationary satellites.

Keywords: Albedo; the earth colour images; earth's atmosphere; satellite; geostationary orbits.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, on behalf of Nanjing Normal University. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

Методы дистанционного зондирования земной поверхности, использование которых началось в 1960-х годах с запуском искусственных космических спутников, привели к настоящей технической революции во многих дисциплинах наук о Земле (Родионов и др. 2020; Котелева и Френкель 2021). Их использование позволило оценить планетарное распределение различных природных объектов и процессов, а также антропогенное воздействие на окружающую среду для решения различных фундаментальных и прикладных задач естествознания. Первым и наиболее распространенным методом дистанционного зондирования является фотографирование поверхности Земли и облачного покрова в видимом спектре. В то же время начало космической эры ознаменовалось бурным развитием компьютерной графики, стимулированным успешным переходом от механических калькуляторов к электронно-вычислительным машинам. Краткий исторический обзор развития компьютерной графики в части изображения Земли представлен в Приложении А.

1.1 Исследования природных явлений и компьютерная графика

Синтез изображений для создания реалистичных 3D-моделей – одно из самых популярных направлений соответствующих исследований (Зотти 2007; Чепыжова, Правдина, Лепихина 2019). Таким образом, мы получили красочные изображения природных объектов, таких как горы, деревья, море, облака, а также изображения Земли (рис. 2) (Претхам, Ширли, Смитс 1999). Эти изображения широко используются в фильмах или коммерческих телепередачах, например, в библиотеке Изображения Земли в КГ (Шаттерсток 2020). Однако здесь в основном стремились получить реалистичные, а не физически соответствующие изображения.

Синтез изображений используется для моделирования структурных видов зданий и городских территорий (Канеда и др. 1991; ХоссейниХагиги и др. 2020), пейзажей при различных атмосферных условиях, видов тумана при различном солнечном освещении и цветах заката и рассвета (Классен 1987). Синтез также применим для сравнения расчетных моделей, предназначенных для прогнозирования суточных изменений освещенности неба для решения задач энергосбережения (ХоссейниХагиги и др. 2020; Литтлфейр 1994). В этих работах показан синтез изображений с учетом влияния атмосферы, но только в приближении однократного рассеяния.

Между тем, на наш взгляд, для идеального моделирования изображений Земли, напоминающих наблюдения с метеорологических спутников, и их объединения с моделями погоды, в этом случае они могут быть использованы для изучения изменений климата, а также для симуляции космических полетов, необходимо иметь физически обоснованные изображения, требующие многократного рассеяния. Эта тема была изучена и описана в нескольких работах (Нишита и др. 1996; Томоюки и др. 1993; Нишита и Добаши. 2001). Авторы этих статей показали детальные изображения ландшафта и моря, но не рассмотрели объем данных о солнечном свете, рассеянном в атмосфере и отраженном от поверхности Земли (диффузная составляющая). Кроме того, не был учтен неоднородный характер распределения температуры и альбедо Земли, влияющий на географическое распределение высотных изменений плотности атмосферы.

Следует отметить, что синтез различных природных явлений и изображений сцен осуществляется в основном цифровыми художниками, поэтому реальность атмосферных моделей в значительной степени игнорируется, что сказывается на результатах исследования.

В то же время специалисты по атмосферной оптике предоставляют свои результаты в графическом или табличном виде, используя многочисленные атмосферные и метеорологические параметры, которые плохо контролируются в экспериментах. Поэтому эти данные трудно, а иногда и невозможно сопоставить с большим объемом данных, полученных в ходе современных космических экспериментов, представленных в виде изображений.

1.2 Роль оптических моделей в визуализации природных явлений

Дальнейшее развитие технологий фото- и видеосъемки позволило заменить черно-белые изображения снимаемых объектов цветными, фото- и видеопленки – носителями цифровой информации, а также значительно увеличить разрешающую способность объективов фотоаппаратов. Особое значение в этом процессе приобрели цветные изображения подстилающей поверхности. Они позволили оценить площади распространения поверхностных водных масс и зон биологической продуктивности в Мировом океане и определить различные детали наземных ландшафтов

в очень широком цветовом спектре. Сейчас со спутников, находящихся на геостационарных орбитах, можно получить самые большие по площади изображения подстилающей поверхности Земли.

Различные компьютерные программы позволяют увеличить скорость обработки цветной цифровой информации, но их алгоритмы в основном основаны на принципах (параллельные вычисления и задержки в отдельных задачах), которые не обеспечивают в видимом спектре объективной картины реалистичной цветопередачи для природных объектов и явлений.

Во многом это связано с переходом в микропроцессорах от одноядерных чипов к многоядерным. Эта тенденция, наиболее заметная в семействах процессоров, направлена на выполнение параллельных рабочих нагрузок. Это позволяет максимизировать общую пропускную способность, хотя при этом может потребоваться пожертвовать последовательной продуктивностью отдельной задачи и влиянием функций пропускания света земной атмосферы фото- и видеокамерами.

Это во многом связано с влиянием светопропускания фото- и видеокамер через земную атмосферу. Эти функции характеризуются сильными флуктуациями в трехмерной плоскости земной поверхности, а также во временном диапазоне их сезонных и синоптических отложений.

В настоящее время особой популярностью пользуется программа MODTRAN (пропускание/излучение атмосферы с умеренным разрешением) в различных версиях. Первая версия этой программы была опубликована в 1987 году (Берк, Бернштейн и Робертсон MODTRAN 1987). Соответствующие подпрограммы были интегрированы в LOWTRAN 6. Спектральное разрешение этой новой версии превышает 5 см^{-1} (FWHM). Основное внимание уделяется расчетам FASCOD (Код быстрой атмосферной подписи) со спектральной базой данных молекулярной спектроскопии HITRAN (Передача с высоким разрешением) (Ротман и др. 2013). Она представляет собой коллекцию спектроскопических параметров, используемых для моделирования и анализа пропускания и излучения света в газовых атмосферах планет.

LOWTRAN 7 – это модель распространения с низким разрешением (Кнейзис, Эрик Шеттл и Четвинд 1988) и одновременно компьютерный код для прогнозирования пропускания атмосферы и фонового излучения от 0 до $50\,000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 20 см^{-1} . Код основан на модели LOWTRAN 6 (Кнейзис и др. 1983). В модель было добавлено многократно рассеянное излучение, а также новые параметры модели молекулярных полос и новые параметры поглощения озона и молекулярного кислорода для ультрафиолетового излучения. Другие модификации включают модель пустыни, зависящую от ветра, и новые модели перистых облаков, облаков и дождя.

Стоит отметить компьютерный код SENTRAN, первоначально разработанный исследователями из Пенсильванского университета. Он позволяет пользователям быстро оценить пропускание и излучение LOWTRAN в ответ на возмущения входных атмосферных условий. Код предоставляет удобный и эффективный интерфейс для создания нескольких входных колод LOWTRAN, а также графическое представление выходных данных в 2D и 3D форматах. Основной целью данной работы является обновление исходного кода SENTRAN для использования с LOWTRAN7 (Лонгтин и др. 1991), а также MODTRAN (Лонгтин и Хуммель 1993).

Компьютерный код серии MODTRAN в настоящее время используется по всему миру исследователями и учеными в правительственных агентствах, коммерческих организациях и учебных заведениях для прогнозирования и анализа оптических измерений в атмосфере. Код интегрирован во многие оперативные и исследовательские системы датчиков и обработки данных. Они обычно используются для коррекции атмосферы в мультиспектральных и гиперспектральных снимках дистанционного зондирования (MSI и HSI). Наиболее продвинутой версией является код MODTRAN6 (Берк и др. 2014). Этот код представляет собой современную модульную объектно-ориентированную архитектуру программного обеспечения, включающую интерфейс прикладного программирования, расширенные физические функции, построчный алгоритм, дополнительный набор физических инструментов и новую документацию.

В отличие от других кодов, данный код содержит большое количество входных параметров. Поэтому при учете взаимосвязанных физических процессов применяются сложные аппроксимирующие операции, что делает использование сложным и противоречивым с точки зрения самосогласованности получаемых результатов. Более того, привлечение большого количества аргументов к функции, описывающей какой-либо процесс, может стать корректировкой.

Кроме того, поскольку MODTRAN является преемником LOWTRAN, он также унаследовал ряд «рудиментов» и «атавизмов». Например, это шестислойные модели земной атмосферы, программный код на FORTRAN, проблема реальности вычислений сферичности и другие, менее значимые.

К тому же, несмотря на обширный аппарат имеющихся возможностей локальной коррекции атмосферы, MODTRAN не способен решать глобальные задачи.

В данной статье рассматривается влияние атмосферы Земли на возможность определения цветопередачи изображений ее исходящего излучения, получаемых с искусственных спутников Земли (Хохлов и др. 2005) и наземных астрономических обсерваторий (Хохлов 2001a), в процессе наблюдения космических объектов Солнечной системы.

В настоящее время экспериментальный и теоретический материал по оптическим и другим параметрам планетарных атмосфер позволяет поставить задачу создания самосогласованной модели, которая будет отражать глобальное распределение атмосферного излучения. В этой модели атмосфера рассматривается как единое целое, все компоненты которого взаимосвязаны. Модель должна иметь небольшое количество настраиваемых входных данных, адекватно описывающих условия наблюдений, геофизическую обстановку и состояние атмосферы.

Поэтому мы создали модель рэлеевского рассеяния в локально изотермической сферической атмосфере с неоднородным широтным распределением температуры и альbedo поверхности планеты.

Используя ранее созданную физическую модель рэлеевского рассеяния в атмосферах планет с неоднородным распределением температуры и альbedo поверхности (Хохлов 2001a), мы разработали алгоритм реалистичного расчета изображений Земли, наблюдаемых из космоса, с произвольной точки наблюдения. Эта модель имеет жестко ограниченный набор входных данных, а именно: спектральный диапазон, юлианскую дату, географические координаты и высоту, которые определяют положение наблюдателя, а также угловой диапазон, охватываемый наблюдателем объекта (или его части).

В следующих разделах подробно описан алгоритм предлагаемой модели построения реалистичных изображений Земли.

2. Материалы, методы, структуры данных и алгоритмы схем

В настоящее время большое количество спутниковых данных о ландшафте, растительности и облаках представлено в виде цветных или черно-белых изображений (Стриженок, Иванов, Супрун 2019; Ковязин и др. 2020a; Казанцев, Бойков, Вальков 2020; Муста, Журов, Беляев 2019; Игнатъев, Кессель 2016; Копылова, Стариков 2018; Ковязин и др. 2020b). Для его анализа необходимо знать о воздействии земной атмосферы и освещении, используемом спутниковой аппаратурой для получения изображения различных природных объектов. Эти сведения можно получить, если сравнить экспериментальные данные в виде цветных изображений с результатами модельных расчетов для аналогичных изображений различных ландшафтов, растительности, облаков, снежного и ледового покрова (Кожаев и др., 2017). В данном параграфе описан способ преобразования результатов моделирования исходящей радиации Земли в цветное изображение. Цветами показана уходящая радиация при различной освещенности неоднородной поверхности Земли прямой и отраженной солнечной радиацией.

2.1. Реалистичная модель рэлеевского рассеяния в атмосфере Земли

Как уже упоминалось выше, целью данной статьи является визуализация результатов расчета радиационной яркости Земли с использованием реалистичной модели молекулярной, сферической, трехмерной неоднородной земной атмосферы с неоднородным (интегральным) распределением альbedo и температуры поверхности.

Такая реалистичная модель была опубликована в 2001 году (Хохлов 2001a) одним из авторов данной статьи. Однако, посчитав, что одной ссылки на эту работу недостаточно, мы включили в нее общее описание основных концепций и ключевых решений в виде блочной структуры, представленной на рис. 1.

Поскольку модели распределений альbedo и температуры в (Хохлов 2001a) были упрощены, мы сочли целесообразным представить их в обновленном виде (см. разделы 2.2 и 2.4.2).

Что касается описания структурной схемы блока, то следует отметить, что все параметры, указанные в верхнем блоке, являются обязательными, и отсутствие какого-либо параметра лишает нас возможности сравнивать результаты визуализации для теоретических и экспериментальных изображений.

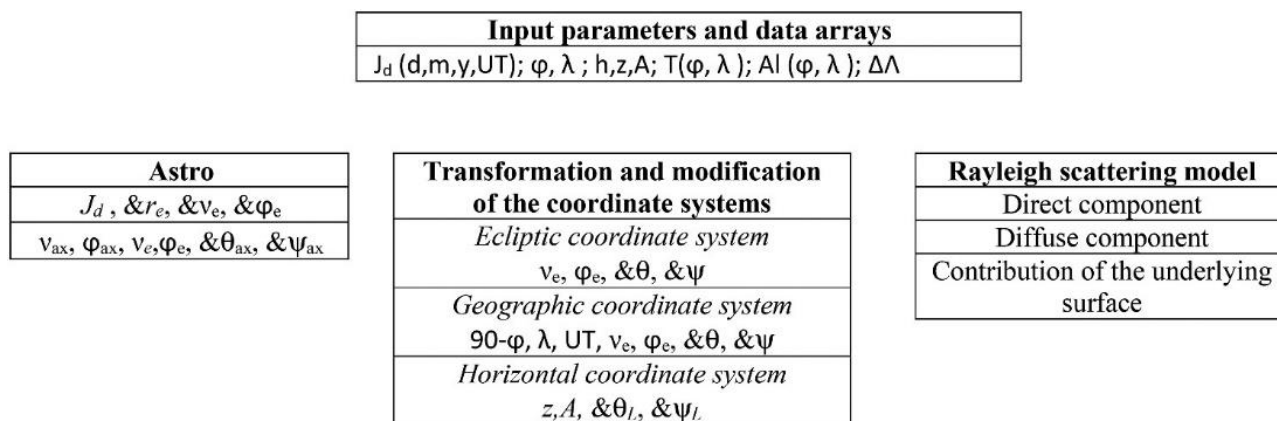


Рис. 1. Блочная структура сферической модели яркости рэлеевского излучения в атмосфере

Блок **‘Входные параметры и массивы данных’** содержит набор из 7 параметров и 2 массивов. К параметрам относятся юлианская дата J_d , географическая широта φ , долгота λ и высота h наблюдателя, зенитный угол z и азимут A направления наблюдения, а также спектральный диапазон $\Delta\lambda$. Полная юлианская дата состоит из дня d , месяца m , года y и времени UT .

Набор параметров φ, λ, h, z и A характеризует положение годографа точки наблюдения относительно поверхности Земли. Массивы температуры поверхности $T(\varphi, \lambda)$ и распределения альбедо $Al(\varphi, \lambda)$ рассчитываются отдельно по зависимым параметрам и сохраняются в бинарных файлах. Результаты симуляции температуры и альбедо являются входными параметрами, которые мы используем для расчета исходящего излучения Земли как планеты.

В блоке **‘Astro’** по юлианской дате J_d определяется положение Земли на эклиптической орбите (r_e, v_e, φ_e); по эклиптическим парам v_e, φ_e и v_{ax}, φ_{ax} для оси вращения Земли определяются угловые геоцентрические координаты θ_{ax} и ψ_{ax} . Все координаты приведены к стандартному сферическому представлению. Например, r_e – расстояние до Солнца, первая угловая координата v_e – со-широта, вторая φ_e – долгота. Подстрочный индекс обозначает объект, например, «e» означает Землю, а «ax» – ось вращения Земли. Амперсанд (&) в начале обозначает результирующие параметры. Параметры без амперсанда – это исходные известные значения, которые формируют результат.

Блок **‘Преобразование и модификация систем координат’** предназначен для определения соотношений между несколькими системами, используемыми для расчета компонент рассеянного излучения в атмосфере Земли. В число систем координат входят эклиптическая с центром на Солнце, геоцентрические (географическая, горизонтальная и полученная основная), а также две другие, связанные с моделированием оптических процессов в атмосфере Земли. Эклиптическая, географическая и горизонтальная системы, в силу различия их угловых характеристик, преобразуются в единую основную систему координат. Последняя, в свою очередь, модифицируется в две удобные системы для расчета оптических явлений, в том числе освещенных областей, разделенных терминатором.

Блок **‘Модель рэлеевского рассеяния’** содержит расчеты спектральной яркости для исходящего излучения атмосферы и подстилающей поверхности Земли (приземных и облачных областей).

Задачи, решаемые в этом блоке, включают

- оценку яркости однократного рассеяния прямого солнечного излучения (прямая компонента B_R^1);
- оценку яркости рассеянного солнечного излучения, отраженного от подстилающей поверхности и ослабленного при прохождении через атмосферу (диффузная компонента B_{Rs}^2);
- учет вклада ослабленного излучения подстилающей поверхности, освещенной Солнцем (B_E).

При решении этих задач большое внимание уделяется сложным вопросам пропускания атмосферы и фазового разделения освещенных и затененных областей Земли.

2.2. Расчет пространственно-временного распределения температуры над поверхностью океана и суши

Соответствующий экспериментальный и теоретический материал по оптическим параметрам планетарных атмосфер позволяет нам поставить задачу и создать самосогласованную модель глобального распределения атмосферного излучения. Модель должна включать небольшое количество легко контролируемых входных данных, корректно описывающих условия наблюдений, геофизическую ситуацию и состояние атмосферы. При таком подходе очень важен правильный выбор структурных параметров модели атмосферы, включающих временные и пространственные вариации (Махов, Сытько, 2018). Модель структурных параметров также должна быть самосогласованной и использовать минимальное количество входных данных. Именно такой подход был выбран для расчетов сезонной вариации и широтного распределения температуры над поверхностью Земли.

Температура рассчитывалась согласно (1) с использованием одномерного уравнения теплопроводности вместе с граничным условием для поверхности, начальным условием и выражением функции $F(t, \varphi, \lambda)$ для нагрева поверхности планеты солнечной радиацией,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{K}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= k_s \sigma T^4 \exp(-\tau_T) - F(t, \varphi, \lambda) \\ T(z) \Big|_{t=0} &= T_{00} \\ F(t, \varphi, \lambda) &= \mu(t)(1 - A) \frac{E_s}{r^2} \times \cos \zeta \cdot Tr(k_s, R, \zeta) \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях используются следующие символы: t – время, z – высота, T – температура, K и c – плотность, проводимость и теплоемкость планетарной оболочки.

Граничное условие на границе раздела с широтой φ и долготой λ задается уравнением теплового баланса между притоком тепла, обусловленным солнечной радиацией, и его оттоком за счет исходящего теплового излучения планеты. В выражении для граничного условия мы используем следующие параметры: σ и k_s – постоянная Стефана-Больцмана и значение серости планеты. Для учета ослабления теплового излучения, испускаемого поверхностью планеты, был введен экспоненциальный множитель, влияющий на величину серости поверхности $\exp(-\tau_T)$. Экспоненциальная функция, ее форма и параметры определяются эмпирически, исходя из условия наилучшей формы поставки данных из (Тверской 1962) о сезонном изменении температуры на всех широтах. При этом распределение альбедо A задавалось в соответствии с картой, рис. 2.



Рис. 2. Распределение альбедо Земли

Зенитный угол Солнца ζ , пропускание атмосферы T_r и масса атмосферы m , входящие в выражение для функции нагрева F , рассчитывались по формуле (2),

$$\begin{aligned} \tau_T(\varphi) &= \alpha \cdot (A - A_e) \\ \cos \zeta &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos [S_o(t) + \Omega t - \alpha + \lambda] \\ Tr(k_s, R, \zeta) &= \exp[-k \rho_0 e^{-\frac{R-R_0}{H}} H \cdot m(\zeta, R, H)] \\ m(\zeta, R, H) &= \sqrt{\frac{\pi R}{H[2 + (\frac{\pi R}{H} - 2) \cos^2(\zeta)]}} \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении используются следующие символы: R – радиус места наблюдения ($R_0 = 6371$ км), δ и α – склонение и правое восхождение Солнца, Ω – угловая скорость Земли, S_0 и E_s – звездное время и солнечная постоянная на расстоянии 1 а.е., r_e – расстояние от планеты до Солнца и k – коэффициент поглощения. Параметры $\alpha_A = 2,5$ и $A_e = 0,3$, а μ равен 1, если $\zeta < 90^\circ$, и 0, если $\zeta \geq 90^\circ$.

Пропускание атмосферы рассчитывалось для изотермического высотного распределения плотности атмосферы с высотным отложением H .

Решение уравнения теплопроводности и усредненная по суткам функция нагрева F_d были представлены в виде ряда Фурье (3), а для представления усредненной функции нагрева n – число гармоник, в большинстве случаев достаточно 1-2 гармоник, но при коротком световом дне (полярная область) требуется 4-5, а иногда и 6 гармоник:

$$\begin{aligned} T(z, \varphi, t) &= T_0(\varphi) + \sum_n T_n(\varphi) \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{n\omega\rho c}{2K}}\right) \cdot \cos\left[n\omega(t - t_n) - z \sqrt{\frac{n\omega\rho c}{2K}}\right] \\ F_d(t, \delta, \varphi) &= \int_0^{2\pi} d\lambda F(t, \varphi, \lambda) = \frac{H_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [H_{c_n} \cdot \cos(n\omega t) + H_{s_n} \cdot \sin(n\omega t)] \end{aligned} \quad (3)$$

Символ ω используется для обозначения средней скорости вращения Земли вокруг Солнца. Коэффициенты разложения функции нагрева в ряд Фурье определялись из выражений

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{\Omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} a_0(\delta, \varphi) \cdot dt \\ H_{c_n} &= \frac{\Omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} a_0(\delta, \varphi) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt \quad H_{s_n} = \frac{\Omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} a_0(\delta, \varphi) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt \\ a_0(\delta, \varphi) &= \frac{2E_s(1-A)}{T_r} \int_{-\frac{T_2}{2}}^{\frac{T_2}{2}} \left\{ \mu(t) \cdot \frac{\cos \zeta}{r_e^2} \cdot \exp[-k_s \rho_0 e^{-\frac{R-R_0}{H}} H \cdot m(\zeta, R, H)] \right\} dt \end{aligned} \quad (4)$$

При подстановке ряда Фурье температуры и функции нагрева в уравнение теплопроводности параметры представления выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} T_0^4 &= H_0 \cdot \frac{\omega}{2\pi K_s \sigma} & T_n &= \sqrt{\frac{H_{c_n}^2 + H_{s_n}^2}{\left[\sqrt{\frac{nK\omega\rho c}{2} + 4k_s \sigma T_0^3}\right]^2 + \frac{nK\omega\rho c}{2}}} \\ \cos(\omega t_n) &= \frac{\omega}{\pi} \cdot \frac{T_n}{H_{c_n}^2 + H_{s_n}^2} \cdot \left\{ H_{c_n} \cdot \left(\sqrt{\frac{nK\omega\rho c}{2} + 4k_s \sigma T_0^3}\right) - \sqrt{\frac{nK\omega\rho c}{2}} \cdot H_{s_n} \right\} \\ \sin(\omega t_n) &= \frac{\omega}{\pi} \cdot \frac{T_n}{H_{c_n}^2 + H_{s_n}^2} \cdot \left\{ H_{s_n} \cdot \left(\sqrt{\frac{nK\omega\rho c}{2} + 4k_s \sigma T_0^3}\right) + \sqrt{\frac{nK\omega\rho c}{2}} \cdot H_{c_n} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Рассчитанные значения среднего широтного распределения месячных температур января и июля сравнивались с данными из (Тверской 1962). Сравнение показало, что расчет дает приемлемые результаты, хотя он отражает температуру поверхности, а не атмосферы. Температура атмосферы уточняется по экспериментальным данным. Наиболее значительные расхождения мы наблюдаем в полярных широтах, где сильное влияние атмосферной циркуляции не учитывалось в расчетах.

Отметим, что предложенный метод расчета температуры вообще не учитывает ее суточное распределение, так как на одном из этапов функция нагрева усредняется за сутки.

Моделирование глобального распределения температуры с использованием описанного способа интегрального распределения альбедо позволяет создать трехмерную неоднородную модель распределения плотности атмосферы на основе рассчитанного распределения температуры без привлечения каких-либо других данных.

2.3. Цветопередача спектров в цветовых системах

Уже давно существуют цветовые модели, предназначенные для воспроизведения реалистичных графических компьютерных изображений. В 1931 и 1964 годах Международная комиссия по освещенности (МКО) разработала стандартный наблюдатель с соответствующими функциями цветового соответствия. Стандартный наблюдатель МКО 1931 также известен как МКО 1931 2° Стандартный наблюдатель, а координаты цветности основаны на таблицах (Райт 1929; Гилд 1931). Альтернативой является МКО 1964 10° Стандартный наблюдатель, который получен из работ (Стайлз и Берч 1959; Сперанская 1959).

Диаграмма цветности МКО (Смит и Гилд 1931- 32; Труды МКО 1964) требует включения всех цветов, видимых средним человеком. Кроме того, диаграммы МКО служат основой для расчетов цветности в любой системе представления, работающей с реалистичными изображениями. На практике координаты цветности МКО XYZ являются посредниками между вычисленным цветовым спектром и цветопередачей RGB, которая управляет графическим монитором. Для таких преобразований цветов существуют вполне определенные процедуры.

2.3.1. Определение трихроматических координат (XYZ)

Первая из этих процедур – определение трихроматических координат (XYZ): необходимо создать цветное изображение цели в соответствии с ее расчетным спектром излучения и преобразовать этот спектр в трехцветные параметры XYZ. Для определения XYZ-значений расчетного спектрального распределения E_λ используются характеристические уравнения

$$X = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \tilde{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \tilde{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \tilde{z}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

где \tilde{x} , \tilde{y} и \tilde{z} – функции цветового соответствия, k – нормировочный коэффициент (если $k=1$, то X , Y и Z равны $\text{W m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$), а интегрирование осуществляется по весь видимый диапазон, обычно от 380 до 780 нм.

Функция цветового соответствия \tilde{y} фактически определяется как идентичная видимости человеческого глаза, не более 683 lm W^{-1} при $\lambda = 555 \text{ nm}$, т.е. можно вычислить освещенность L в зависимости от спектра, подставив $k = 683 \text{ lm W}^{-1}$ в уравнение для значения Y (единицы $E(\lambda) - \text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$, следовательно, единицы освещенности $L - \text{lm m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ или cd m^{-2} .)

2.3.2. Преобразование цветовых координат XYZ в цветовое пространство RGB

Следующий этап – переход от функций цвета (XYZ) к цветовым пространствам (RGB). Диаграммы цветности RGB и XYZ связаны линейным преобразованием, форма матрицы которого имеет вид

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где \tilde{x} , \tilde{y} и \tilde{z} – цветовые функции красного, зеленого и синего люминофоров при полном выходе.

Метод вычисления компонентов матрицы для перевода цветовых функций (XYZ) в функции RGB предполагает применение стандартных цветовых характеристик. Наиболее распространенными являются система NTSC ('NTSC'), система EBU ('EBU (PAL/SECAM)'), система SMPTE ('SMPTE'), система HDTV ('HDTV'), система МКО ('МКО') и система Rec709 ('МКО REC709').

Расчет матричных элементов осуществляется последовательной реализацией следующих шагов.

Для выбранного цветового стандарта составляется матрица перехода от координат XYZ к координатам RGB:

$$\tilde{A}_{XYZ} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r = 1 - x_r - y_r & z_g = 1 - x_r - y_r & z_b = 1 - x_r - y_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

Затем определяется вектор белой точки для излучателя, используемого стандартом:

$$W_{XYZ} = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w = 1 - x_w - y_w \end{bmatrix} \quad (9)$$

Определяется предварительная матрица обратного преобразования в соответствии со следующим выражением:

$$\tilde{A}_{RGB} = \frac{A_{XYZ}^{-1}}{\text{Det}(A_{XYZ}^{-1})} \quad (10)$$

Рассчитываются RGB координаты белой точки по формуле

$$W_{RGB} = \frac{\tilde{A}_{RGB} \cdot W_{XYZ}}{y_w} = \begin{bmatrix} r_w \\ g_w \\ b_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

Нормировка на значение y_w – координат белой точки проводится в соответствии с общепринятым соглашением.

Последний шаг предусматривает выполнение нормировки элементов предварительной матрицы обратного преобразования в соответствии с выражениями

$$A_{RGB} = \begin{bmatrix} r_x = \frac{\tilde{r}_x}{r_w} & r_y = \frac{\tilde{r}_y}{r_w} & r_z = \frac{\tilde{r}_z}{r_w} \\ g_x = \frac{\tilde{g}_x}{g_w} & g_y = \frac{\tilde{g}_y}{g_w} & g_z = \frac{\tilde{g}_z}{g_w} \\ b_x = \frac{\tilde{b}_x}{b_w} & b_y = \frac{\tilde{b}_y}{b_w} & b_z = \frac{\tilde{b}_z}{b_w} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Полученные результаты матриц преобразования цветовых координат XYZ в RGB для различных цветовых пространств представлены в таблице 1 (Форд и Робертс 1998; Волкер 2004; Гуо и др. 2014; Фэйрчайлд 2013).

2.4. Цветные изображения уходящего излучения Земли в видимом спектре

2.4.1. Упрощенный метод цветопередачи в различных цветовых системах

Для моделирования цветных изображений Земли, наблюдаемых с разных высот, мы использовали результаты расчета уходящего излучения Земли по методике, описанной в работе Хохлова (2001a). Этот метод позволяет определить особенности распределения излучения по диску планеты, включая область терминатора и переход между поверхностью Земли и атмосферой. Поскольку первый шаг предполагает лишь самые общие черты глобального распределения, а не детальное описание его региональной специфики, мы не учитывали неоднородный характер распределения альбедо, чтобы сократить время расчета цветных изображений. Расчеты проводились с использованием равномерного распределения с величиной альбедо 0,3, что соответствует глобальному альбедо Земли. Однако даже при таких условиях расчет цветного изображения Земли размером 60 пикселей (1 пиксель соответствует площади поверхности Земли $\sim 106 \times 106 \text{ км}^2$) на компьютере с тактовой частотой 1 ГГц занял около 12 часов. Результаты визуализации рассчитанных данных для восьми цветовых пространств из таблицы 1 представлены на рисунке 3. Расчеты изображений проводились в одинаковых условиях. Высота наблюдения составляла 376 000 км, направление надира соответствовало точке на поверхности Земли с координатами 45° с.ш. и 30° в.д. Время наблюдения – 21:00 UT, 20 марта 2000 года.

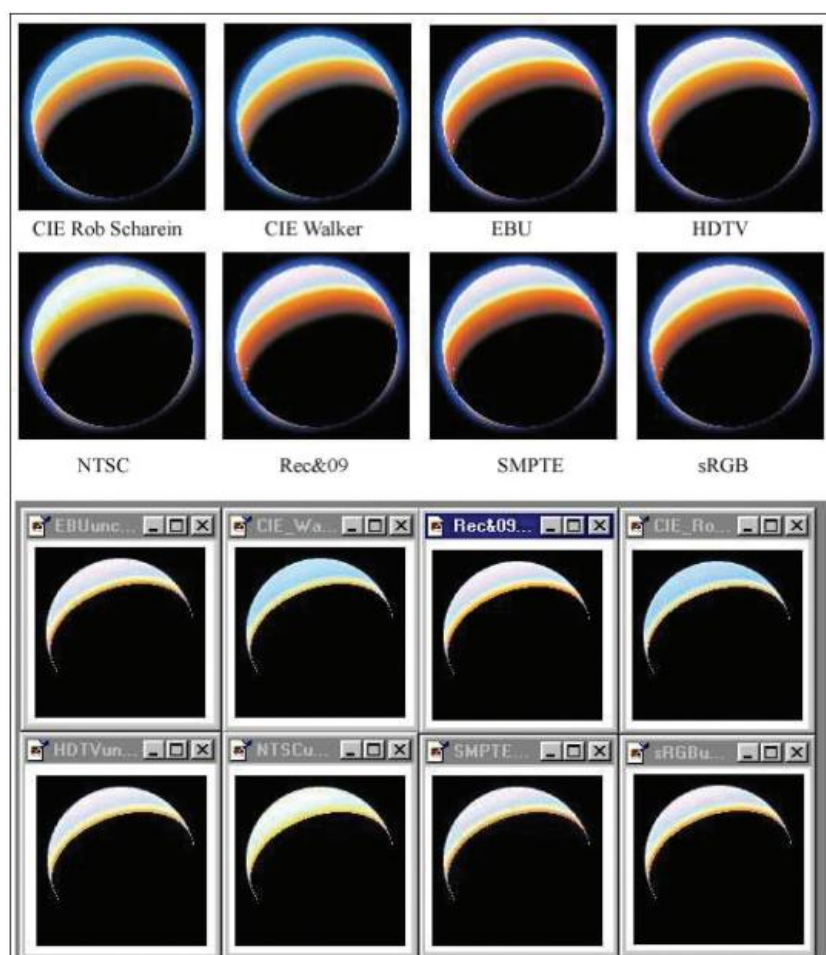


Рис. 3. Цветные изображения Земли в различных цветовых пространствах с учетом и без учета яркости излучения (верхняя и нижняя группы изображений, соответственно)

Хорошо видно, что учет яркости излучения добавляет на изображение менее интенсивно освещенные области, в результате чего оно расширяется по сравнению с изображениями, не учитывающими яркость. Также хорошо видно, как использование различных цветовых пространств влияет на цвет изображений. Наибольшее сходство наблюдается между изображениями в цветовой системе МКО.

Поэтому для расчета изображений Земли была использована цветовая система МКО с более высоким пространственным разрешением 32×32 км и без учета яркости изображения (см. таблицу 1). Результаты представлены на рисунке 4. Изображения представляют собой вид Земли в 21:00 UT; дата и условия наблюдения те же, что и на рисунке 3. Левое изображение демонстрирует визуализацию для длины волны 550 нм по методике из (Хохлов 2001б), среднее – визуализацию излучения Земли в видимом диапазоне (380-780 нм). Изображение слева содержит рассчитанный оптический клин, где левая часть верхней части соответствует минимальной яркости, а правая часть нижней – максимальной яркости. Для сравнения на том же рисунке справа показано изображение Земли из (John 1996). Изображение представляет собой 4° вид Земли с высоты 240 000 км над экватором на 0° долготы, с Солнцем над головой на 23° с.ш. и 110° в.д. Это соответствует позднему вечеру (BST) примерно в середине лета в Северном полушарии. На изображении показан только свет, рассеянный атмосферой. Эффект тени Земли хорошо виден – свет достигает частей атмосферы над поверхностными точками в темноте. К сожалению, набор данных об условиях наблюдения не полный, изображение серое, и полноценное сравнение невозможно.

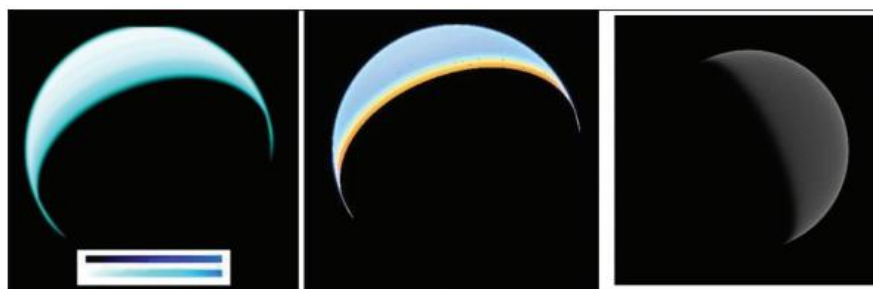


Рис. 4. Рассчитанные цветные изображения Земли (Хохлов 2001б) и изображение из Джон (1996)

Таблица 1

Матрицы преобразования для различных цветовых пространств

Цветовое пространство	Матрица XYZ-на-RGB			Матрица XYZ-на-RGB (обратная)		
SRGB 1.00000	3.2406	-1.5372	-0.4986	0.4124	0.3576	0.1805
	-0.9689	1.8758	0.0415	0.2126	0.7152	0.0722
	0.05557	-0.2040	1.0570	0.0193	0.1192	0.9505
Rec&09 1.00001	3.24300	-1.53834	-0.49834	0.41213	0.35767	0.18036
	-0.9690	1.87549	10.04154	0.21251	0.71535	0.07215
	0.05567	-0.20412	1.057698	0.019319	0.11923	0.94988
МКО* 0.99948	2.28784	-0.83337	-0.45447	0.49785	0.29383	0.19812
	-0.51165	1.42276	0.088893	0.18062	0.80877	0.01009
	0.00572	-0.01591	1.010186	-0.025345	-0.00390	0.97886
МКО* 1.00000	2.3646	-0.89653	0.46807	0.49000	0.31000	0.20000
	-0.51515	1.4264	0.08875	0.17697	0.81240	0.01063
	0.00520	0.01441	1.00921	2.05e-6	0.01000	0.99000
NTSC 1.00001	1.90985	-0.53241	-0.28819	0.60694	0.17351	0.20026
	-0.98462	1.99908	-0.02831	0.29894	0.58663	0.11444
	0.05833	-0.11843	0.89794	0.74870	0.066099	1.1157
SMPTE 1.00000	3.50834	-1.74095	-0.54442	0.39326	0.36536	0.19156
	-1.06874	1.97721	0.03516	0.21223	0.70126	0.08651
	0.05635	-0.19711	1.05057	0.018726	0.11197	0.95782
EBU 1.00000	3.06515	-1.39420	-0.47610	0.43030	0.34164	0.17823
	-0.96900	1.87549	0.041545	0.22188	0.70683	0.07129
	0.06791	-0.22896	1.06984	0.20170	0.12959	0.93866
HDTV 1.00003	2.042235	-0.56522	-0.34486	0.56694	0.19038	0.19291
	-0.89368	1.81445	0.031881	0.27924	0.64363	0.07716
	0.063796	-0.12953	0.98207	1.18e-6	0.072524	1.0159

Упрощенный метод позволяет построить изображения Земли, наблюдаемые с разных высот. На рисунке 5 показаны некоторые из рассчитанных изображений. Размер каждого изображения составляет 101×101 пиксель, а расчет одного занимает около 12-15 минут на среднемощном компьютере. Первая группа (а) содержит изображения Земли на длине волны 500 нм, рассчитанные с разных высот при зенитном угле Солнца 94° . Во второй группе (б) представлены изображения Земли с высоты 36 000 км для длин волн 800 и 2200 нм. На некоторых изображениях видна тонкая полоска темной Земли.

На рисунке 6 представлено изображение Земли с окололунного расстояния размером 201×201 пиксель для широты 40° и местного полуночного времени. Атмосфера хорошо видна, особенно ее «усики» над темной Землей.

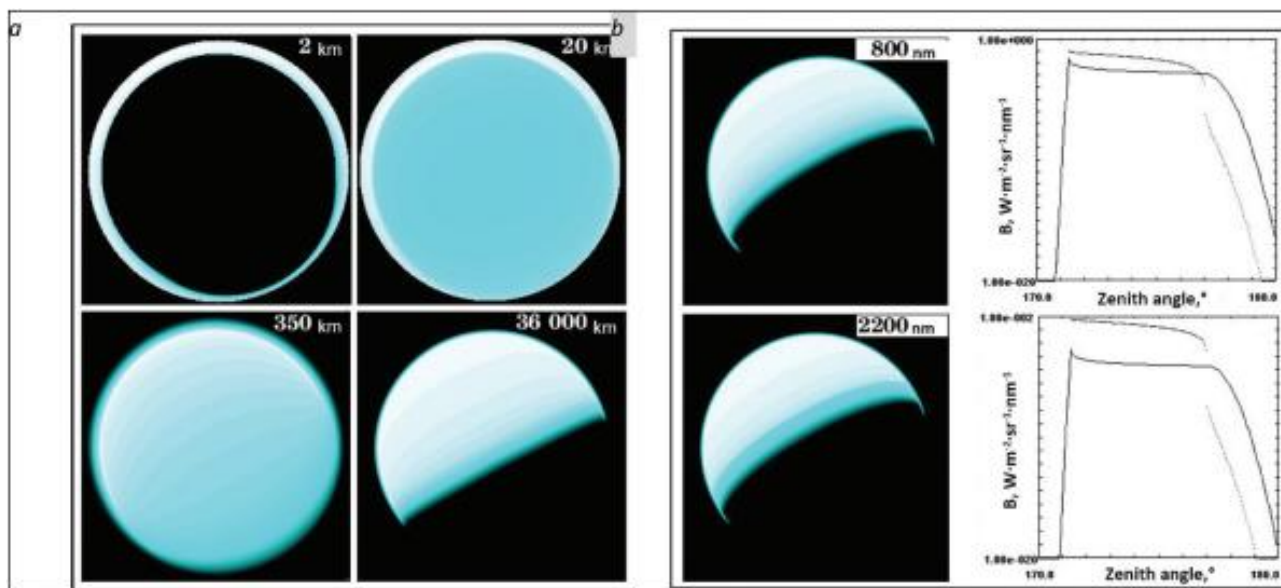


Рис. 5. Рассчитанные изображения Земли на длине волны 500 нм с разных высот (а) и разных длин волн (б)

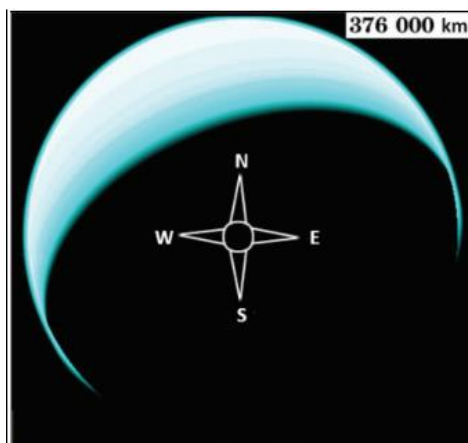


Рис. 6. Изображение Земли с окололунной орбиты

На этом этапе мы использовали цветное представление яркости в логарифмическом отложении для визуализации результатов расчета.

2.4.2. Модель неоднородного распределения альбеда земной поверхности

Для построения цветных изображений Земли, наблюдаемых с геостационарных орбит, мы использовали расчетные значения уходящего излучения Земли по модели, подробно описанной в (Хохлов (2001b)). Мы рассматриваем спектрально индифферентную, диффузно отражающую, но пространственно неоднородную поверхность Земли, которую мы описываем в терминах не спектрального, а интегрального глобального распределения альбеда.

Мы используем эталонную модель интегрального глобального распределения альbedo, представленную на рис. 2 с разрешением $0.4^\circ \times 0.4^\circ$. Эта карта разработана на основе физических карт и данных об интегральном альbedo для различных типов земной поверхности (Тверской, 1962), представленных в табл. 2. Для размещения по поверхности значений альbedo, указанных в табл. 1, мы используем физическую карту Земли. Таким образом, для каждой точки глобальной поверхности, заданной географическими координатами, мы имеем соответствующее значение альbedo. Для наглядности результата мы представляем изображение карты (рис. 2), но не черно-белое (256 градаций), а псевдоцветное (768 градаций). Эта карта не содержит никакой информации о цветах поверхности Земли. Для преобразования значений альbedo A в цвета RGB использовался параметр 0,3, который соответствует значению альbedo как

$$\Sigma = 73.93 + 693.79 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot A\right) \quad (13)$$

Значение параметра Σ преобразовывалось в RGB-цвета по следующему правилу:

$$\begin{array}{ll} (0,0,\Sigma) & 0 \leq \Sigma \leq 255 \\ (0,\Sigma,255) & 255 < \Sigma \leq 511 \\ (\Sigma,255,255) & 511 < \Sigma \leq 767 \end{array} \quad (14)$$

Карта глобального распределения альbedo, представленная на рисунке 2, была преобразована в двоичный файл, который в дальнейшем использовался для автоматического расчета значения альbedo по географическим координатам.

3. Результаты и обсуждение

(1) Цветопередача изображений Земли на основе модели радиационной яркости сферической атмосферы Земли с учетом неоднородности температуры и характеристик поверхности характеристик

Модель является буквальная и включает в себя трехмерно неоднородное распределение плотности атмосферы в сферической атмосфере и не только прямую солнечную радиацию, но и отраженную от поверхности. Примечательно, что модель позволяет рассчитывать яркость атмосферы без ограничений по направлениям, высотам и времени наблюдения. В качестве входных параметров используются только данные о спектральной области, место, направление и юлианская дата (совмещение календарной даты и времени) наблюдения. Эта модель молекулярного рассеяния в совокупности с экспериментальными данными, предполагаемым обоснованием, областями применения и ограничениями обсуждается в работах Хохлова (2001а, 2001б). Описанная модель позволяет выявить особенности трансформации распределения излучения по планетарной молекулярной атмосфере, включая область терминатора и перенос «Земля – атмосфера». Типичный пример расчета изображения Земли с неоднородным распределением температуры и альbedo поверхности показан на рисунке 7 в реальных цветах, как это воспринимается человеческим глазом.

На рисунке 8 для сравнения приведены экспериментальные изображения. Рассчитанные изображения в реальных цветах (верхний ряд) показаны вместе с черно-белыми изображениями с геостационарных спутников METEOSAT, GMS, GOES- W и GOES-E (группа Услуги по предоставлению спутниковых данных (SDS) 2020) (нижний ряд).

Расчетные изображения создавались для тех же условий, что и экспериментальные. При этом учитывались только место и время наблюдения. Высота наблюдения составляет 36 000 км, направление надира соответствует экваториальным точкам земной поверхности с долготами, указанными в таблице 3 для каждого спутника. Дата пролета спутника – 06.03.2006. Время наблюдения также указано в табл. 3.

Расчеты цветовых теоретических изображений проводились с учетом инструментальных спектральных характеристик всех спутников. На рис. 9 приведены спектральные характеристики геостационарных спутников поколения начала XX века. Эти характеристики, охватывающие видимый диапазон, позволяют преобразовывать черно-белые изображения в цветные, однако они

либо не содержат набора исходных данных, необходимых для расчетов (Дэвид Вудс и О'Брайен 1968), включая геостационарность орбиты, либо публикуются в черно-белом варианте, жертвуя цветностью ради увеличения разрешения изображения в видимом диапазоне. При изучении природных явлений псевдоцветные изображения обычно используются в ультрафиолетовом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах, а также в тепловом диапазоне. Многочисленные визуальные цветные изображения с низколетящих спутников или спутников на полярных орбитах, таких как Landsat, NOAA, Spot, Terra и других систем регионального отложения, доступны, но не рассматриваются в данной статье.

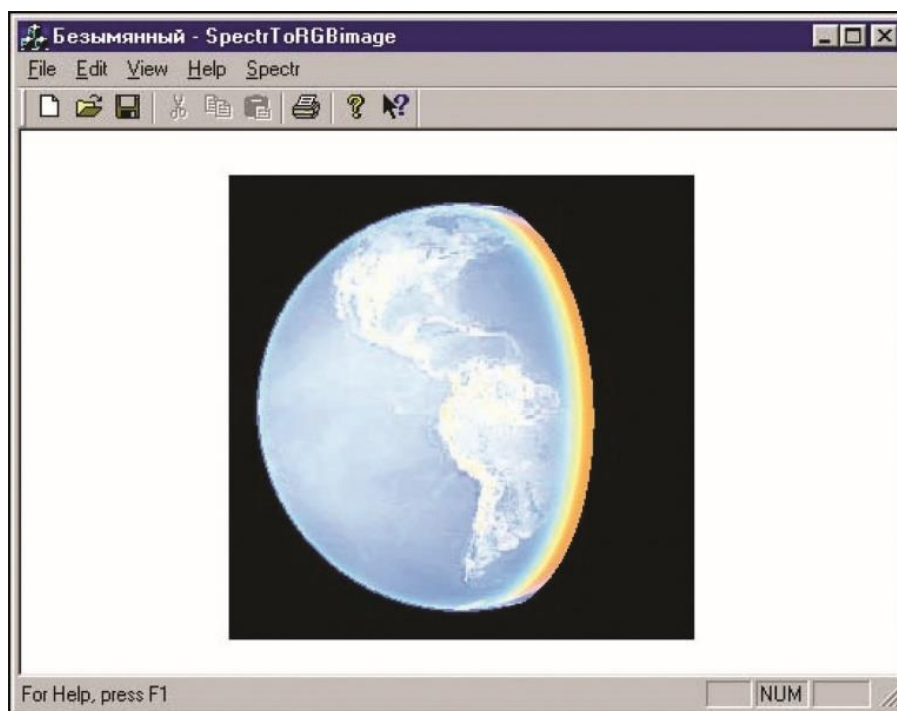


Рис. 7. Расчетное изображение Земли, с высоты 36 000 км над экватором, 75° западной долготы.
Дата: 27.09.2000 Время: 21 UT

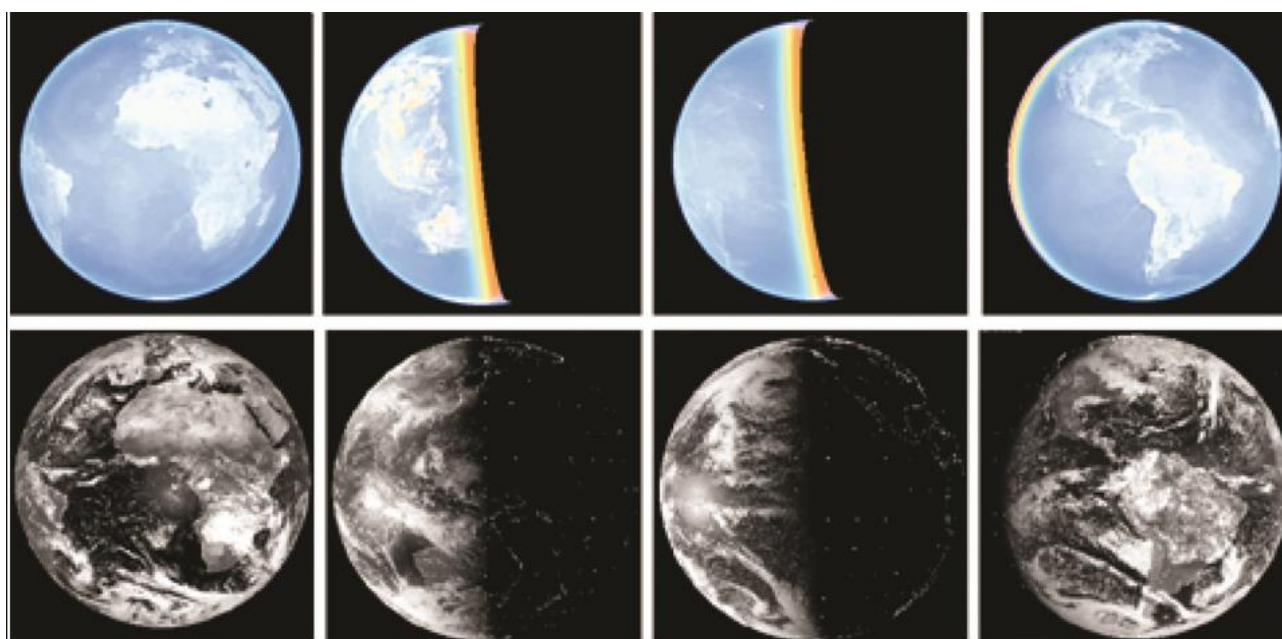


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные изображения Земли, полученные с геостационарных орбит

Сравнение изображений возможно только с черно-белыми, так как большинство доступных цветных изображений являются художественными и псевдоцветными или не содержат полной информации о календарной дате, времени, месте и ориентации направления наблюдения.

Сравнение расчетных и экспериментальных изображений показывает близкое совпадение общего распределения яркости Земли, очертаний континентов и случайного распределения яркости по поверхности. Поскольку облачность в расчетах не учитывается, она пропущена. На расчетных изображениях отчетливо видны оранжево-красные цвета в области терминатора, связанные с явлениями свечения. Синий цвет расчетных изображений связан с солнечным излучением, рассеянным молекулярными составляющими атмосферы. Наиболее интенсивные цвета наблюдаются над океанами, где вклад поверхностного излучения Земли меньше из-за малого альбедо океанских вод.

Таблица 3

Условия наблюдений для геостационарных спутников

Спутник	Долгота, град.	Время, UT
<i>METEOSAT</i>	0	12:00
<i>GMS</i>	140 E	09:00
<i>GOES-W</i>	135 W	03:30
<i>GOES-E</i>	75 W	15:00

Сравнение цветных и черно-белых снимков может быть проведено только по расположению диска Земли, фазе и региональному ландшафту ее поверхности. Эти характеристики визуально схожи для всех четырех спутников.

3.2. Сравнение теоретических и спутниковых цветных изображений в видимом спектре

Для того чтобы начать обсуждение возможности сравнения реалистичной цветопередачи теоретических моделей глобального состояния атмосферы Земли со спутниковыми изображениями Земли с геостационарных высот, рассмотрим изображения на рисунке 10.

Интересно сравнить теоретическое изображение со спутника *GMS* (*Himawari-5*) от 2006/03/06 и изображение с современного спутника *Himawari 8* (Сеть реального времени *Himawari-8* 2021) от 2020/11/26. На рис. 10 хорошо видны геометрические и сезонные различия, объясняемые более чем 14-летним интервалом между снимками.

В настоящее время несколько спутников регулярно фотографируют полный диск Земли. Особое внимание привлекают три спутника, цветные изображения которых заимствованы из Уэст (2017) и представлены на рис. 11. Первые два спутника (*Himawari-8* и *GOES-16*) – это геостационарные спутники, которые ведут съемку с высоты 35 785 км над экватором Земли. Третий, *DSCOVR* (Климатическая обсерватория глубокого космоса), находится на орбите между Землей и Солнцем, на расстоянии около 1 500 000 км от Земли в точке Лагранжа L1.

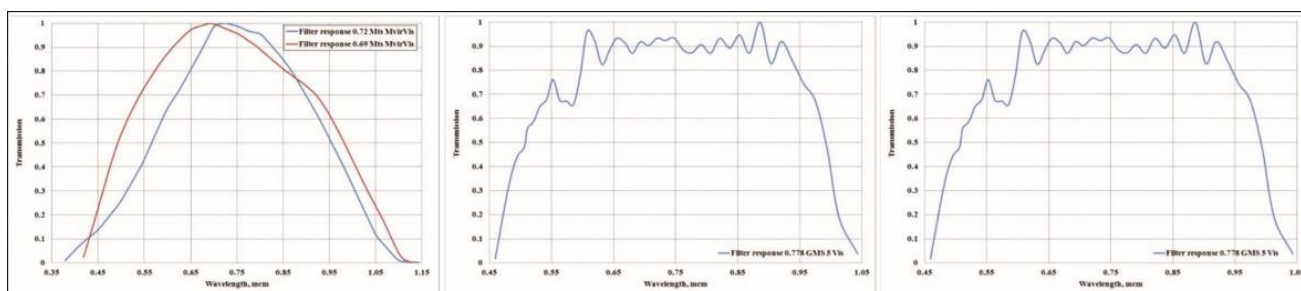


Рис. 9. Спектральные характеристики цветных фильтров геостационарных спутников *Meteosat* (Служба профилей фильтров и др. 2012), *GMS* (Служба профилей фильтров и др.2012a) и *GEOS* (Служба профилей фильтров и др. 2012b) поколения начала XX века

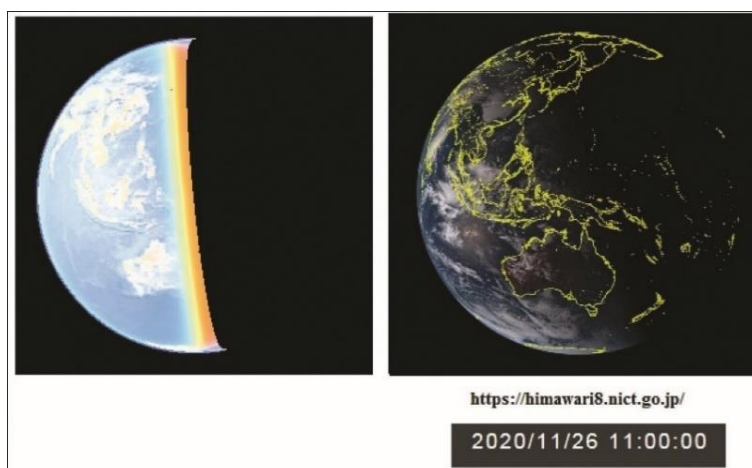


Рис. 10. Сравнение расчетного изображения для спутника GMS (Himawari-5) и изображения со спутника Himawari 8

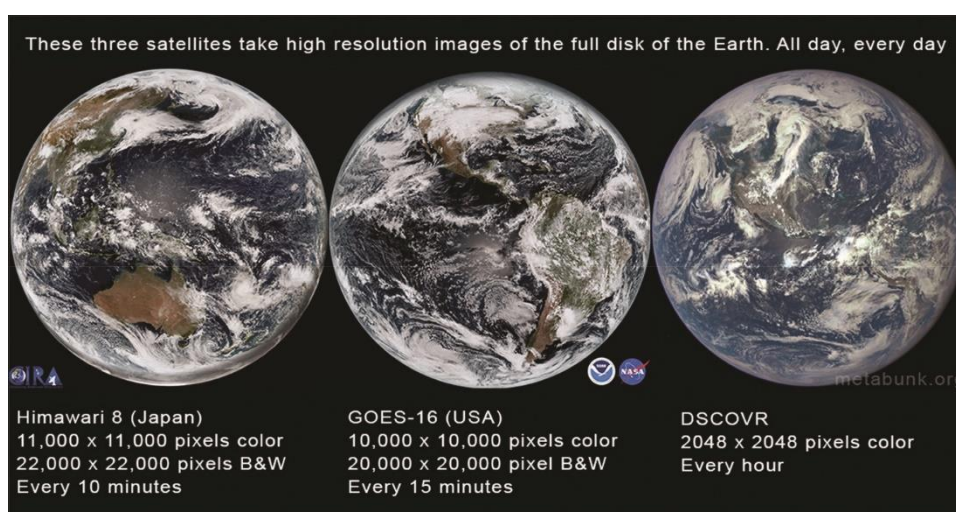


Рис. 11. Цветные изображения диска Земли, полностью освещенного Солнцем (Служба профилей фильтров SVO 2020)

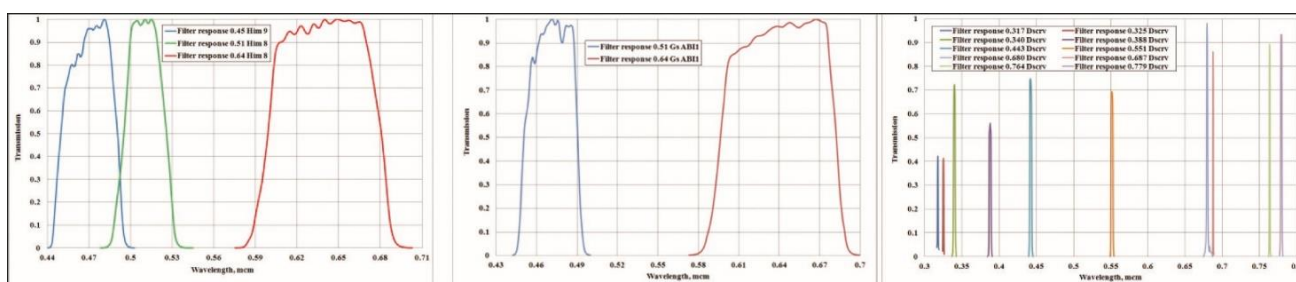


Рис. 12. Спектральные характеристики цветных фильтров для геостационарных спутников Himawari (Служба профилей фильтров SVO 2020), Himawari-9 2018), GOES (Усовершенствованное устройство формирования базовых изображений (ABI) 2017) и DSCOVR EPIC (EPIC (Полихроматическая камера формирования изображения Земли) 2018)

Изображения геостационарных спутников на рис. 11 имеют высокое разрешение в цвете и еще большее разрешение в черно-белом варианте. Камера полихроматического изображения Земли (EPIC) DSCOVR работает в цвете с низким разрешением (EPIC – это 10-канальный спектрорадиометр (317-780 нм) на борту космического аппарата NOAA DSCOVR).

Спектральные характеристики или квантовая эффективность матриц для всех трех спутников представлены на рис. 12.

Изображения в натуральных цветах (2016) были созданы с использованием 10 узких спектральных полос EPIC, которые находятся в пределах видимого диапазона. Их цвет и яркость скорректированы таким образом, чтобы соответствовать тому, что получилось бы при съемке обычной камерой.

К сожалению, из-за удаленности Земли и неполной информации о параметрах обязательного набора исходных данных расчет по модели исходящего земного излучения для спутника DSCOVR в настоящее время невозможен. По этой же причине не сформирован набор исходных данных для расчета изображений геостационарных спутников.

4. Выводы

В данной статье рассматривается возможность цветопередачи для изображений светящихся планетарных объектов с газовой и пылевой оболочками. Представленные результаты проведенных расчетов показывают, что существует значительная зависимость между цветовой палитрой изображения и цветовой системой, используемой для преобразования расчетных данных в изображение. Тем не менее, практически все цветовые системы могут реалистично отображать распределение цвета в зависимости от освещенности Земли Солнцем.

Особенностью предлагаемого метода расчета цветных изображений Земли является использование сферической модели, основанной на физических принципах. Модель ограничена выбором процессов рэлеевского рассеяния солнечного излучения, поступающего из атмосферы Земли. Модель учитывает следующие процессы:

- Однократное рассеяние прямого солнечного излучения в атмосфере;
- отражение солнечного излучения от неоднородной поверхности Земли, пропускание и рассеяние в пространстве атмосферой.

Характерной особенностью модели является представление неоднородного распределения альбедо земной поверхности, приземной температуры и высотного профиля плотности основных газовых компонент.

Расчетные значения, представленные в данной статье с учетом инструментальных спектральных распределений, демонстрируют реалистичную картину распределения цветовой яркости изображения Земли в зависимости от ее освещенности Солнцем. Планета выглядит светло-голубой в ярко освещенной части диска Земли и оранжево-красной в светлом сегменте терминатора.

Авторы указывают на трудности, связанные с сопоставлением теоретических и экспериментальных изображений полного диска Земли в видимом диапазоне в естественных цветах. Причиной этого являются неполнота информации об условиях наблюдения цветных спутниковых снимков и предпочтение получения результатов в черно-белом варианте из-за четырехкратного увеличения разрешения снимков Земли. Это особенно актуально для высотных спутников и космических аппаратов.

Одним из применений материала данной статьи является использование светового излучения пепла Луны в качестве инструмента для изучения глобального альбедо Земли. Измерения пепельного света Луны – сложная задача, которую в настоящее время решают астрономы США (Солнечная обсерватория Биг-Бир-Лейк в Калифорнии), России (Новолазаревская станция в Антарктиде) и ряда других стран, находящихся в стадии развертывания.

Для контроля экспериментальных данных в наших исследованиях по этой теме мы используем результаты теоретических расчетов изображений Земли, как она видна с Луны и с высоты 36 000 км над станцией Новолазаревская. С этой же целью сравниваются экспериментальные и теоретические изображения Луны на момент проведения эксперимента.

Благодарности

В данном исследовании использовался сервис SVO Filter Profile Service (<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>), поддерживаемый испанской организацией MINECO в рамках гранта AYA2017-84089.

Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год #FSRWW-2020-0014.

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за конструктивные замечания по ранней версии данной работы.

Заявление о раскрытии информации

Автор(ы) не сообщили о потенциальном конфликте интересов.

Приложение А

Краткая история

А1. История компьютерной графики

- *Промышленное и военное производство.* Началу космической эры предшествовали успешные разработки Джона Т. Парсонса (Parsons 1958) в области станков с компьютерным управлением для промышленного и военного производства, начатые в 1950-х годах. Новая технология получила название компьютерного числового управления (ЧПУ). Трудоемкий процесс разработки и отладки программ для перфолент с ЧПУ вскоре был полностью автоматизирован с помощью компьютеров Whirlwind и TX-0. Эта технология автоматизации получила название АРТ (Автоматически программируемый инструмент) и фактически стала предшественницей современного программного обеспечения САД (Компьютерное проектирование) (Дуглас 1959).

Парсонс занимался проектированием и разработкой уникальных производственных процессов и оборудования для ВВС США (вертолет R-5 Sikorsky и самолет Ercoupe), установкой оборудования для производства ракеты Minuteman и ракеты-носителя Saturn. В 1963 году был спроектирован комплекс для производства моноблочных корабельных гребных винтов для ВМС США, в 1971 году – система N/C для автоматической проверки лопаток турбин. С 1973 года Джон Т. Парсонс начал проектные исследования лопастей ротора для крупных ветроэнергетических систем.

- *Компьютеризация технологий.* В середине XX века развитие коммуникационных технологий способствовало быстрому переходу от механических калькуляторов, первый прототип которых был описан Леонардо да Винчи в 1492 году (Рафаэль 2013), к электронно-вычислительным машинам. Майкл Нолл (Майкл Нолл 1967), пионер в области создания компьютерных 3D-фильмов в Телефонные лаборатории Белла в 1960-х годах, объяснял роль компьютера как мощного инструмента, способного выполнять быстрые вычисления и манипуляции с большими массивами чисел, но не способного к настоящему творчеству.

Можно считать, что эра компьютерной графики началась в декабре 1951 года, когда исследователи Массачусетского технологического института (MIT) разработали первый дисплей для компьютера «Whirlwind» по заказу системы противовоздушной обороны ВМС США. Изобретателем этого дисплея стал инженер Массачусетского технологического института Джей Форрестер.

Первой официально признанной попыткой использовать дисплей для получения изображения на выходе из компьютера стало изобретение в 1950 году в Массачусетском технологическом институте машины Whirlwind-I. Впоследствии Whirlwind стал прототипом для целого ряда компьютеров, что позволило создать обширную систему противовоздушной обороны США – SAGE (Полуавтоматическая наземная среда) (WHIRLWIND 1953). С 1952 года и до развертывания системы SAGE ее разработкой руководил Джей Форрестер.

В рамках программы SAGE была создана уникальная основа для дальнейшего развития компьютерной графики с развитием компьютерных сетей и их длительным сосуществованием с ЧПУ и САПР. Однако почти все компании по-прежнему использовали классические бумажные носители (ленты и перфоленты) для передачи данных на станки. Ситуация кардинально изменилась после 1963 года, когда Иван Сазерленд (один из основоположников компьютерной графики) в рамках своей докторской диссертации разработал программно-аппаратный комплекс Sketchpad (Сазерленд 2003).

Уникальность Sketchpad заключается в том, что он дал определение графическому пользовательскому интерфейсу более чем за 20 лет до того, как этот термин был впервые использован. Система Sketchpad использовала эскизы в качестве нового средства коммуникации между пользователем и компьютером. Система Sketchpad содержала программы ввода, вывода и вычислений, что позволяло ей интерпретировать информацию непосредственно с дисплея компьютера. Однако даже современные мультимедийные научные компьютерные графики (КГ) не позволяют проводить вычислительные эксперименты с визуализацией результатов в высоком разрешении.

Она стала системой общего назначения для компьютера TX-2 (позволяла делать эскизы электрических, механических, научных, математических изображений и анимированные рисунки), программное обеспечение которой было написано на языке «макроассемблер».

Технология искусства и расцвет компьютерной графики. После успеха первых экспериментов в промышленной, военной и компьютерной областях в ноябре 1960 года стартовала исследовательская программа компании Boeing, руководителем которой стал Уильям А. Феттер. Результат исследований был зарегистрирован в виде патента США «Метод и устройство планарной иллюстрации» (Уолтер 1969, Барнет 1965). В статье (Барнет 1965) рассматривается роль искусства и технологии в развитии компьютерной графики. Будучи художником, Феттер описал процесс перспективного рисования на меловой доске, а затем позволил другим разработать программу с математически эквивалентными операциями. На своих лекциях Феттер демонстрировал фильм ‘SST ‘Симуляция видимости кабины пилота SST’ i’ в 1966 году. Однако первой человеческой фигурой, которую он создал с помощью компьютера для фильма, стал офицер посадочной связи на авианосце CV-A 59. Эта фигура была показана в короткометражном фильме CV A-59, но только как силуэт, а не как детальная проработка, как это было с Первым человеком. Феттер опубликовал это в ноябре 1964 года в своей книге «Компьютерная графика в коммуникации» в разделе «Изображение посадки на авианосец с помощью изображений» (Уильям 1965).

Термин «компьютерная графика» впервые был использован в 1960 году в филиале подразделения военных авиационных систем компании Boeing в Уичито. Его придумали Уильям Феттер и его начальник Верн Хадсон (Оппенгеймер 2005, Джамп 1966). Первое реальное применение компьютерной графики связано с именем Джона Уитни, кинорежиссера 1950-60-х годов, который первым использовал компьютер собственного изобретения для создания анимированных титров. Демонстрационный ролик Дж. Уитни, созданный с помощью аналогового компьютера/магической кинокамеры, которую он соорудил из прицела зенитного орудия времен Второй мировой войны (Уитни 1961), а также трехмерные компьютерные изображения В. Феттера были представлены на выставке «Кибернетическая случайность: Компьютер и искусство» в Лондонском институте современного искусства, которую в 1968 году курировал Дж. Рейхардт. Это была одна из центральных выставок компьютерного искусства и цифровых инсталляций конца 1960-х – начала 1970-х годов, в которой приняли участие такие значимые фигуры в мире технологического искусства того времени, как Чарльз Ксури, Майкл Нолл, Нам Джун Пайк, Фридер Наке, Джон Уитни, Джон Кейдж и др.

A2 Компьютерная графика и ее приложения

Развитие компьютерной графики (КГ) следовало за эволюцией компьютеров и программного обеспечения. Технологии CNC и APT, опробованные по военным контрактам (предшественники современных САД-технологий), комплекс Sketchpad, компьютер Whirlwind, проекты искусства и цифровые инсталляции, разработанные многолетними усилиями исследователей, дизайнеров, инженеров, а также художников, изобретателей, программистов и IT-специалистов, стали неотъемлемой необходимостью в жизни мирового сообщества.

Самые первые приложения КГ появились в области научных исследований, компьютерных видеоигр и видеофильмов (Уильям 1965). Первые громоздкие прототипы компьютеров использовались только для решения научных и промышленных задач. Современный многопрофильный научный КГ позволяет проводить вычислительные эксперименты и обеспечивать визуальное представление их результатов.

В настоящее время наиболее продуктивные и известные приложения КГ связаны с кинематографом и индустрией развлечений, где синтез изображений используется для создания визуально привлекательных спецэффектов для фильмов и видеоигр. КГ преобразует результаты решения задач в визуальные представления различной информации и широко используется во всех отраслях науки, техники, медицины, коммерческой и управленческой деятельности. Являясь незаменимым элементом программного обеспечения САПР, КГ преобладает в работе инженеров-конструкторов, архитекторов и изобретателей новой техники. Проектирование, конструирование и детальная проработка деталей осуществляются с помощью инструментов КГ, которые позволяют получать как плоские, так и трехмерные изображения. Благодаря телевидению и Интернету КГ нашла свое применение и в таких сферах, как искусство, иллюстрация, анимация и реклама.

ЛІТЕРАТУРА

1. Advanced Baseline Imager (ABI). 2017. "PFM, on Board GOES-16." <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=GOES&asttype=earth>
2. Barnett, J. 1965. "Will the Computer Change the Practice of Architecture?" In *Architectural Record* 1, Vol. 137 (Detroit: BNP Media). January. 149.
3. Berk, A., L. Bernstein, and D. C. Robertson MODTRAN. "A Moderate Resolution Model for LOWTRAN." 1987, https://www.researchgate.net/publication/235184147_MODTRAN_A_moderate_resolution_model_for_LOWTRAN
4. Berk, A., P. Conforti, R. Kennett, T. Perkins, F. Hawes, and J. Bosch. 13 June 2014. "MODTRAN6: A Major Upgrade of the MODTRAN Radiative Transfer code, Proc." *Spie* 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H & 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H DOI: 10.1117/12.2050433.
5. Chepyzhova, A. V., E. A. Pravdina, and O. Y. Lepikhina. "Comparative Evaluation of the Effectiveness of the Laser Scanning and Aerial Photography Systems Using Unmanned Aerial Vehicles." *Journal of Physics: Conference Series* Novosibirsk, Russia 2019, 1333. doi:10.1088/1742-6596/1333/3/032064. (3).
6. CIE Proceedings. 1964. *Vienna Session*. 1963 Vols. B, P. 209–220. Committee Report E-1.4.1 Paris: Bureau Central de la CIE.
7. David Woods, W., and F. O'Brien. 1968. "Apollo 8 Day 1: The Green Team and Separation." https://history.nasa.gov/afj/ap08fj/03day1_green_sep.html
8. Douglas, R. T. 1959. Servomechanisms Laboratory Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology, 86. United States: Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. http://www.bitsavers.org/pdf/mit/whirlwind/apt/APT_System_Volume_1_General_Description_of_the_APT_System_1959.pdf
9. EPIC (Earth Polychromatic Imaging Camera). 2018. "Is a 10-channel Spectroradiometer (317 – 780 Nm) Onboard NOAA's DSCOVR (Deep Space Climate Observatory) Spacecraft." <http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=DSCOVR&asttype>
10. Fairchild, M. D. 2013. "Color Appearance Models." In *Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology*, 3, P. 472. Hoboken: John Wiley & Sons. 9781. 9781119967033119967033
11. Filter Profile Service, T. S. V. O., C. Rodrigo, E. Solano, and A. Bayo, 2012 <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=Meteosat&asttype=earth>
12. Filter Profile Service, T. S. V. O., C. Rodrigo, E. Solano, and A. Bayo, 2012a <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=Himawari&gname2=GMS5&asttype=earth>
13. Filter Profile Service, T. S. V. O., C. Rodrigo, E. Solano, and A. Bayo, 2012b <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=GOES&gname2=Imager11&asttype=earth>
14. Ford, A., and A. Roberts. "Colour Space Conversions." 11 August 1998 <https://studylib.net/doc/18082326/colour-spaceconversions>
15. Guild, J. 1931. "The Colorimetric Properties of the Spectrum." *Philosophical Transactions of the Royal Society* 230: 149–187. doi:10.1098/RSPB.1931.0091.
16. Guo, H., J. Cao, H. Wang, J. Zhang, and H. Yang. 2014. "Color Management of sRGB Color Space for HDR Digital Camera." *Hongwai Yu Jiguang Gongcheng/Infrared and Laser Engineering* 43: 238–242.
17. The Himawari-8 Real-time Web 2021 <https://himawari8.nict.go.jp/>
18. Himawari-9. 2018. "Advanced Himawari Imager (AHI-9) Instrument." <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?id=Himawari/AHI9.Band01&&mode=browse&asttype=earth&gname=Himawari&gname2=AHI9#filter>
19. HosseiniHaghighi, S., F. Izadi, R. Padsala, and U. Eicker. 2020. "Using Climate-Sensitive 3D City Modeling to Analyze Outdoor Thermal Comfort in Urban Areas." *International Journal of Geo-Information* 9 688.
20. Ignatiev, S. A., and D. S. Kessel. 2016. "Effect of Surface Geometry and Insolation on Temperature Profile of Green Roof in Saint-Petersburg Environment." *Journal of Mining Institute* 220: 622–626.
21. John, I. 1996. *Full-Spectral Rendering of the Earth's Atmosphere Using a Physical Model of Rayleigh Scattering (March, 1996) Computer Graphics Unit*. Manchester: Manchester Computing, University of Manchester. M13 9PL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=55743436B4E3634187CBBF8FA52B903C?doi=10.1.1.49.7170&rep=rep1&type=pdf>
22. Jump up to: a b William Fetter: Computer Graphics at Boeing. "Print Magazine." XX:VI, November 1966, S. 32
23. Kaneda, K., T. Okamoto, E. Nakamae, and T. Nishita. 1991. "Photorealistic Image Synthesis for Outdoor Scenery under Various Atmospheric conditions." *The Visual Computer* 7 (5–6): 247–258. doi:10.1007/BF01905690.
24. Kazantsev, A., A. Boikov, and V. Valkov. "Monitoring the Deformation of the Earth's Surface in the Zone of Influence Construction." (2020) E3S Web of Conferences October 24–26, 2019 Khabarovsk, Russia, 157, DOI: 10.1051/e3sconf/202015702013.
25. Khokhlov, V. N. 2001a. "Rayleigh Scattering in the Atmospheres of the Planets, Taking into Account the Inhomogeneous Temperature Distribution and Albedo of Their Surfaces." *Journal of Optical Technology* 68 (2): 23–32.
26. Khokhlov, V. N. 2001b. "Results of Modeling Rayleigh Scattering in the Earth's Atmosphere with an Inhomogeneous Albedo and Temperature Distribution on Its Surface." *Journal of Optical Technology* 68 (2): 105–109. doi:10.1364/JOT.68.000105.
27. Khokhlov, V. N., L. A. Mirzoeva, N. N. Naumova, and O. O. Obvintzeva. "Comparison of Remote Sensing Technologies of Global the Earth's Climate Changes." Conference Proceedings: The 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (IRSE - 2005) St. Petersburg, Russia, IRSE, 2005. 4
28. Klassen, R. 1987. "Modeling the Effect of the Atmosphere on light. ACM Trans." *Graph* 6: 215–237. doi:10.1145/35068.35071.
29. Kneizys, F. X., L. W. A. Eric Shettle, and J. H. Chetwynd. "User Guide to LOWTRAN 7." August 1988, https://www.researchgate.net/publication/235203858_User_guide_to_LOWTRAN_7
30. Kneizys, F. X., E. Shettle, W. Gallery, and L. W. A. Chetwynd J. H Jr. 1983. *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6*. Atmospheric_TransmittanceRadiance_Computer_Code_LO.pdf. August, Supplement: Program Listings.

31. Kopylova, N. S., and I. P. Starikov. "Fresh Approaches to Earth Surface Modeling." (2018) *Journal of Physics: Conference Series*, 1015 (3), DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032062.
32. Koteleva, N., and I. Frenkel. 2021. "Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts." *Applied Sciences* 11 (1): 383. doi:10.3390/app11010383.
33. Kovyazin, V. F., P. M. Demidova, D. T. Lan Anh, D. V. Hung, and N. Van Quyet. 2020a. "Monitoring of Forest Land Cover Change in Binh Chau - Phuoc Buu Nature Reserve in Vietnam Using Remote Sensing Methods and GIS Techniques." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 507 (1). doi:10.1088/1755-1315/507/1/012014.
34. Kovyazin, V. F., A. Y. Romanchikov, D. T. Lan Anh, D. V. Hung, D. T. Lan Anh, and D. V. Hung. 2020b. "Monitoring of Forest Land Use/Cover Change in Cat Tien National Park, Dong Nai Province, Vietnam Using Remote Sensing and GIS Techniques." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 817 (1): 012018. doi:10.1088/1757-899X/817/1/012018.
35. Kozhaev, Z. T., M. A. Mukhamedgalieva, M. G. Mustafin, and B. B. Imansakipova. 2017. "Geoinformation System for Geomechanical Monitoring of Ore Deposits Using Spaceborn Radar Interferometry Methods." *Gornyi Zhurnal* 2: 39–44. doi:10.17580/gzh.2017.02.07.
36. Littlefair. 1994. "Paul A Comparison of Sky Luminance Models with Measured Data from Garston." *United Kingdom. Solar Energy* 53 (4): 315–322. doi:10.1016/0038-092X(94)90034-5.
37. Longtin, D. R., N. L. DePiero, F. M. Pagliughi, and J. Hummel. "SENTRAN7: The Sensitivity Package for LOWTRAN7 and MODTRAN." Volume 2 November 1991, https://www.researchgate.net/publication/235168108_SENTRAN7_The_Sensitivity_Package_for_LOWTRAN7_and_MODTRAN_Volume_2
38. Longtin, D. R., and J. Hummel. "Users Guide for SENTRAN7, Version 2.0." August 1993, https://www.researchgate.net/publication/235082841_Users_Guide_for_SENTRAN7_Version_2
39. Makhov, V. E., and I. I. Sytko. 2018. "Shape and Relief Evaluation Using the Light Field Camera." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194 (2). doi:10.1088/1755-1315/194/2/022020.
40. Michael Noll, A. 1967. "The Digital Computer as a Creative Medium." *IEEE Spectrum* 4 (10, October): 89–95. doi:10.1109/MSPEC.1967.5217127.
41. Musta, L. G., G. N. Zhurov, and V. V. Belyaev. "Modeling of a Solar Radiation Flow on an Inclined Arbitrarily Oriented Surface." (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1333 (3), DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032054.
42. Natural Color Imagery 2016 <https://epic.gsfc.nasa.gov/about>
43. Nishita, T., and Y. Dobashi. "Modeling and Rendering of Various Natural Phenomena Consisting of Particles." *Proceedings. Computer Graphics International 2001, Hong Kong, China, 2001*; pp. 149–156, DOI: 10.1109/CGI.2001.934669.
44. Nishita, T., Y. Dobashi, K. Kaneda, and H. Yamashita. 1996. "Display Method of the Sky Color Taking into Account Multiple Scattering." In *Pacific Graphics* Vol. 96, P. 117–132. Taiwan: Department of Computer Science, National Tsing Hua University.
45. Oppenheimer, R., and E. A. T. William Fetter, and 1960s. "Computer Graphics Collaborations in Seattle." www.academia.edu, <https://www.historylink.org/File/20542>
46. Parsons, J.T. and F.L. Stulen. Patented 14 January 1958. "Motor controlled apparatus for positioning machine tool." <https://patentimages.storage.googleapis.com/11/89/bc/16daaf50a6a9e0/US2820187.pdf>
47. Preetham, A. J., P. Shirley, and B. E. Smits. "A Practical Analytical Model for Daylight." *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques Los Angeles, CA, United States (NY, United States: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.) 1999*, P. 91–100, DOI: 10.1145/311535.311545.
48. Project WHIRLWIND summery report №. 35 third quarter. 1953. "Digital Computer Laboratory Massachusetts Institute of Technology." http://www.bitsavers.org/pdf/mit/whirlwind/Project_Whirlwind_Summary_Report_No_35_Third_Quarter_1953.pdf
49. Rafael, Fraguas. 2013. "El Pais. Madrid" edited by Codigo Da Vinci a la castellana.
50. Rodionov, V. A., S. A. Tursenev, I. L. Skripnik, and Y. G. Ksenofontov. 2020. "Results of the Study of Kinetic Parameters of Spontaneous Combustion of Coal Dust." *Journal of Mining Institute* 246: 617–622. doi:10.31897/PMI.2020.6.3.
51. Rothman, L. S., I. E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, M. Birk, et al. 2013. "The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 130 (November): 4–50.
52. The Satellite Data Services (SDS) group. "University of Wisconsin-Madison." 2020, <https://inventory.ssec.wisc.edu/inventory/>
53. Selby, J. E. A., and R. A. McClatchey. 1975. Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 μm : *Computer Code LOWTRAN 3*, 109. United States: Optical Physics Laboratory, Air Force Cambridge Research Laboratories.
54. Shutterstock. Available online: <https://www.shutterstock.com> (accessed on 26 November 2020)
55. Smith, T., and J. Guild. 1931–32. "The C.I.E. Colorimetric Standards and Their Use." *Transactions of the Optical Society* 33 (3): 73–134. doi:10.1088/1475-4878/33/3/301.
56. Speranskaya, N. I. 1959. "Determination of Spectrum Color Coordinates for Twenty-seven Normal Observers." *Optics and Spectroscopy* 7: 424–428.
57. Stiles, W. S., and J. M. Burch. 1959. "NPL Colour-matching Investigation: Final Report." *Optica Acta: International Journal of Optics* 6 (1): 1–26. doi:10.1080/713826267.
58. Strizhenok, A. V., A. V. Ivanov, and I. K. Suprun. "Methods of Decoding of the Geocological Conditions of natural-Anthropogenic Complexes Based on the Data of Earth Remote Sensing." (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1399 (4), DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044077.
59. Sutherland, I.E. . 2003. *Sketchpad: A Man-machine Graphical Communication System*, 149. United Kingdom: University of Cambridge. <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAMCL-TR-574.pdf>. doi: 10.48456/tr-574.
60. The SVO Filter Profile Service. "Rodrigo C. Solano E." 2020; <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020sea.confE.182R/abstract>
61. Tomoyuki, N., S. Takao, T. Katsumi, and N. Eihachiro. "Display of the Earth Taking into Account Atmospheric Scattering." In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1993; P.175–182. DOI: 10.1145/166117.166140.

62. Tverskoy, P. N. 1962. *Meteorology Course*, 700. Russia: Publisher: L., Gidrometizdat.
63. Walker, J. 2004. "Colour Rendering of Spectra." <https://www.fourmilab.ch/documents/specrend/>
64. Walter, D., Bernhart, and A. William. 1969. Fetter: US Patent.
65. West, M. "Full-Disk HD Images of the Earth from Satellites." 2017 <https://www.metabunk.org/threads/full-disk-hdimages-of-the-earth-from-satellites.8676/>
66. Whitney, J. "Catalog" 1961. <https://www.youtube.com/watch?v=TbV7loKp69s>
67. William, A. F. 1965. *Computer Graphics in Communication*, 110. United States: McGraw-Hill.
68. Wright, W. D. 1929. "A Redetermination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours." *Transactions of the Optical Society* 30 (4): 141–164. doi:10.1088/1475-4878/30/4/301.
69. Zotti, G. "Dissertation." *Computer Graphics in Historical and Modern Sky Observations*. Wien, 29 October 2007 <https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2007/zotti-2007-PhD/zotti-2007-PhD-pdf.pdf>