

14. Классы PL-операторов (провайдеров логистических и складских услуг) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://likos.com.ua/world-pl-operators-classification/> – 15.07.2013. – Загл. с экрана.
15. Мальцева, М. В. Управление качеством транспортно-экспедиционного обслуживания внешнеторговых перевозок [Текст]: автореф. дис. ... к. э. н. 08.00.05 / М. В. Мальцева. – Государственный университет управления. – М., 2007. – 134 с.
16. Щербина, О. В. Способы начисления «демереджа» и «диспача» в линейном судоходстве [Текст]: матер. межд. науч.-практ. конф. / О. В. Щербина, О. В. Акімова // Транспорт. Т. 1. – Одесса: Черноморье, 2009. – С. 32–34.

У статті наведено метод автоматизованої побудови моделі поверхні ландшафту за супутниковими знімками і полем висот. Показано процес отримання карти матеріалів і деталей ландшафту. Наведено практичний приклад синтезу моделі ландшафту, оцінені характеристики швидкодії методу. Метод дозволяє отримувати різні типи ландшафтів в будь-яких природно-кліматичних умовах, а також надає основу для розробки методів синтезу рослинного покриву

Ключові слова: поле висот, текстурування ландшафту, тренажерні комплекси, система візуалізації, кластерний аналіз

В статье приводится метод автоматизированного построения модели поверхности ландшафта по спутниковым снимкам и полю высот. Показан процесс получения карты материалов и деталей ландшафта. Приведен практический пример синтеза модели ландшафта, оценены характеристики быстродействия метода. Метод позволяет получать различные типы ландшафтов в любых природно-климатических условиях, а также предоставляет основу для разработки методов синтеза растительного покрова

Ключевые слова: поле высот, текстурирование ландшафта, тренажерные комплексы, система визуализации, кластерный анализ

УДК 004.925

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30423

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ЛАНДШАФТА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

П. А. Качанов

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*
E-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

А. А. Зуев

Кандидат технических наук, доцент
*Кафедра «Автоматика и управление в
технических системах»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

В связи со значительным развитием вычислительной техники, методы компьютерной графики позволяют моделировать все более и более сложные объекты и среды реального мира. Синтез реалистичных изображений в системах визуализации, которые воспроизводят картину реального мира в соответствии со зрительными ощущениями человека, является одной из приоритетных задач компьютерной графики. Современные программируемые графические системы способны в реальном масштабе времени визуализировать большие пространства с высокой степенью детализации, моделировать наблюдаемые в реальном мире физические процессы [1].

Одной из областей применения компьютерной графики, неотъемлемой частью которой является синтез реалистичных изображений, являются системы визуализации в имитационно-тренажерных комплексах на основе средств вычислительной техники. Они позволяют моделировать различные ситуации, которые возникают при эксплуатации промышленных объектов и техники, в том числе военной. Создание условий

близких к реальным позволяет операторам приобрести правильные и устойчивые навыки управления сложными техническими объектами [2].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Важнейшей частью любой трехмерной модели окружающей обстановки, в том числе в тренажерных комплексах наземных транспортных средств, является ландшафт. Решение задачи синтеза и визуализации реалистичной поверхности ландшафта в реальном масштабе времени является комплексным и вычислительно сложным из-за высокой детализации существующих (реальных) ландшафтов и необходимости моделирования их протяженных областей, в пределах которых проходит обучение [3]. Это десятки или сотни квадратных километров, в зависимости от типа моделируемого транспортного средства и характера необходимых для обучения упражнений: движения по трассе или пересеченной местности, стрельбовые упражнения, групповое взаимодействие экипажей.

Автоматизация процесса синтеза ландшафтных моделей позволит сэкономить временные и материальные ресурсы, а также получить сравнительно однообразное, высокое качество модели ландшафта по всей его протяженности, что немаловажно для тренажерных комплексов транспортных средств, которые перемещаются вне дорожной сети.

Эффективные методы и алгоритмы визуализации ландшафтов в реальном масштабе времени, как с использованием динамического синтеза сетки ландшафта [4, 5], так и заранее подготовленных фрагментов [6], в целом достаточно хорошо проработаны. Но для их работы необходимы специально подготовленные исходные данные, описывающие модель ландшафта, которые обычно представлены в виде поля высот и описания материалов поверхности, соответствующих ему, например в виде набора текстур, покрывающих поверхность ландшафта.

Моделирование поверхности ландшафта включает в себя две основные части: физическую и визуальную. Для каждой из этих частей в свою очередь используется как поле высот [7], так и карта материалов (грунтов) поверхности. При этом карта материалов представлена различным образом для физического и визуального моделирования.

Для получения полей высот заданной области ландшафта в приемлемом для проведения моделирования виде целесообразно использовать соответствующие базы данных, например SRTM или Aster с последующим уточнением, удалением шумов и подготовкой поля к использованию в тренажерном комплексе. Один из вариантов подготовки поля показан в [8, 9].

Более комплексными, но неразрывно связанными с полем высот данными для моделирования, являются карты материалов (грунтов). Основной проблемой, возникающей при получении такой карты, является отсутствие специализированных баз данных по грунтам поверхности Земли. Но информация о грунтах и растительном покрове в некотором смысле присутствует на спутниковых снимках планеты и теоретически может быть из них извлечена. Такие снимки доступны в высоком разрешении, практически для любой области. При этом процесс извлечения информации о грунтах, используя спутниковые снимки, является сложным, так как на снимках присутствуют различные шумы, освещение, облачный и растительный покров, которые частично или полностью маскируют необходимую для построения модели информацию. Это затрудняет создание модели ландшафта и ведет к тому, что требуется предварительная обработка и подготовка снимков, которая в большинстве случаев проводится вручную, что увеличивает время и затраты на производство модели ландшафта.

В предложенных ранее методах получения карты материалов применяется синтез грунтов на основе полей высот, при помощи ряда эмпирических ограничений и моделирования эрозии, что и определяет, какие грунты, типы растительности и объекты ландшафта расположены в каких диапазонах наклонов и высот поверхности ландшафта [10]. Такие методы хоть и сокращают время и затраты на производство модели ландшафта, автоматизируя большую часть ручной работы, но все же не позволяют получить достаточно реалистичную (естественную) и одновременно прогнозируемую картину распределения грунтов по поверхности ландшафта.

3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка эффективных методов извлечения информации о грунтах, покрывающих заданную область ландшафта, из спутниковых снимков и построения карты материалов, используемой в системе визуализации и физического моделирования, на основе поля высот и информации о грунтах соответствующей ему.

Эти методы должны решать две важных задачи, возникающие при моделировании ландшафта:

- автоматизированное получение близкого к естественному (по объективным причинам оно никогда не будет точным) распределения грунтов;

- представление модели поверхности ландшафта в системе визуализации минимально возможным количеством текстур.

В системе визуализации ландшафта поле высот определяет геометрическую модель рельефа местности, а карта материалов, построенная с использованием полученного распределения грунтов, определяет визуальную составляющую модели и задается набором текстур накладываемых на ее поверхность. При этом с точки зрения эффективности и быстродействия системы визуализации, целесообразно минимизировать количество текстур используемых для представления ландшафта.

4. Исследование метода автоматизированного синтеза модели поверхности ландшафта

Метод синтеза модели ландшафта должен по подготовленным исходным данным, описывающим визуальную и геометрическую форму ландшафта, синтезировать набор данных, которые могут быть эффективно использованы системой визуализации и физического моделирования. Такими данными являются: карта деталей, используемая для смешивания текстур при визуализации, и карта материалов, соответствующая деталям, и используемая для физического моделирования.

Процесс синтеза карты деталей и материалов показан на рис. 1.



Рис. 1. Процесс синтеза карт материалов и деталей

Очевидно, что полностью исключить ручную подготовку данных необходимых для синтеза ландшафта, крайне затруднительно (и в большинстве случаев нецелесообразно), но можно существенно минимизировать объем такой работы.

4. 1. Исходные данные для моделирования

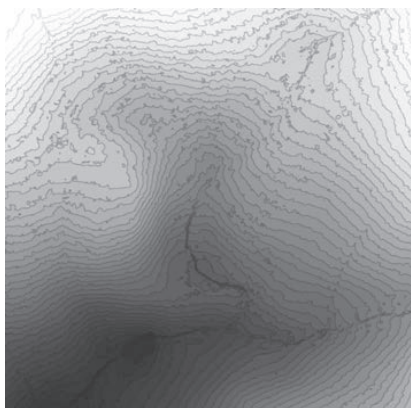
Основными исходными данными для синтеза модели ландшафта являются:

- спутниковые снимки синтезируемой области ландшафта;
- поле высот соответствующее спутниковым снимкам по координатам и площади.

На снимках должны быть удалены шумы и артефакты (облака, излишне затененные или высветленные области), снимки должны быть контрастированы и иметь выровненную яркость. Эти операции частично или полностью не автоматизируемы из-за наличия широкого спектра артефактов и шумов на снимках ландшафта, которые затруднительно или невозможно детектировать и удалить автоматически и эффективно выполняются только человеком, но при этом занимают сравнительно небольшое время. Системы координат снимка и поля высот должны быть одинаковыми, оба изображения должны быть совмещены. Пример подготовленных исходных данных для синтеза приведен на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Подготовленные исходные данные для синтеза модели ландшафта: а – спутниковый снимок; б – соответствующее ему поле высот

Также на этапе подготовки исходных данных необходимо определить:

- набор из n текстур используемых для отображения поверхности ландшафта, для каждой из которых рассчитывается один или несколько опорных цветов для привязки, которые будут определять соответствие текстуре областей спутникового снимка;
- характеристики материалов (грунтов), используемых в процессе физического моделирования [11], для каждого материала устанавливается величина влияния каждой из текстур с помощью вектора весовых коэффициентов.
- ограничения на появление материалов в зависимости от параметров рельефа (поля высот): по высоте, удаленности от водоемов, величине наклона поверхности ландшафта, локальным высотам и низинам.

4. 2. Метод синтеза модели поверхности ландшафта

На начальном этапе синтеза формируется n -мерная матрица соответствия опорных цветов множеству текстур, каждая из которых представлена одним или несколькими опорными цветами. Полученная матрица сохраняется в виде пар $\{c, w\}$ в упорядоченном множестве, где вектор деталей w определяет весовые коэффициенты смещения текстур для представления свойств точки ландшафта, а c – соответствующий этому вектору цвет на спутниковом снимке. В матрицу добавляются цвета во всем диапазоне яркостей, с определенным шагом дискретизации по яркости.

Дальше, согласно матрице, строится полное двоичное дерево, где исходные цвета являются листьями самого нижнего уровня дерева. Узлы более высокого уровня дерева получаются при помощи методов кластерного анализа, объединением листьев, а затем, на последующих шагах, и объединением полученных узлов.

За меру близости узлов примем евклидово расстояние

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (c_{ij} - c_{ik})^2}, \quad (1)$$

где c_i – i -я компонента цвета в системе RGB, j и k – номера узлов (листьев) на более низком уровне дерева, причем $j \neq k$.

Для объединения листьев в общий узел используется критерий максимального локального расстояния, который определяется как минимум от максимума расстояний [12] между крайними цветами, задающими диапазон цветов листа. Изначально эти цвета эквивалентны опорным цветам текстур, а затем, на последующих шагах, определяются как минимум и максимум цвета по каждому цветовому каналу i для объединяемых узлов или листьев.

Узлы (листья), которые были объединены, не участвуют в дальнейшей обработке. Результат объединения помещается в общее множество используемых цветов. После объединения всех узлов на новом уровне дерева, начинается объединение для следующего, более высокого уровня, до тех пор, пока не останется один узел. Таким образом, в результате последовательного объединения получится полное двоичное дерево из

$\log_2(K)$ уровней, где K – начальное количество опорных цветов текстур в матрице.

Узлы, содержащие опорные цвета, помечаются специальным флагом, который при поиске соответствий сигнализирует о том, что достигнут терминальный узел и поиск закончен.

После того, как дерево построено полностью, проводится непосредственно обработка спутниковых изображений. Ее целью является нахождение вектора весовых коэффициентов соответствующего каждой точке спутникового изображения, который помещается в карту деталей и будет использоваться в системе визуализации для смешивания текстур.

Для нахождения соответствия и формирования карты деталей и материалов еще необходимо синтезировать предварительные карты материалов и деталей на основании заданных ограничений по высоте, наклону, а также с учетом расположения искусственных объектов (дорог, зданий и сооружений) и растительности, которые строго определяют тип подстилающего материала.

Для каждой точки ландшафта $A(x,y)$ определяется тип материала (грунта), учитывая следующие параметры:

- $h(A)$ – высота (из поля высот) в точке A , относительно уровня моря;
- $g(A)$ – наклон поверхности в точке (вертикальная составляющая нормали к поверхности в точке A);
- $e(A)$ – величина эрозии, рассчитанная при подготовке поля высот.

Каждый материал описывается набором ограничений – диапазонов высот $(h_{m,min}; h_{m,max})$, эрозии $(e_{m,min}; e_{m,max})$ и наклонов $(g_{m,min}; g_{m,max})$, определяющих условия необходимые для его появления. Материал с номером m будет сопоставлен точке A , если справедливы неравенства

$$\begin{aligned} h_{m,min} < h(A) < h_{m,max}, \\ e_{m,min} < e(A) < e_{m,max}, \\ g_{m,min} < g(A) < g_{m,max}. \end{aligned} \quad (2)$$

В том случае, если точке A могут быть сопоставлены несколько материалов, для каждого из них вычисляется весовая функция $w(m)$, определяющая отклонение свойств ландшафта в точке A от наиболее благоприятных для данного материала m :

$$w(m) = k_m \cdot (w_{m,h} + w_{m,e} + w_{m,g}), \quad (3)$$

где $w_{m,i} = k_i \cdot \left(1 - \frac{|i - i_{x,y}|}{i}\right)^2$, $i = (i_{m,min} + i_{m,max})/2$, $i \in \{h, e, g\}$,

k_m – весовой коэффициент материала.

Коэффициенты k_m, k_i – подбираются экспериментально, в зависимости от характера моделируемого ландшафта и преимущественного распределения грунтов.

Далее, используя предварительную карту материалов и дерева соответствия, просматриваются все точки изображения и для каждого, в зависимости от настроек подстилающего материала, ставится в соответствие вектор весовых коэффициентов. Для материала может

быть задано как строгое соответствие текстур (например, для дорог – материал покрытия) так и полностью автоматическое определение согласно снимкам ландшафта. Характер определения задается весовым коэффициентом (от 0,0 до 1,0) в настройках материала – степень влияния вектора весов, который определен автоматически.

Автоматическое соответствие производится при помощи алгоритма поиска в двоичном дереве до самого нижнего уровня (до узлов, отмеченных при построении дерева как исходные). Время поиска соответствия в таком дереве будет пропорционально $2 \cdot \log_2(K)$ [13]. Найденный вектор соответствия текстур точке спутникового снимка записывается в карту деталей, которая используется на этапе визуализации ландшафта в качестве весовых коэффициентов при смешении базовых текстур.

Важнейшим этапом синтеза модели ландшафта является обратная реконструкция материалов, которая используется для уточнения предварительной карты материалов и обеспечивает точное соответствие визуальной и физической модели ландшафта, что позволяет избежать рассогласования визуальной и физической «картин мира» в процессе обучения операторов наземных машин и значительно повышает качество этого процесса.

Для такой реконструкции необходимо для каждой точки из карты материалов выбрать, согласно полученной на предыдущем этапе карте деталей, наиболее подходящий материал. При этом часть материалов (в основном под искусственными объектами, такими как дороги и различные сооружения) может быть помечена как неизменяемая и не участвующая в процессе уточнения. Для остальных типов материалов поверхности проводится поиск в списке материалов. При этом выбирается материал с наименьшим расстоянием между вектором усредненных деталей (задается при настройке материала на подготовительном этапе) и вектором весов из карты деталей. Выбранный материал в уточненной карте заменяет материал из предварительной карты.

5. Результаты исследования метода автоматизированного синтеза ландшафта

Для того чтобы практически проверить возможность автоматизированного синтеза модели поверхности ландшафта, на кафедре автоматики и управления в технических системах Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» была разработана и система подготовки ландшафтных данных, и система визуализации для тренажерных комплексов наземной техники, использующая эти данные.

Основой этих систем является программа подготовки модели ландшафта, написанная на языке C++, а также программа для визуализации, которая использует полученные модели и синтезирует изображения ландшафта в реальном масштабе времени с использованием графического API DirectX и вычислительных ресурсов ускорителя трехмерной графики.

Производительность программы подготовки исходных данных: 4 кв. км ландшафта за время

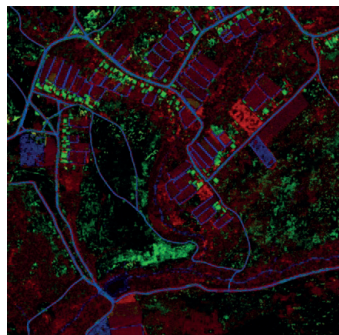
5–10 минут (в зависимости от типа ландшафта), на вычислительной системе общего назначения: процессор с тактовой частотой 3 ГГц и ОЗУ 4 Гб под управлением операционной системы Windows. Установлено, что реализация метода позволяет минимизировать количество необходимой ручной работы по подготовке модели ландшафта в несколько десятков раз.

Предложенный метод, в составе системы подготовки исходных данных тренажерного комплекса, позволяет автоматизировано синтезировать материалы поверхности ландшафтов различного типа в различных природно-климатических зонах на основе спутниковых снимков и соответствующих им полей высот.

Пример синтезированных карт материалов и деталей приведен на рис. 3. Для визуализации модели в данном примере использовано 4 текстуры (рис. 3, в).



а



б



в

Рис. 3. Синтезированные уточненные карты:
а – материалы; б – детали;
в – результат смешения текстур

Пример визуализации синтезированного фрагмента ландшафта с использованием ускорителя трехмерной графики с различных ракурсов показан на рис. 4.

6. Обсуждение результатов исследования метода синтеза поверхности ландшафта

На практике для увеличения быстродействия системы синтеза ландшафта (порядка 30 %), полученное на первом этапе дерево соответствия целесообразно кэшировать на диске и использовать для синтеза других, сходных по характеристикам фрагментов ландшафта.

При формировании матрицы соответствия опорных цветов множеству текстур, целесообразно исключить ~25 % наиболее светлых и темных оттенков. Что позволит получить более естественное изображение, без очень ярких или чрезмерно затемненных областей.

Реконструированная (уточненная) карта материалов может быть использована для дальнейшего синтеза модели окружающего мира: растительного покрова, определения влажности, а также для физического моделирования.

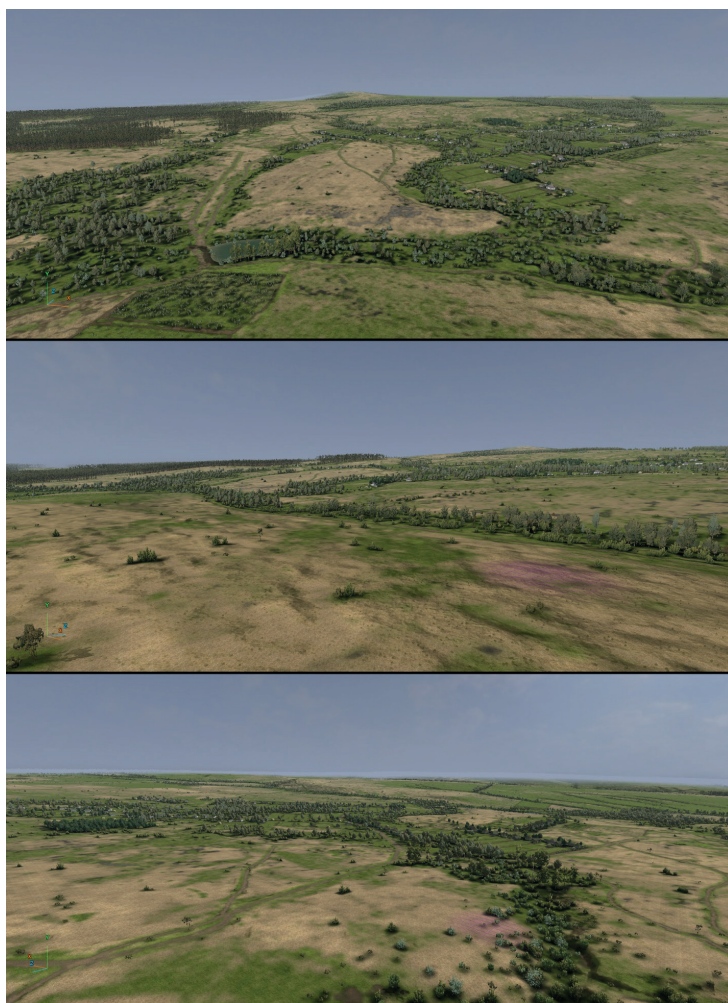


Рис. 4. Визуализация синтезированной модели ландшафта с трех различных точек обзора

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть методы автоматического синтеза травяного и растительного покрова по спутниковым снимкам, также частичной автоматизации подготовительных операций со спутниковыми снимками: контрастирование, удаление шумов, совмещение спутниковых изображений и полей высот, выравнивание яркости изображения.

Как видно из рис. 4, изображения, синтезированные по модели ландшафта, позволяют получить достаточно естественную и одновременно предсказуемую картину распределения грунтов. Модель позволяет получать изображения ландшафта с любого ракурса и может быть использована в системах визуализации тренажерных комплексов.

7. Выводы

Предложенный метод синтеза поверхности ландшафтов позволяет значительно улучшить качество синтезируемой модели ландшафта и, как следствие, позволяет приблизить визуальные и физические характеристики ландшафта к реально существующим. Это позволяет улучшить субъективное восприятие картины внекабинной обстановки, синтезируемой системой визуализации тренажерного

комплекса, и соответственно повысить качество обучения.

Метод позволяет:

- получить модель естественного и предсказуемого распределения грунтов согласно спутниковым снимкам ландшафта;
- визуализировать поверхность ландшафта с использованием заданного набора текстур.

Требуемые вычислительные ресурсы для синтеза поверхности ландшафта могут быть минимизированы, что позволяет использовать для построения системы визуализации более дешевое аппаратное обеспечение и, как следствие, приведет к снижению цены тренажерного комплекса в целом.

Кроме того, метод обладает большой гибкостью, позволяет получать различные типы ландшафтов в любых природно-климатических условиях, а также предоставляет основу для разработки методов синтеза растительного покрова.

Литература

1. Kapasi, U. J. Programmable Stream Processors [Text] / U. J. Kapasi, S. Rixner, W. J. Dally, B. Khailany, J. H. Ahn, P. Mattson, J. D. Owens. – Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE) Computer, 2003. – P. 54–62. doi: 10.1109/МС.2003.1220582
2. Фещенко, А. Потенциал и перспективы отечественного военного тренажеростроения [Текст] / А. Фещенко // Defence Express. – 2006. – № 4. – С. 39–45.
3. Lindstrom, P. Visualization of Large Terrains Made Easy [Text] / P. Lindstrom, P. V. Pascucci. – IEEE Visualization, October 2001. – P. 363 – 370. doi: 10.1109/VISUAL.2001.964533
4. Lindstrom, P. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields [Text] / P. Lindstrom, D. Koller, W. Ribarsky, L. E. Hodges, N. Faust, G. A. Turner // Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques – SIGGRAPH '96, 1996. – P. 109–118. doi: 10.1145/237170.237217
5. Duchaineau, M. Roaming terrain: Real-time optimally adapting meshes [Text] / M. Duchaineau, M. Wolinsky, D. E. Sigiety, M. C. Miller, C. Aldrich, M. B. Mineev-Weinstein. – Proceedings. Visualization '97, 1997. – P. 81–88. doi: 10.1109/visual.1997.663860
6. Thatcher, U. Rendering Massive Terrains using Chunked Level of Detail Control [Text] / U. Thatcher. – ACM SIGGRAPH 2002, volume Course 35, 2002.
7. Balog, A. Real-time visualization of detailed terrain [Text] / A. Balog. – Budapest: Konzulens, Rajacsics Tamas, 2003. – 68 p.
8. Качанов, П. А. Синтез реалистичных ландшафтов для тренажерных комплексов [Текст] / П. А. Качанов, О. Г. Васильченко, А. А. Зуев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2004. – № 17. – С. 101–107.
9. Зуев, А. А. Метод упаковки полей высот [Текст] / А. А. Зуев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2007. – № 36. – С. 44–48.
10. Hammes, J. Modeling of ecosystems as a data source for real-time terrain rendering [Text] / J. Hammes // 1st International Symposium, DEM 2001, Manno, Switzerland, 2001. – P. 98–101.
11. Балдин, В. А. Теория и конструкция танков [Текст] / В. А. Балдин. – М.: Военная академия бронетанковых войск им. Машиновского, 1972. – 781 с.
12. Дюран, Б. Кластерный анализ [Текст] / Б. Дюран, П. Оделл, пер. с англ. Е.З. Демиденко. – М.: «Статистика», 1977, – 128 с.
13. Седжвик, Р. Фундаментальные алгоритмы на C++. Анализ / структуры данных / сортировка / поиск [Текст] / Р. Седжвик; пер. с англ. – К.: Издательство «ДиаСофт», 2001. – 688 с.