

В.В. ПОДЛЕСНЫЙ  
**МЕТОД ПРОЦЕДУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА**

---

*Подлесный В.В. Метод процедурного моделирования облаков различных типов для авиационного тренажера.*

**Аннотация.** Представлен новый метод процедурного моделирования облаков. Предложена аналитическая форма записи облачной структуры для большого количества различных типов облаков и облачного слоя. Метод находит практическое применение в системах визуализации авиационных тренажеров.

**Ключевые слова:** процедурное моделирование, компьютерная графика, авиационные тренажеры.

*Podlesny V.V. A method for procedural modeling of clouds of various types for a flight simulator.*

**Abstract.** A novel method for procedural modeling of clouds is described in the paper. An analytical form of the cloud structure for a lot of different types of clouds and cloud layer is proposed. The given method has practical realization and application in virtual reality systems of flight simulators.

**Keywords:** procedural modeling, computer graphics, flight simulators.

---

**1. Введение.** Моделирование облаков как природного феномена является одной из наиболее важных и трудных задач, решаемых при построении виртуальной реальности для авиационного тренажера. При решении проблемы отображения больших открытых пространств качественная визуализация облаков оказывается мощным инструментом повышения реализма виртуальной обстановки. Наряду с этим, правдоподобие при моделировании облаков может быть достигнуто, по меньшей мере, двумя путями – феноменологическим (имитация результата) и физически-корректным (воспроизведение физических процессов).

Данная работа предлагает использовать в качестве инструмента моделирования феноменологический метод. Он, в силу своей простоты и, что особенно важно, контролируемости, позволяет в интуитивно понятной форме получать требуемый результат. Реализация феноменологического метода представлена в виде процедурного алгоритма генерации облаков.

**2. Предыдущие работы.** На данный момент существует достаточно много методов моделирования облаков [1]. В [2, 3] предлагают использовать систему частиц в качестве способа моделирования облаков и облачного слоя. Необходимость в

привлечении сторонних средств моделирования является основным недостатком этой системы.

В [4, 5] используют систему автоматической генерации геометрической модели облака по заданному «сценарию» (каркасу). Тем не менее, в [4] геометрическая модель, в отличие от системы частиц, определяет облако лишь как поверхность, а не как объем. А в [5] для вокселизации (получения объема) модели используется вычислительно емкий алгоритм хода лучей.

На основе симуляции динамики газа и жидкости в заданном объеме построена работа [6]. Метод является физически-корректным, однако требует достаточно больших вычислений и характеризуется низким уровнем точности (детализации). Более того, с его помощью невозможно в простой форме получить желаемый результат.

Более сложный способ моделирования представлен в работе [7]. Здесь рассматривается задача визуализации облачного слоя планетарных масштабов. Она успешно решается с помощью комбинирования различных приемов: воксельного (volume blocks), точечного (point blocks) и геометрического (surface blocks) моделирования. Однако метод требует значительного времени для предварительной обработки большого количества данных и является интерактивным.

**3. Постановка задачи.** Решение задачи моделирования облаков и облачного слоя связано с соблюдением определенного набора наиболее важных условий:

- Правдоподобие;
- Управляемость;
- Вариативность (универсальность).

В данной работе под правдоподобием понимается наличие в финальном изображении характерных черт для облаков одного вида: строго/слабо определяемые границы, наличие/отсутствие мелких деталей, вертикальное/горизонтальное развитие.

Для обеспечения управляемости инструмент моделирования должен предоставлять полный контроль над определением формы и структуры облаков и облачного слоя, а также обладать максимально возможным набором интуитивно-понятных параметров, влияющих на конечный результат.

Под вариативностью стоит понимать разнообразие форм и видов облаков и типов облачного слоя. Вариативность сильно зависит от степени контроля над процессом моделирования.

Многие предыдущие работы посвящены данным вопросам в отдельности. В отличие от них, здесь рассматривается задача объединения этих условий в целях получения максимально универсального и интуитивно-понятного инструмента моделирования облаков, что особенно важно для инструктора авиационного тренажера.

**4. Процедурное моделирование облаков.** В целях моделирования облаков и облачного слоя определен следующий набор входных параметров:

- высота облачного слоя над уровнем моря  $A$ ;
- толщина облачного слоя  $T$ ;
- степень покрытия (разреженность)  $C$ ;
- вид облаков.

Как показывает практика, подобный набор параметров является достаточным для симуляции сложных погодных условий с участием облаков в контексте авиационных тренажеров. Так для инструктора тренажера, желающего задать определенный тип облачности, не требуется моделировать каждое облако в отдельности. Напротив, используя заранее подготовленный перечень облаков различного вида, инструктору необходимо лишь указать в каком объеме (параметры толщины и процента покрытия) ему хотелось бы смоделировать облачный слой.

Остаются два нерешенных вопроса. Во-первых, каким образом расширять имеющийся набор облаков различного вида, то есть поддерживать и увеличивать вариативность. Во-вторых, каким образом достичь правдоподобия конечного результата, используя процедурные методы. Для решения обоих вопросов необходимо ввести процедуру моделирования конкретного вида облаков и определить набор параметров, на основе которых она будет производиться.

Как показали исследования, в зависимости от причин образования существуют следующие три группы облачных форм:

– Кучевообразные – облака, имеющие вид гряд, шаров различных размеров белого или серого цвета (*Cumulus*, *Cumulonimbus*, *Alto cumulus*);

– Слоистообразные – низкие, плотные облака различных оттенков серого цвета однородной структуры, иногда со слабым волнистым строением (*Nimbostratus*, *Altostratus*, *Cirrostratus*, *Cirrus*, *Stratus*);

– Волнистые – облака, расположенные облачными валами, параллельными волнами, нитями, группами или рядами хлопьев или шариков (Stratocumulus, Altocumulus, Cirrocumulus).

В целях моделирования можно выделить следующие характеристики для этих групп:

– пространственный шаблон  $P$  – величина, характеризующая средний пространственный размер облака (высокочастотные – кучевообразные, волнистые); то есть для одной и той же степени покрытия  $C$ , одна и та же площадь, может занимать, к примеру, либо несколькими облаками, либо одним;

– базовая плотность  $\rho_0$  – определяет цвет облаков и общую четкость контуров (более плотные – кучевообразные, слоистые);

– уплощенность основания  $F$  (наблюдается преимущественно у кучевообразных);

– турбулентность  $fbm$  – определяет наличие завихрений и волн (более турбулентные – кучевообразные, волнистые); описывается тремя параметрами: количество октав  $O$ , лакунарностью  $L$  и коэффициентом усиления  $G$ :

$$fbm(x) = \sum_{n=0}^{O-1} G^n N(xL^n),$$

где  $N(x)$  — функция Перлина [8];

– амплитуда высот  $H$  — определяет резкость перепада высот в облачном слое (резкий перепад высот — кучевообразные, волнистые); ответственна за наличие разрывов в облачном слое.

С точки зрения компьютерной графики, облако представляет собой совокупность значения цвета и прозрачности в наблюдаемой точке. Прозрачность, в свою очередь, напрямую определяет существование облака. Величина прозрачности может быть оценена через величину плотности  $\rho(x)$ . Таким образом, задача моделирования облака сводится к задаче получения аналитической формы для расчета величины плотности в данной точке пространства при заданных условиях.

В работе предлагается использовать идею, базирующуюся на методе генерации пирокластического шума [9]: для моделирования кучевых облаков используется пирокластические сферические примитивы. Такие примитивы можно получить путем фрактального смещения вершин сферы на случайный вектор. Если принять, что облачный слой является полым сферическим примитивом, то процедура смещения вершин на случайный вектор заменяется

операцией определения границы уровня (level set). Граница уровня разделяет пространство на области с нулевой и ненулевой плотностью. Таким образом, для всех точек пространства  $x$ , плотность в которых нулевая, облако считается несуществующим, и наоборот:

$$\rho(x) = \begin{cases} \rho_o, & A \leq |x| \leq A + T; \\ 0. & \end{cases}$$

Далее, построив сферу с радиусом равным промежуточному значению радиусов ограничивающих окружностей, зададим «осевую» поверхность  $c(x)$ :

$$c(x) = \frac{x}{|x|} (A + FT).$$

Изменяя параметр уплощения  $F$ , становится возможным изменять уровень «осевой» поверхности относительно границ уровня.

Зададим виртуальную точку пространства  $p(x)$  в виде

$$p(x) = x + \text{fbm}(xP)$$

и через нее определим дистанцию  $d(x)$  от точки  $x$  до «осевой» поверхности:

$$d(x) = |p(x) - c(x)|.$$

Введя девиацию  $D(x)$  для границы уровня в виде

$$D(x) = \frac{1}{2} CH[1 + N(xP)],$$

получим финальную формулу для вычисления плотности в заданной точке пространства:

$$\rho(x) = \rho_o \left[ D(x) - \frac{1}{T} d(x) \right], \text{ при } d(x) \in [0, T].$$

Это означает, что плотность определена только в границах уровня, а ее распределение имеет пространственную неоднородность. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

Таким образом, отвечая на поставленные вопросы, можно сказать, что свойство вариативности обеспечивается возможностью моделировать любую из групп облачных форм. Свойство правдоподобия следует из того, что предложенная аналитическая модель позволяет воспроизводить присущие для заданной группы облачных форм черты.

Стоит отметить, что существует частный случай процедурного метода — моделирование на основе карт плотности. Они представляют собой данные о значениях и распределении плотности в заданном объеме. Карта плотности определяется для всего облачного слоя целиком. Для ее создания могут быть использованы как методы

феноменологического моделирования, так и моделирования на основе динамики жидкости и газа.

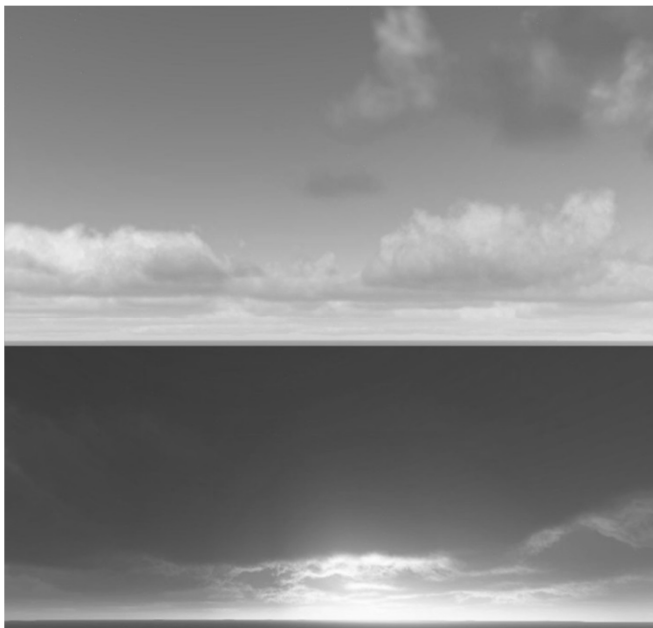


Рис. 1. Результаты моделирования облачности (сверху — cumulus humilis, снизу — cumulonimbus).

Карта плотности может иметь любое требуемое разрешение, ограниченное лишь аппаратными возможностями и требованиями к скорости работы системы моделирования. В то же время, высокое разрешение карты плотности может оказаться избыточным. В случае, когда требуется получить высокоточную модель облака, дополнительную информацию о его структуре и деталях можно добавить во время визуализации, применяя фрактальное преобразование.

**5. Заключение.** В статье представлен метод процедурного моделирования облаков и облачного слоя для авиационных тренажеров. Показанный метод позволяет в простой и интуитивно-понятной форме создавать реалистичные облака различных видов в реальном времени. Данный метод обладает свойствами правдоподобия, управляемости и вариативности.

Основной вклад работы следующий:

- сформулированы параметры, определяющие базовые черты групп облачных форм;
- представлена аналитическая формулировка облачного слоя для заданного объема;
- предложенный метод позволяет моделировать любой тип облаков.

Дальнейшая работа связана с улучшением предложенного метода и возможным переходом на гибридные методы (применение в совокупности с физически-корректными методами) моделирования облаков и облачного слоя. Это позволило бы симулировать такие явления как рождение, рост и рассеивание облаков, а так же конвективные процессы, происходящие в них во время их жизни.

### Литература

1. *Подлесный В.В.* Выбор метода моделирования облаков для авиационных тренажеров // МГТУ ГА: Научный Вестник, Москва, 2012. С. 105-111
2. *Harris M., Lastra A.* Real-Time Cloud Rendering. // Proceedings of Eurographics. 2001.
3. *Wang N.* Realistic and Fast Cloud Rendering. // Microsoft. 2003.
4. *Trembilski A., Broßler A.* Surface-Based Efficient Cloud Visualization For Animation Applications. // Fraunhofer Institut Für Graphische Datenverarbeitung. 2002.
5. *Wither J., Bouthors A., Cani M.-P.* Rapid sketch modeling of clouds. // Proceedings of Eurographics. 2008.
6. *Harris M., Baxter III W. V., Scheuermann T., Lastra A.* Simulation of Cloud Dynamics on Graphics Hardware. // Proceedings of Graphics Hardware. 2003.
7. *Dobashi Y., Yamamoto T., Nishita T.* An Interactive Rendering System Using Hierarchical Data Structure For Earth-Scale Clouds. // Science China Press And Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010.
8. *Perlin K.* Implementing Improved Perlin Noise. // GPU Gems.2003. Ch. 5.
9. *Wrenninge M., Zafar N. B.* Volumetric Methods in Visual Effects. // SIGGRAPH Course Notes. 2011.

**Подлесный Виктор Викторович** – аспирант, ассистент кафедры №8 Информатики Санкт-Петербургского Государственного Университета Гражданской Авиации (СПб ГУГА). Область научных интересов: компьютерная графика, комплексные системы визуализации. Число научных публикаций – 4. [openstealth@gmail.com](mailto:openstealth@gmail.com); СПб ГУГА, ул. Пилотов, 38, Санкт-Петербург, 196210, РФ.

**Podlesny Victor Victorovich** – PhD student, assistant of Computer Science department №8 of the St. Petersburg State University of Civil Aviation. Research interests: computer graphics, complex visualization systems. The number of scientific publications - 4. [openstealth@gmail.com](mailto:openstealth@gmail.com); St. Petersburg State University of Civil Aviation, st. Pilotov, 38, St. Petersburg, 196210, Russia.

Рекомендовано СПИИРАН, директор Юсупов Р.М., чл.-корр. РАН.

Статья поступила в редакцию 07.05.2013.

## РЕФЕРАТ

### **Подлесный В.В. Метод процедурного моделирования облаков различных типов для авиационного тренажера.**

Симуляция облаков в системе визуализации авиационного тренажера является достаточно трудной задачей в силу объективных причин, связанных с природой данного феномена. Существует два подхода к моделированию облаков – феноменологический и физически-корректный. В то же время, необходимо соблюдать условия правдоподобия, управляемости и вариативности результатов моделирования. В отличие от предыдущих работ, данная работа призвана решить проблему выполнения совокупности всех условий, а не какого-либо в отдельности. Как показали результаты исследований, для осуществления поставленной цели хорошо подходит метод процедурного моделирования облаков, так как позволяет описать их форму в аналитическом виде.

Оказалось, что на практике, инструктору авиационного тренажера для задания облачного слоя достаточно следующего набора параметров: высота облачного слоя над уровнем моря  $A$ , толщина облачного слоя  $T$ , процент покрытия (разреженность)  $C$ , вид облаков.

В целях упрощения процесса моделирования были выделены следующие три группы облачных форм: кучевообразные (cumulus, cumulonimbus, altocumulus), слоистообразные (nimbostratus, altostratus, cirrostratus, cirrus, stratus), волнистые (stratocumulus, altocumulus, cirrocumulus).

Для моделирования облаков предлагается использовать идею границ уровня: облако задано там, где задано положительное значение плотности. В данной работе предложена форма записи плотности через следующий набор параметров: частота облачности, базовая плотность, уплощенность основания облака, турбулентность, амплитуда высот.

Общий вклад работы следующий: выделены группы основных облачных форм; сформулированы параметры, определяющие базовые черты групп облачных форм; представлена аналитическая формулировка облачного слоя для заданного объема на основе предложенных параметров моделирования.

Дальнейшая работа связана с улучшением предложенного метода и возможным переходом на гибридные варианты. Это позволило бы учитывать физические свойства «поведения» облаков и облачного слоя.



## SUMMARY

### *Podlesny V.V.* **A method for procedural modeling of clouds of various types for a flight simulator.**

Simulation of clouds in the visualization of flight simulator is not an easy task due to objective reasons relating to the nature of this phenomenon. There are two approaches to the modeling of clouds - a phenomenological and physically-correct. At the same time, there is the need to follow the conditions of fidelity, controllability and variability of modeling results. In contrast to previous work, this paper aims to solve the problem of the aggregate of all conditions, and not to any individual. As the results of studies for the implementation of this goal is well-suited method of procedural modeling of clouds, as it allows describing the shape of clouds in an analytical form.

It turned out that, in practice, the instructor trainer aircraft for the job of the cloud layer is quite following set of parameters: the height of the cloud layer above sea level  $A$ , the thickness of the cloud layer  $T$ , the percentage of coverage (sparseness)  $C$ , the type of cloud.

In order to simplify the modeling process identified the following three groups of cloud forms: cumuliform (cumulus, cumulonimbus, altocumulus), stratiform (nimbostratus, altostratus, cirrostratus, cirrus, stratus), wavy (stratocumulus, altocumulus, cirrocumulus).

To simulate clouds are encouraged to use the idea of level sets: the cloud is set where the density is set to a positive value. In this paper we propose a form of the density through the following set of parameters: the frequency of cloud cover, the base density, flatness of the cloud base, the turbulence, the amplitude of heights.

The total contribution of paper is: the groups of basic cloud forms, formulated parameters that define the basic characteristics of groups of cloud forms, provide an analytical formulation of the cloud layer to a given volume based on the proposed model parameters.

Further work related to the improvement of the proposed method and a possible transition to hybrid options. It would take into account the physical properties of the "behavior" of clouds and cloud layers.