

УДК 004.9

## ТЕХНОЛОГИЯ ГЕНЕРАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВОКСЕЛИЗАЦИИ И ВОЛЮМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**Цветков Виктор Яковлевич<sup>1</sup>,**

*д-р техн. наук, профессор,  
e-mail: cvj2@mail.ru,*

**Мордвинов Владимир Александрович<sup>1</sup>,**

*канд. техн. наук, профессор,  
e-mail: mordvin-vlad@list.ru,*

**Матчин Василий Тимофеевич<sup>1</sup>,**

*e-mail: matchin.vt@gmail.com,*

<sup>1</sup>Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва, Россия

*Статья исследует пространственное моделирование, связанное с построением виртуальных ландшафтов. Рассматривается виртуальный ландшафт, который может описывать либо реальный ландшафт, либо сцену анимационных приложений. Целью работы является разработка технологии генерации виртуальных ландшафтов, позволяющей повысить реальность их представления с перспективой применения для обучения и игровых ситуаций. В статье рассмотрена технология вокселизации, которая является альтернативой технологии пикселизации при построении трехмерных моделей. Показано, что воксель есть разновидность информационной единицы. Описаны три основных компонента генерации виртуального ландшафта: построение карт высот, генерация шума, формирование виртуальных поверхностей. Показана целесообразность применения фрактальных моделей для генерации виртуального ландшафта. Показана целесообразность применения в качестве алгоритма шума фрактального броуновского движения. Дана систематика алгоритмов формирования виртуальных поверхностей. Предложена технология, включающая адаптивный модуль процедурной генерации виртуальных поверхностей с использованием метода вокселизации и волюметрических данных. Приведены результаты эксперимента, в ходе которого был разработан модуль, уточняющий известный алгоритм Marching Cubes и дающий более реалистичное описание виртуального ландшафта.*

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, виртуальный ландшафт, карта высот, алгоритм математического «шума», воксель, волюметрические данные

## TECHNOLOGY FOR GENERATING VIRTUAL LANDSCAPES USING THE VOXELIZATION METHOD AND VOLUMETRIC DATA

**Tsvetkov V. Ya.<sup>1</sup>,**

*doctor of technical sciences, professor,  
e-mail: cvj2@mail.ru,*

**Mordvinov V.A.<sup>1</sup>,**

*candidate of technical sciences, professor,  
e-mail: mordvin-vlad@list.ru,*

**Matchin V.T.<sup>1</sup>,**

*e-mail: matchin.vt@gmail.com,*

<sup>1</sup>Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

*The article explores spatial modeling associated with the construction of virtual landscapes. A virtual landscape is considered, which can describe either a real landscape or a scene of animated applications. The purpose of*

*the work is to develop a technology for generating virtual landscapes, allowing to increase the reality of their representation with the prospect of application for training and game situations. The article considers voxelization technology, which is an alternative to pixelization technology in the construction of three-dimensional models. It is shown that the voxel is a kind of information unit. Three main components of the virtual landscape generation are described: the construction of elevation maps, noise generation, and the forming of virtual surfaces. The expediency of using fractal models to generate a virtual landscape is shown. The expediency of using fractal Brownian motion as a noise algorithm is shown. The systematics of algorithms for the forming of virtual surfaces is given. A technology is proposed that includes an adaptive module for procedural generation of virtual surfaces using the voxelization method and volumetric data. The results of an experiment are presented, during which a module was developed that clarifies the well-known Marching Cubes algorithm and gives a more realistic description of the virtual landscape.*

**Keywords:** three-dimensional modeling, virtual landscape, elevation map, mathematical “noise” algorithm, voxel, volumetric data

DOI 10.21777/2500-2112-2023-1-91-99

## Введение

Ландшафтом обычно называют фрагмент наземной поверхности с характерным сочетанием, в первую очередь, рельефа и растительности, во вторую – климата, почв и животного мира. Существует понятие «природный ландшафт», которым обозначают пространственную среду, в пределах которой компоненты ландшафта сформированы и функционируют без участия человека. В области виртуального моделирования применяется термин «виртуальный ландшафт». Виртуальным ландшафтом в данной работе будем называть «виртуальную поверхность», на которой строится множество виртуальных сцен. Другим смыслом данного термина является «виртуальная основа» как фон для сценария, на котором разворачиваются виртуальные действия. Такой ландшафт применяют в различных видах образовательного и игрового контента: в видеоиграх, фильмах, обучающих программах, симуляциях [1]. Следует отметить, что использование методов вокселизации [2] при процедурной генерации ландшафта позволяет реализовать модификацию последнего, что приводит к значительному повышению интерактивности игрового мира. Повышение интерактивности, в свою очередь, приводит к насыщению соревновательной составляющей игры, вследствие чего увеличивается заинтересованность игрока в данном мультимедиапродукте [3]. Совершенствование технологии генерации виртуальных ландшафтов с применением метода вокселизации и волюметрических данных представляет актуальную научную задачу.

### 1. Различие между цифровым ландшафтом и игровым виртуальным ландшафтом

Цифровой ландшафт – это цифровая модель отображаемой местности. Он строится с главной целью отображения местности и ее пространственной конфигурации для последующего решения прикладных задач (расчет объемов, вынос проекта в натуру – перенесение проектных точек на местность). Отсюда главные требования к такой модели – точность и стационарность для ее многократного использования.

Игровое обучение широко используется в практике образования. Поэтому разработка виртуального контента имеет две основные области применения: в игровой индустрии и в образовании. Игровой виртуальный ландшафт строится с целью моделирования динамики пространственной ситуации, в том числе динамики самой ландшафтной модели. Главное требование к такой модели – возможность оперативного изменения или быстрой генерации данных для ее оперативного изменения и смены визуальной ситуации. Поэтому точность в ней отступает на второй план и заменяется на показатель «правдоподобие». Это совпадает с одним из основных трендов обучающих виртуальных сценариев и трендов игровой индустрии. Этот тренд отражает тенденцию развития программ автоматической

генерации контента [4]. Это обусловлено тем, что затраты на написание алгоритмов производства контента намного ниже затрат на производство самого контента. То есть метод генерации картин, если это возможно, намного быстрее, чем создание этих картин вручную. Процедурная генерация ландшафта может быть рассмотрена как часть системы автоматической генерации образовательного и игрового контента.

Использование методов вокселизации при процедурной генерации ландшафта позволяет также реализовать модификацию ландшафта [4] вместо его создания заново. Для примера, для каждого нового ландшафта или изменения ландшафта надо создавать новую цифровую модель местности и на ее основе строить модель ландшафта. Применение методов вокселизации позволяет модифицировать ландшафт, создавая измененный или совершенно новый ландшафт из старого на основе генерации контента. Такая ускоренная модификация ландшафта приводит к значительному повышению адаптивности, интерактивности и скорости информационного взаимодействия объектов виртуального мира [5]. Все это в итоге повышает интенсивность виртуального взаимодействия «пользователь – сценарий». Это приводит к насыщению обучающей или соревновательной составляющей игры. Вследствие этого увеличивается заинтересованность учащегося или игрока в данном мультимедиапродукте [3].

Для генерации воксельного ландшафта необходимо использование волюметрических данных, которые могут быть сгенерированы напрямую с помощью соответствующих алгоритмов, либо с использованием карт высот виртуального изображения. На основе карт высот с использованием методов вокселизации генерируют необходимые данные. Генерируемые волюметрические данные [6] разделены по участкам ландшафта. Их называют паттерны обеспечения возможности генерации ландшафта в реальном времени. Из полученных паттернов с использованием алгоритмов построения изоповерхностей формируют необходимый по сценарию виртуальный ландшафт [7].

## 2. Особенности вокселизации виртуального ландшафта

Особенности вокселизации виртуального ландшафта достаточно хорошо описаны в диссертации [2], поэтому воспользуемся пояснениями из этой работы. Термин *Voxel* образован из слов: объёмный (*volumetric*) и пиксель (*pixel*). *Voxel* является трехмерной информационной единицей или элементом объёмного изображения. Он содержит значение элемента раstra в трёхмерном пространстве. Воксели в трёхмерном пространстве являются аналогами двумерных пикселей для двухмерного пространства. Они огрубляют объекты. Поэтому первоначально основное использование вокселей было в области медицинской визуализации, где воксельные представления обычно используются для результатов сканирования МРТ. То есть они решали задачи сходства/различия, а не метрические задачи. Зато они хорошо решали задачи динамической визуализации. Это мотивировало их использование в видеоиграх. Одним из первых применений вокселей была визуализация ландшафта в видеоигре 1992 года *Comanche Maximum Overkill* (патент *Nova Logic* на трёхмерное *Graphics Engine*). В процессе вокселизации данных используется пространственная логика [8].

При анализе структуры вокселей необходимо отметить, что структурно они строятся как разреженные воксельные октодеревья (*Sparse Voxel Octree, SVO*). В работе [9] подробно описано квадротомическое дерево и октодерево, которое является развитием квадротомического дерева. *SVO* представляет собой древовидную структуру данных, в которой каждый узел разделен на восемь равных октантов. Октодерево представляет собой трехмерную версию квадротомического дерева. Если в какой-то момент все листовые узлы будут содержать одни и те же данные (либо все они пусты, либо все они имеют один и тот же тип вокселя), дерево заканчивается в этой точке (отсюда «разреженное» в разреженном октодереве вокселей). Это очень эффективный способ хранения воксельных данных, особенно в случаях, когда много больших томов пусты.

В дополнение к вокселям применяют термин «доксели». Этим термином обозначают воксели, изменяющиеся во времени. Последовательность воксельных моделей во времени образует трехмерную анимацию. Воксели удобны при рассмотрении ландшафта с разных точек зрения или имитации полета над поверхностью.

### 3. Основы генерации карт высот

Задача генерации виртуального ландшафта включает три подзадачи: генерацию карт высот, генерацию шума, формирование виртуальных поверхностей. Для решения задач применяют соответствующие алгоритмы, выбор которых определяется условиями предметной области областью применения виртуального ландшафта.

При генерации карт высот для виртуальных ландшафтов используют некоторые свойства реальных ландшафтов, на основе которых работают алгоритмы генерации ландшафтов виртуальных. Главным условием и свойством является подобие фрактальных объектов (рисунок 1) природным объектам (рисунок 2), в том числе и ландшафтам. Требование фрактальности, естественно, ограничивает применимость данного метода при реальных построениях, но не ограничивает при игровых и учебных ситуациях. На рисунке 1а приведено «фрактальное дерево», 1б – природное дерево для сравнения.

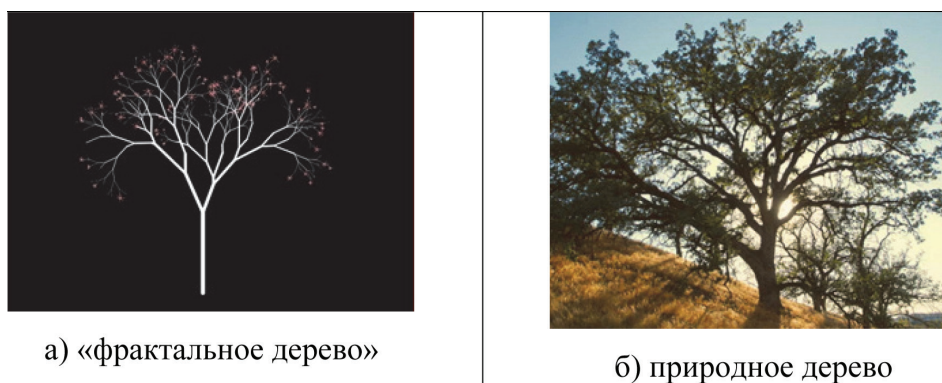


Рисунок 1 – Свойство подобия фрактальных объектов природным объектам

Фракталы содержат две характеристики: самоподобие и хаотичность. Под самоподобием в данной работе подразумевается возможность построения сложного фрактала из мелких. Хаотичностью обозначают потенциально бесконечную сложность, поскольку фракталы формируются рекурсивно и принципиально могут бесконечно масштабироваться. На практике, естественно, они конечны, но в теории их можно строить неограниченно.

Появление компьютерных технологий дало возможность создания псевдослучайных фрактальных ландшафтов и текстур с использованием алгоритмов генерации шума.

Данные, генерируемые алгоритмами генерации шума, могут быть использованы напрямую для генерации виртуального ландшафта или для генерации карты высот. Карта высот (также известная как “Heightmap”) – это изображение, которое может быть использовано для сохранения высоты каждой точки ландшафта в виде набора пикселей. Например, чёрно-белая карта высот (рисунок 2) может быть использована для преобразования цвета конкретного пикселя в высоту конкретной точки ландшафта, причём, белый цвет преобразуется в наивысшую точку, а чёрный цвет – в низшую. Эта методика заимствована из технологии картографирования.

Стоит отметить, что многие из используемых шумов не являются фрактальными по своей природе. Такие алгоритмы, как шум Перлина, шум Симплекса или Value Noise используются вкуче с броуновским движением (Brownian motion) для создания фрактальных изображений [10, с. 57–72].

Известна модель шума  $1/f$  шум ( $1/f$  noise), ФБД (фрактальное броуновское движение, *fractal Brownian motion*). Модель виртуального ландшафта строится путём наложения нескольких уровней шума поверх друг друга, частота каждого из которых увеличивается, а амплитуда – уменьшается относительно предыдущего уровня шума. Такая процедура позволяет создавать более детализированные и натурально выглядящие карты высот (рисунок 3). Однако следует отметить, что это моделирование детальности, а не реальность. Детализация достигается математически, а не на основе информационного соответствия реальному ландшафту. Но для игровых задач и задач тестирования в обучении такой виртуальный рельеф вполне подходит. Детализация (рисунок 3, справа) создает иллюзию псевдореальности.

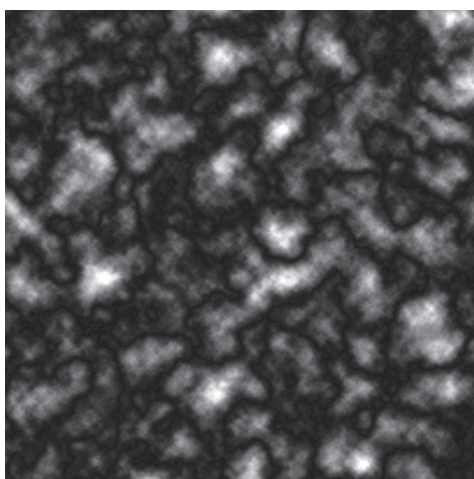


Рисунок 2 – Пример чёрно-белой карты высот

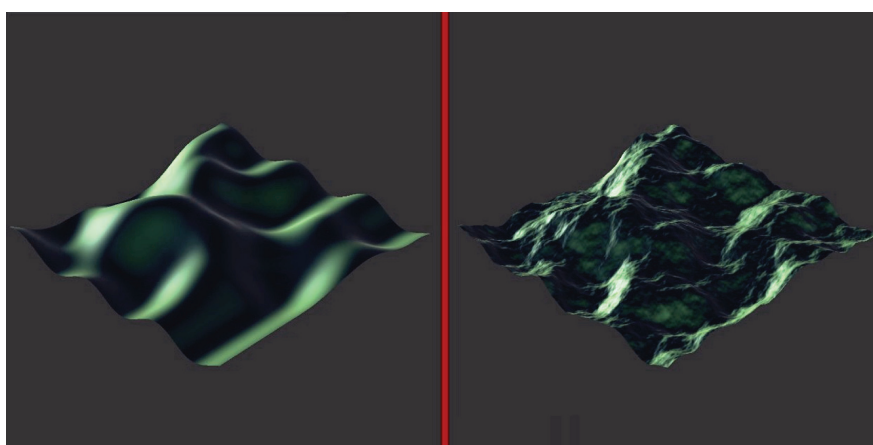


Рисунок 3 – Результаты генерации виртуального ландшафта без использования алгоритма ФБД (слева) и с использованием алгоритма ФБД (справа)

Существует множество алгоритмов генерации шумов, многие из которых используют для процедурной генерации виртуальных ландшафтов. Это такие алгоритмы, как Diamond-Square алгоритм, шум Перлина, Value Noise, шум Симплекса и шум Ворлея [11]. Сравнение данных алгоритмов на основе их производительности, требуемого объёма памяти и качества производимой карты высот приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных алгоритмов генерации шумов по разным критериям

Алгоритм	Производительность	Качество карты высот	Требуемый объём памяти
Diamond-Square	Очень высокая	Среднее	Высокий
Шум Перлина	Средняя	Высокое	Низкий
Шум Симплекса	Средняя	Очень высокое	Низкий
Value Noise	Низкая – Высокая*	Низкое – Среднее*	Очень низкий
Шум Ворлея	Вариативная	Уникальное	Вариативный

В таблице 1 для Value Noise задан интервал \* – означает – зависит от используемой функции интерполяции.

В отличие от алгоритма Diamond-Square, остальные алгоритмы генерации шумов не являются по своей природе фрактальными, поэтому необходимо применить алгоритм ФБД для генерации более детализированных карт высот. Кроме того, следует отметить, что термин «шум» обозначает не столько

шум, сколько метод детализации представления трехмерной грубой ступенчатой поверхности в виде гладкой детальной поверхности.

Выбор алгоритма генерации шума для системы генерации ландшафта зависит от требований обучения или тестирования или от применяемой игровой или обучающей ситуации. Для систем с высокими требованиями к производительности генерации наилучшим будет алгоритм Diamond-Square. Поскольку Diamond-Square по своей природе является фрактальным, генерация нескольких уровней шума для увеличения детализации карты высот не является необходимой. Алгоритм Value Noise является наилучшей альтернативой для систем с низким располагаемым объемом памяти. Алгоритм шум Ворлея производит уникально выглядящий шум (рисунок 4), который отличается связанностью.

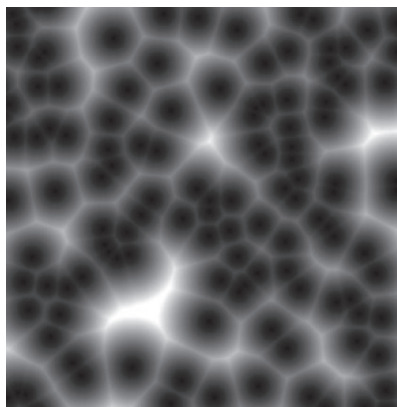


Рисунок 4 – Шум Ворлея

Для систем, нетребовательных к производительности или требуемой памяти, наилучшим выбором будет шум Симплекса, однако и классический шум Перлина (рисунок 5) может быть использован для лучшей визуальной детализации.

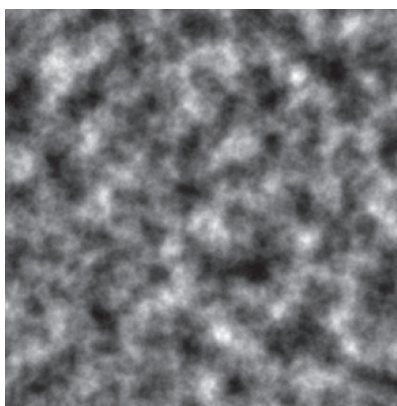


Рисунок 5 – Шум Перлина

Шум Перлина отличается псевдорельефностью, шум Ворлея выделяет структурность.

#### 4. Алгоритмы формирования виртуальных поверхностей

Согласно систематике, в качестве алгоритмов формирования виртуальных поверхностей могут быть использованы следующие: Marching Cubes; Surface Nets; Extended Marching Cubes; Dual Contouring; Dual Marching Cubes; Manifold Dual Contouring; Isosurfaces Over Simplicial Partitions of Multiresolution Grids; Cubical Marching Squares; Adaptive Skeleton Climbing; The Transvoxel Algorithm.

В рамках исследования, проведенного на кафедре инструментального и прикладного программного обеспечения РТУ МИРЭА, в качестве основного алгоритма формирования виртуальных поверхностей был выбран Marching Cubes, поскольку данный алгоритм является наиболее производительным и легко реализуемым среди всех вышеописанных алгоритмов. Также преимуществом Marching Cubes является то, что для его использования не требуется генерация дополнительных данных (таких, как нормали к поверхности).

Логический куб перемещается по данным вокселя или облака точек, после чего рассматриваются все восемь соседей (вершин логического куба). Если они считаются сплошными для целей построения поверхности, то эта вершина в логическом кубе устанавливается в единицу, в противном случае – в ноль. Важно отметить, что алгоритм изначально был разработан для данных плотности, где пороговое значение используется для определения того, что считается внутри или снаружи поверхности – однако в игре воксельного мира воксели четко определяются как твердые и находящиеся внутри поверхности или нет.

## 5. Результаты эксперимента

На основе проведенных исследований и выбранного алгоритма был разработан адаптивный модуль, отвечающий следующим функциональным требованиям:

- генерация ландшафта с использованием карт высот, математических шумов и фрактального броуновского движения;
- использование методов вокселизации для генерации волнометрических данных;
- разделение ландшафта на участки для возможности динамической генерации ландшафта в реальном времени;
- использование высокопроизводительных алгоритмов для генерации ландшафтов в реальном времени;
- реализация модульной системы с возможностью замены как типа и настроек генератора, так типа и настроек рендерера.

В качестве используемого математического шума был выбран шум Перлина; в качестве подхода для генерации карт высот была выбрана генерация ФБД; в качестве алгоритма формирования виртуальных поверхностей был выбран алгоритм Marching Cubes. Алгоритм Marching Cubes имеет 3 стадии выполнения:

- 1) разбиение поверхности на участки кубовидной формы с вокселями в качестве вершин;
- 2) построение поверхности в каждом участке на основе вокселей, принадлежащих данному участку;
- 3) на основе сгенерированных участков поверхностей построение поверхности (сгенерировать нормали к поверхности, построить физическую форму поверхности).

В качестве источника данных для построения поверхностей на каждом участке была создана таблица, соотносящая конфигурацию данного участка с кубом, который будет сгенерирован в данном случае. Для генерации нормалей был использован метод движка Unity RecalculateNormals(), который на основании имеющихся данных о вершинах и треугольниках генерирует нормали поверхностей, используемые для физического взаимодействия и корректного освещения поверхности. Пример сформированной процедурной поверхности представлен на рисунке 6. Стоит отметить, что в зависимости от заданного сйда (точки раздачи) и размера вокселя результат может существенно различаться.

На рисунке 6 ландшафт, сгенерированный с использованием оригинальной версии Marching Cubes, не может в точности отобразить изначально предоставленную карту высот из-за ограничений алгоритма. Был разработан альтернативный алгоритм с использованием значений плотности для каждой оси (X, Y, Z) вокселя, что в итоге предоставляет 3 плотности на воксель. Данный метод использует линейную интерполяцию для подсчета горизонтальной плотности между двумя соседствующими вокселями. Пример сформированного ландшафта с использованием данного подхода представлен на рисунке 7.

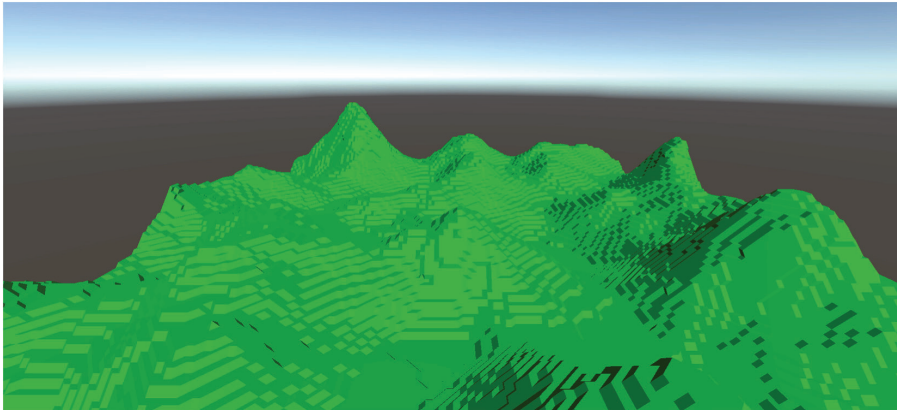


Рисунок 6 – Пример простейшей генерации виртуального рельефа

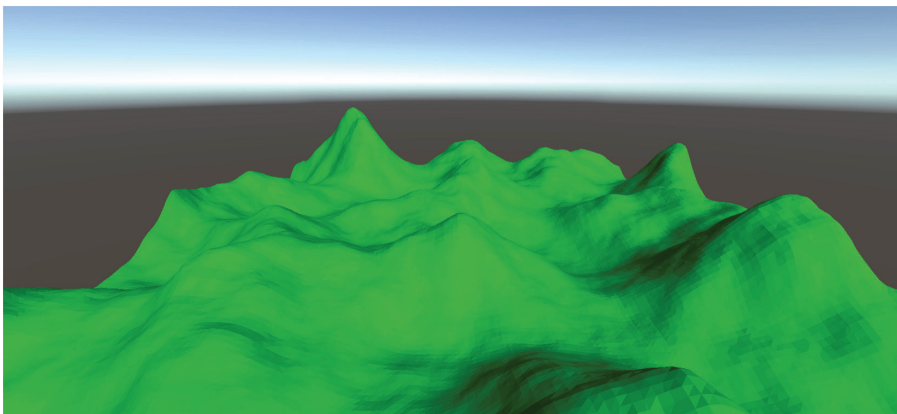


Рисунок 7 – Сгенерированный ландшафт с использованием трёх значений (трех сидов) плотности на воксель

Предложенная технология генерации виртуальных ландшафтов позволяет повысить реальность их представления.

### Заключение

В ходе исследований была разработана технология, включающая адаптивный модуль процедурной генерации виртуальных поверхностей с использованием метода вокселизации и волюметрических данных. Этот модуль уточняет алгоритм Marching Cubes. Был проведён анализ предметной области, исследованы основные методики генерации ландшафтов; рассмотрены основные алгоритмы генерации карт высот, алгоритмы генерации математических шумов, методы вокселизации, интерполяции и формирования процедурных поверхностей. Также рассмотрены аналоги разрабатываемого модуля, на основе анализа которых были составлены требования к функционалу адаптивного модуля. Результаты показывают, что генерация виртуальных ландшафтов с использованием метода вокселизации и волюметрических данных перспективна для обучения и для игровых ситуаций. В то же время алгоритм Marching Cubes в чистом виде хорош для игровых ситуаций, но мало реалистичен. Для повышения реальности виртуального ландшафта целесообразно дополнять данный алгоритм, вводя дополнительные плотности в воксель. Данный подход требует дальнейших исследований.



## Список литературы

1. Galin E. et al. A review of digital terrain modeling // Computer Graphics Forum. – 2019. – Т. 38, No. 2. – С. 553–577.
2. Dusterwald S. Procedural Generation of Voxel Worlds with Castles (Thesis, Master of Science (MSc)). – University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2015. – URL: <https://hdl.handle.net/10289/9819> (дата обращения: 03.02.2023). – Текст: электронный.
3. Vorderer P., Hartmann T., Klimmt C. Explaining the enjoyment of playing video games: The role of competition // International Conference on Entertainment Computing. – 2006. – P. 107–120.
4. Bontchev B. Modern trends in automatic generation of content for Video Games // Serdica Journal of Computing. – 2016. – No. 2. – P. 133–166.
5. Tsvetkov V.Ya. Information interaction // European researcher. – 2013. – No. 11-1 (62). – P. 2573–2577.
6. Henrique F. Procedural Generation of Volumetric Data for Terrain. Master Thesis // KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS). – 2019. – 10 p.
7. Etiene T., Scheidegger C., Nonato L.G. Verifiable Visualization for Isosurface Extraction // IEEE transactions on visualization and computer graphics. – 2009. – Vol. 15, No. 6. – P. 1227–1234.
8. Dolgy A.I., Rozenberg I.N., Tsvetkov V.Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation // AIP Conference Proceedings. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Melville; New York, United States of America, 2021. – P. 50059.
9. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.
10. Noor Shaker, Julian Togelius, Mark J. Nelson. Procedural Content Generation in Games. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 237 p.
11. Thomas J. Rose, Anastasios G. Bakaoukas. Algorithms and Approaches for Procedural Terrain Generation – A Brief Review of Current Techniques / 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES). – Barcelona, Spain, 2016. – P. 1–2. – DOI 10.1109/VS-GAMES.2016.7590336.

## References

1. Galin E. et al. A review of digital terrain modeling // Computer Graphics Forum. – 2019. – Т. 38, No. 2. – S. 553–577.
2. Dusterwald S. Procedural Generation of Voxel Worlds with Castles (Thesis, Master of Science (MSc)). – University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2015. – URL: <https://hdl.handle.net/10289/9819> (data obrashcheniya: 03.02.2023). – Tekst: elektronnyj.
3. Vorderer P., Hartmann T., Klimmt C. Explaining the enjoyment of playing video games: The role of competition // International Conference on Entertainment Computing. – 2006. – P. 107–120.
4. Bontchev B. Modern trends in automatic generation of content for Video Games // Serdica Journal of Computing. – 2016. – No. 2. – P. 133–166.
5. Tsvetkov V.Ya. Information interaction // European researcher. – 2013. – No. 11-1 (62). – P. 2573–2577.
6. Henrique F. Procedural Generation of Volumetric Data for Terrain. Master Thesis // KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS). – 2019. – 10 p.
7. Etiene T., Scheidegger C., Nonato L.G. Verifiable Visualization for Isosurface Extraction // IEEE transactions on visualization and computer graphics. – 2009. – Vol. 15, No. 6. – P. 1227–1234.
8. Dolgy A.I., Rozenberg I.N., Tsvetkov V.Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation // AIP Conference Proceedings. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Melville; New York, United States of America, 2021. – P. 50059.
9. Cvetkov V.Ya. Geoinformacionnye sistemy i tekhnologii. – М.: Finansy i statistika, 1998. – 288 s.
10. Noor Shaker, Julian Togelius, Mark J. Nelson. Procedural Content Generation in Games. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 237 p.
11. Thomas J. Rose, Anastasios G. Bakaoukas. Algorithms and Approaches for Procedural Terrain Generation – A Brief Review of Current Techniques / 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES). – Barcelona, Spain, 2016. – P. 1–2. – DOI 10.1109/VS-GAMES.2016.7590336.