

## Методы когнитивного представления глобального района тренировки в комплексных тренажерах по управлению кораблем

© 2026 В.Г. Грачёв <sup>1</sup>✉<sup>1</sup> НИИ «Центрпрограммсистем», г. Тверь, 170024, Россия

### Ссылка для цитирования

Грачёв В.Г. Методы когнитивного представления глобального района тренировки в комплексных тренажерах по управлению кораблем // Программные продукты и системы. 2026. Т. 39. № 1. С. 039–050. doi: 10.15827/0236-235X.153.039-050

### Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.5

Поступила в редакцию: 27.04.2025

После доработки: 15.05.2025

Принята к публикации: 29.05.2025

**Аннотация.** В статье рассмотрены методы автоматизированного создания и отображения протяженного рельефа макрорегионов тренировки с использованием систем имитации визуальной обстановки комплексных тренажеров по управлению кораблем. Проведен обзор существующих технологических ограничений когнитивного представления рельефа макрорегиона тренировки и показаны пути их преодоления. Отмечено, что повышение адекватности моделирования среды в комплексном тренажере по управлению кораблем достижимо за счет существенного увеличения вычислительной производительности методов моделирования. При этом в качестве вычислительного потенциала предлагается использовать существенно возросшие вычислительные мощности современных графических адаптеров. Они входят в состав системы имитации визуальной обстановки тренажера, однако существующее программное обеспечение тренажера утилизирует их не в полной мере. Описаны основные особенности метода параллельного рекурсивного деления на базе конкурентного двоичного дерева, метода формирования локально-адаптивной трехмерной модели фрагмента рельефа и метода видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки. Сформулированы критерии оптимальности этих методов и приведены результаты, подтверждающие оптимальную утилизацию интегральных вычислительных ресурсов системы «центральный процессор – шина данных – графический адаптер». Освещены особенности реализации методов в алгоритмическом и программном обеспечении автоматизированного создания и отображения протяженных рельефов в системе имитации визуальной обстановки. Новые возможности комплексных тренажеров по управлению кораблем при реализации положений парадигмы глобального района тренировки повышают не только их функциональные и дидактические возможности корабля, но и уровень технического исполнения.

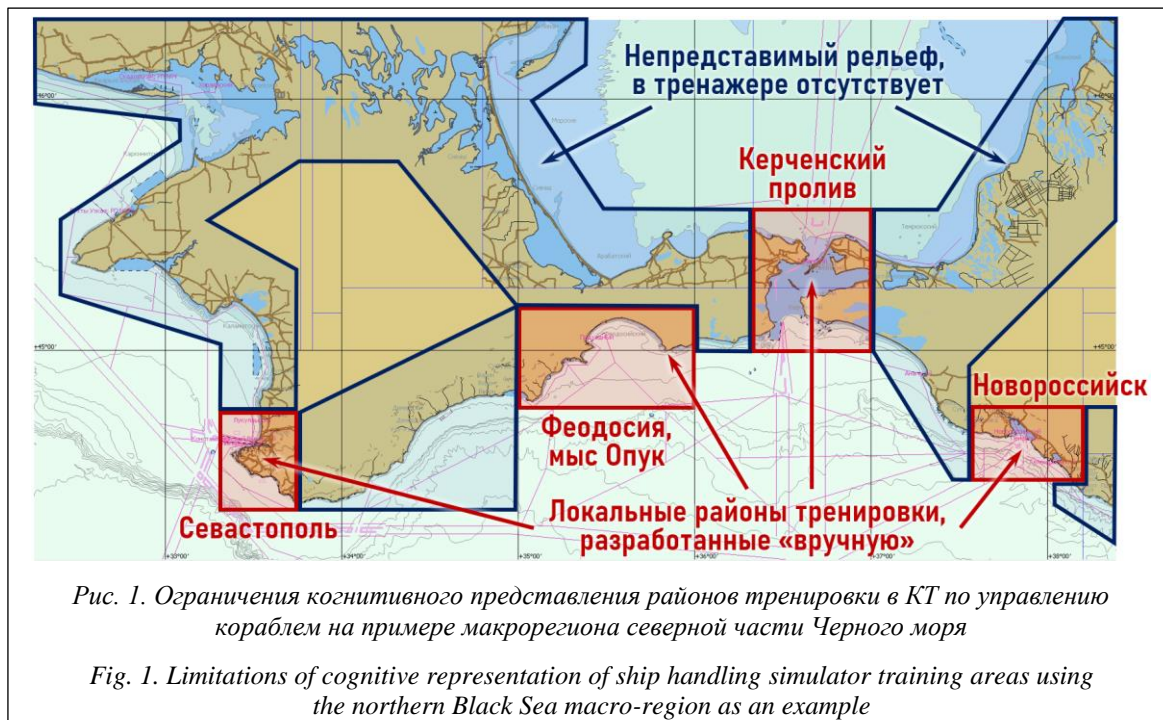
**Ключевые слова:** комплексный тренажер по управлению кораблем, система имитации визуальной обстановки, трехмерная модель, динамическое изменение точности моделирования

**Введение.** Практической подготовке специалистов к выполнению задач в составе боевого расчета и экипажа в системах боевой подготовки ВМФ и военно-морского образования уделяется особое внимание [1]. Важную базовую роль в этом процессе играют *комплексные тренажеры* (КТ), предназначенные для практической подготовки обучающихся к решению задач по управлению кораблем и обеспечению навигационной безопасности плавания.

Разумеется, КТ по управлению кораблем как техническое средство обучения имеют свои методические, технические и технологические особенности. Их важной составляющей является *система имитации визуальной обстановки* (СИВО), которая генерирует и отображает синтезированное трехмерное представление района и объектов тренировки. Она чаще всего является многоканальной и формирует панорамное изображение на цилиндрическом экране большого размера с широким сектором обзора вплоть до 360°. В сочетании с макети-

рованием конструктивов рабочих мест ходового мостика это обеспечивает иммерсивное обучение, но требует от комплексного тренажера высокого визуального реализма (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2026-1/7.jpg>).

Вместе с тем одним из функциональных ограничений существующих КТ по управлению кораблем является возможность проведения тренировок только в конечном наборе географических районов, называемых районами тренировки. Они создаются вручную и, как правило, имеют ограниченные размеры в несколько десятков морских миль. В первую очередь эти ограничения связаны с необходимостью отображения протяженных массивов земной поверхности с использованием систем имитации визуальной обстановки. За пределами подготовленного района тренировки трехмерное представление земной поверхности отсутствует (рис. 1). Обучающиеся на тренажере при выходе корабля за границы района продолжают тренировку в открытом море без визуаль-



ных ориентиров, имитаторы средств освещения обстановки также работают с ограничениями, например, с отсутствующей радиолокационной информацией на индикаторах кругового обзора навигационного радара.

Проблемы с формированием контента БД КТ существуют также и при практической тренажерной подготовке гражданских судоводителей. Исследователями отмечается тенденция развития современного тренажеростроения в наращивании интеллектуальных возможностей тренажера в рамках рабочего места руководителя. Конечное число ограниченных географических районов снижает возможности руководителя обучения по подготовке и проведению тренировок.

Для преодоления этого ограничения целесообразно принять и реализовать парадигму глобального района тренировки, которая подразумевает возможность проведения тренировок в любом географическом районе земного шара. Так как основной составной частью любого района тренировки, в том числе и глобального, является массив суши, то при реализации этой парадигмы потребуются автоматизированным образом создавать и отображать протяженные рельефы макрорегионов тренировки с использованием СИВО КТ по управлению кораблем.

Прикладным вопросам визуализации рельефа, в том числе протяженного, посвящены в основном исследования зарубежных специалистов. Например, в работе [2] авторами опи-

сан алгоритм непрерывного уровня детализации полей высоты Continuous Level of Detail (CLOD) Rendering of Height Fields, существенно уменьшающий количество отображаемых треугольников трехмерной модели рельефа. В работе [3] развита идея слияния и разделения треугольников модели рельефа и предложены две отдельные очереди с приоритетами, основанные на бинарном дереве треугольников. Исследование [4] посвящено алгоритму иерархического уровня детализации (Chunked LOD), основанному на квадратичном дереве, содержащем статические данные. В работах [5, 6] представлен новаторский подход, основанный на использовании аппаратной тесселяции – делении трехмерной модели на более мелкие графические примитивы непосредственно на графическом адаптере.

Подробный анализ развития методов визуализации протяженных рельефов на фоне изменения аппаратных возможностей ПЭВМ и экспоненциального роста возможностей их графических подсистем опубликован в работе [7]. Выявлены два основных подхода к решению этой задачи – минимизация количества треугольников трехмерной модели рельефа (классические алгоритмы до 2010 г.) и использование аппаратной тесселяции совместно с программируемыми конвейерами графических адаптеров (после 2010 г.).

Однако у каждого из этих подходов есть ограничения, которые не позволяют эффек-

тивно использовать их в комплексных тренажерах по управлению кораблем. Так, классические методы отображения протяженных рельефов обеспечивают гибко настраиваемое локально-адаптивное управление детализацией и одновременно позволяют учитывать дистанцию от наблюдателя и характер изменения высоты рельефа в его отдельных зонах. При этом основная вычислительная нагрузка при их реализации приходится на центральный процессор. Объем данных, затем передаваемых по шине данных на графический адаптер, высокий, что негативно сказывается на обобщенной производительности графической подсистемы.

Напротив, использование аппаратной тесселяции снижает нагрузку на центральный процессор и уменьшает объем данных, передаваемых на графический адаптер. Однако такие методы не обладают свойством локальной адаптации.

В настоящей статье рассматриваются новые методы, обеспечивающие выполнение задач когнитивного представления рельефа глобального района тренировки в КТ по управлению кораблем, их отличия от известных реализаций и преимущества.

#### **Технологические ограничения когнитивного представления рельефа макрорегиона тренировки в виде регулярной сетки высот**

Основными источниками данных о высотах глобальной поверхности Земли являются обработанные результаты дистанционного зондирования Земли, выполненного искусственными спутниками. Эти данные распространяются в виде цифровой модели рельефа. Доступные качественные исходные данные о глобальном рельефе Земли представлены в виде так называемых карт высот – регулярных сеток с данными о высоте в их узлах.

На базе таких карт возможно сформировать трехмерные модели отдельных фрагментов местности, представленную треугольными графическими примитивами. Их множество затем можно скомбинировать в трехмерную модель протяженного рельефа макрорегиона тренировки. Однако при таком прямом подходе суммарное количество треугольных примитивов полученной модели существенно превышает пределы, допустимые для работы СИВО в реальном времени. Технологические решения для устранения этого противоречия в КТ по управлению кораблем в настоящее время отсутствуют.

Для реализации положений принятой парадигмы глобального района тренировки в аспекте когнитивного представления протяженных массивов земной поверхности необходим механизм динамического формирования в реальном времени трехмерного описания рельефа с учетом локальных особенностей. Эффективным методом решения этой задачи будет рекурсивное деление крупных исходных треугольников отдельных фрагментов массива суши с дальнейшим уточнением результирующей триангуляции.

Таким образом, возникает потребность в разработке новых методов когнитивного представления глобального района тренировки, которые обеспечат формирование трехмерной модели его рельефа в реальном масштабе времени без снижения качества этой модели. После чего их необходимо реализовать в виде совокупности технологических решений для использования в КТ по управлению кораблем.

Повышение адекватности моделирования среды в КТ по управлению кораблем при этом достижимо за счет существенного увеличения вычислительной производительности методов моделирования. В состав аппаратного обеспечения систем имитации визуальной обстановки таких тренажеров входят современные графические адаптеры, которые могут быть применены для решения общих вычислительных задач. При этом они обладают значительными вычислительными возможностями, особенно при параллельных многопоточных способах обработки информации. Существующее базовое ПО КТ по управлению кораблем далеко не в полной мере утилизирует этот вычислительный потенциал, что дает возможность задействовать имеющийся резерв вычислительной мощности графических адаптеров.

На основе результатов анализа процесса когнитивного представления рельефа макрорегионов тренировки можно выделить следующие перспективные методы, которые обеспечат решение поставленной задачи.

*Метод параллельного рекурсивного деления иерархии треугольных примитивов.* Обладая высокой вычислительной производительностью, он обеспечит многопоточную обработку большого количества исходных данных цифровой модели рельефа, представленных в виде регулярных сеток высот, непосредственно на графическом адаптере. Это позволит эффективно использовать его в приложениях реального времени, таких как вычислительно-моделирующий комплекс и СИВО КТ по управлению кораблем.

Метод формирования локально-адаптивной трехмерной модели фрагмента рельефа макрорегиона тренировки. С учетом современных вычислительных возможностей графических адаптеров и их архитектурных особенностей он должен одновременно обеспечивать локальную адаптивность, иметь незначительную вычислительную нагрузку на центральный процессор и максимально полно задействовать вычислительные возможности графического адаптера при минимизации объема данных, передаваемых по шине между ним и центральным процессором.

Метод видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки в системе имитации визуальной обстановки КТ по управлению кораблем. Такой метод должен обеспечить бесшовную стыковку трехмерных моделей отдельных фрагментов рельефа с сохранением свойства их локальной адаптивности. При этом он должен сохранять работоспособность с соблюдением установленных ограничений по используемой оперативной памяти и памяти графического адаптера.

Рассмотрим представленные методы подробнее.

### Метод параллельного рекурсивного деления иерархии треугольных примитивов

Алгоритмы рекурсивного деления демонстрируют быстрый рост вычислительной слож-

ности в зависимости от глубины рекурсии. Из-за их фундаментально экспоненциального характера вычислительные затраты с увеличением глубины разделения могут быстро стать ограничением. Один из путей амортизации возрастающей вычислительной сложности – выполнение рекурсивного деления не только адаптивно, но и параллельно. Хотя адаптивное подразделение легко реализовать последовательно, в общем случае сопрячь его с параллельной обработкой непросто. Решить эту проблему можно путем внедрения структуры данных, подходящей для параллельной обработки.

Такой структурой является конкурентное двоичное дерево (КДД). Оно предназначено для построения и параллельного обновления топологии полного двоичного дерева, в том числе с использованием возможностей графического адаптера [2, 8].

Для представления топологии КДД использует неявную двоичную кучу в виде битового поля. Чтобы обеспечить эффективную итерацию по листовым узлам дерева, битовое поле дополняется его редуцированной суммой (рис. 2). В работе [9] теоретически исследованы все этапы построения КДД и алгоритмы его использования.

Двоичный характер рекурсивного деления позволяет представить его как процесс изменения топологии двоичного дерева, поэтому КДД – мощный инструмент для его реализации, позволяющий эффективно разбивать данные на части и обрабатывать их по отдельности. Применительно к треугольнику метод рекурсив-

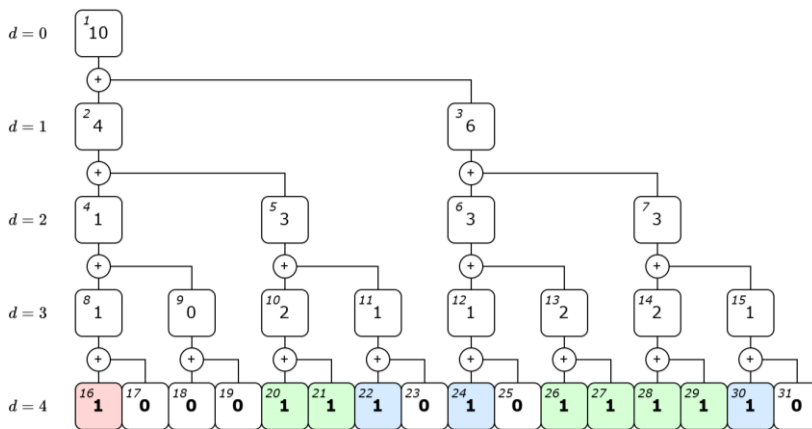


Рис. 2. Битовое поле произвольного двоичного дерева глубины  $D = 4$ , дополненное редуцированной суммой листовых узлов. В ячейках указаны значения редуцированной суммы листовых узлов, в верхнем левом углу ячеек – индексы узлов

Fig. 2. Bit field of an arbitrary binary tree with depth  $D = 4$ , augmented with the reduced sum of leaf nodes. Cell values represent the reduced sum of leaf nodes; node indices are shown in the upper left corner of each cell

ного деления формирует иерархическую структуру двоичного дерева, где корнем является исходный треугольник, а на каждом следующем уровне родительский треугольник при выполнении принятого условия разбивается на два подтреугольника до тех пор, пока не будет достигнуто определенное условие остановки (рис. 3).

Разработанные алгоритмы использования КДД в методе параллельного рекурсивного деления треугольных примитивов обеспечивают согласованное деление и слияние производных подтреугольников, гарантируя формирование сплошной результирующей иерархии треугольников без артефактов.

В силу того, что КДД обеспечивает параллельную обработку листовых узлов, оно представляет собой оптимальный инструмент для реализации метода рекурсивного деления треугольников. В работе [9] показано, что производительность алгоритмов метода параллельного рекурсивного деления на базе КДД при выполнении на графическом адаптере обеспечивает уменьшение времени их выполнения на два-три порядка по сравнению с центральным процессором.

### Метод формирования локально-адаптивной трехмерной модели фрагмента рельефа макрорегиона тренировки

Формирование и отображение рельефа – достаточно хорошо изученная область информационных технологий. Общая стратегия визуализации протяженного рельефа включает несколько этапов, от выбора исходных данных и их обработки до непосредственного формирования изображения в ходе так называемого рендеринга.

Рассмотренные ограничения существующих методов отображения протяженных массивов суши позволяют сформулировать требования к оптимальному методу формирования локально-адаптивной трехмерной модели отдельного фрагмента рельефа глобального района тренировки. Оптимальный метод визуализации рельефа с учетом вычислительных возможностей современных графических адаптеров и их архитектурных особенностей должен одновременно быть локально адаптивным, иметь низкую нагрузку на центральный процессор и минимизировать объем передаваемых данных. При этом вычислительные возможности графического адаптера должны быть задействованы максимально полно. При создании такого метода перспективным направлением является модернизация классических алгоритмов для обеспечения их работоспособности в многопоточном параллельном варианте.

В качестве базового алгоритма была выбрана нерегулярная иерархическая триангуляция на базе прямоугольных треугольников [10]. Такой способ представления поверхностей является компромиссом между обычной регулярной сеткой высот и нерегулярной триангуляцией (например, триангуляция Делоне, рис. 4).

Эта иерархическая триангуляция эффективно кодируется с использованием предложенного КДД, которое обладает всеми свойствами классического двоичного дерева, применяемого в оригинальном алгоритме. Построение трехмерной модели выполняется с использованием разработанного метода параллельного рекурсивного деления. При этом используется метрика ошибок, которая определяет, насколько точно треугольник аппроксимирует поверхность рельефа под ним. На рисунке 5 указаны ошибки треугольников CEI и AEG, отмечен-

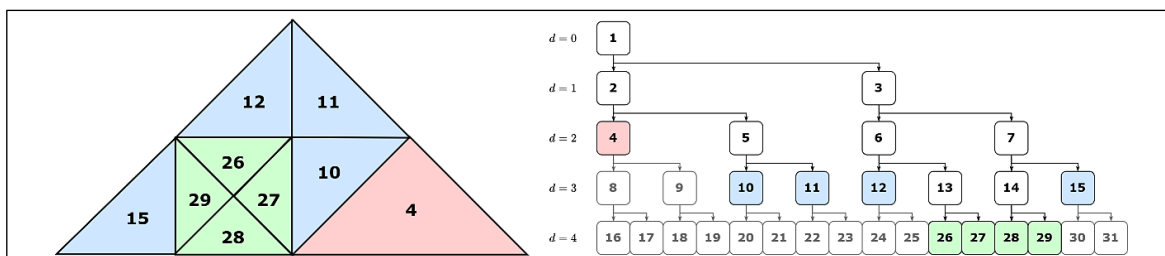


Рис. 3. Рекурсивное разделение треугольного примитива: слева – рекурсивно разделенный треугольник при адаптивном разделении; справа – соответствующая ему иерархическая структура двоичного дерева глубины  $D = 4$ ; на подтреугольниках и в соответствующих узлах дерева указаны их индексы

Fig. 3. Recursive subdivision of a triangular primitive: left – adaptively subdivided triangle; right – corresponding hierarchical binary tree structure with depth  $D = 4$ ; indices are indicated on the sub-triangles and in the corresponding tree nodes

ные пунктирными отрезками JF и DK соответственно.

Предложенная модернизированная метрика ошибок в два раза снизила требования к объему памяти, необходимому для хранения значений ошибок треугольников, и на порядок уменьшила количество необходимых вычислений по сравнению с оригинальным алгоритмом. Способ формирования метрики ошибок из-за применения механизма распространения ошибки также обладает другим важным свойством – он обеспечивает априорную сплошность формируемой трехмерной модели и не требует дополнительного специального контроля в процессе ее построения.

Сформированная при помощи описываемого метода трехмерная модель фрагмента рельефа обладает свойством локальной адапта-

ции. Количество треугольников модели экспоненциально уменьшается при линейном увеличении заданного значения ошибки построения. При этом визуальное качество отображаемого фрагмента рельефа сохраняется на высоком уровне, допускающем его практическое применение. Результат работы метода при различных значениях ошибки построения приведен на рисунке 6.

Метод формирования локально-адаптивной трехмерной модели фрагмента рельефа макро-региона тренировки обладает вариативностью использования в части изменения иерархической структуры треугольников трехмерной модели. Это обеспечивает эффективное выполнение различных практических сценариев построения в системе имитации визуальной обстановки КТ окончательных трехмерных моделей от-

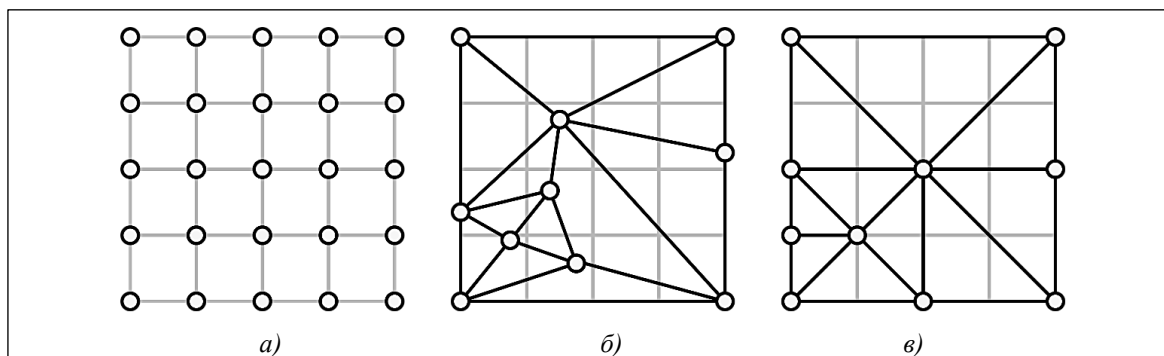


Рис. 4. Способы представления пространственных данных о рельефе: а) регулярная сетка высот; б) триангулированная нерегулярная сетка высот; в) иерархическая триангуляция, основанная на регулярной сетке высот

Fig. 4. Terrain spatial data representation methods: а) regular height grid; б) triangulated irregular network; в) hierarchical triangulation based on a regular grid

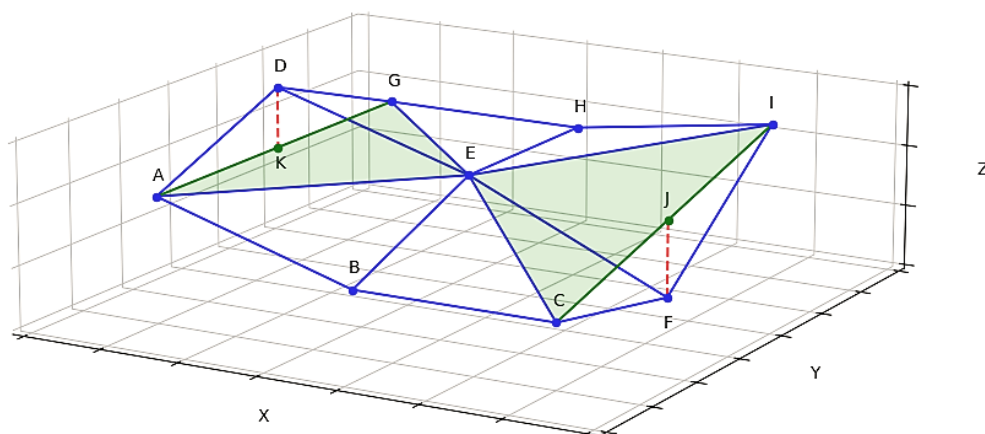


Рис. 5. Метрика ошибок на базе средней точки гипотенузы, определяющая качество аппроксимации рельефа иерархией треугольников

Fig. 5. Error metric based on the hypotenuse midpoint for assessing terrain approximation quality using a triangle hierarchy



дого отдельного отображаемого фрагмента рельефа обеспечивает его видозависимое представление. При таком подходе для трехмерных моделей не будет создаваться множество избыточных треугольников малого размера, что могло бы привести к снижению производительности. Значение ошибки представления  $\epsilon$  для каждого треугольника модели рельефа зависит от заданной величины ошибки в экранных координатах  $S$  и параметров проекции. На рисунке 7 в верхней части изображено формирование растрового изображения фрагмента рельефа на прямоугольном экране в поле зрения виртуальной камеры, а в нижней – проекция линейной ошибки представления фрагмента рельефа в экранные координаты.

Для формирования трехмерного представления рельефа макрорегиона тренировки из нескольких фрагментов требуется предусмотреть для каждого из них представление в памяти графического адаптера нескольких индексиро-

ванных наборов данных. Необходимо обеспечить работоспособность метода в условиях ограничения на максимальный объем используемой памяти. Задача обеспечения корректного выполнения метода видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки решается с использованием менеджера фрагментов глобального рельефа – программной подсистемы управления иерархией фрагментов, которая является этапом в общем конвейере подготовки и отображения кадров СИВО (рис. 8).

Менеджер фрагментов также обеспечивает работоспособность метода в условиях установленных ограничений на размер используемой памяти: оперативной и графического адаптера, в том числе с использованием механизма кэширования данных.

При использовании метода видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки корректиро-

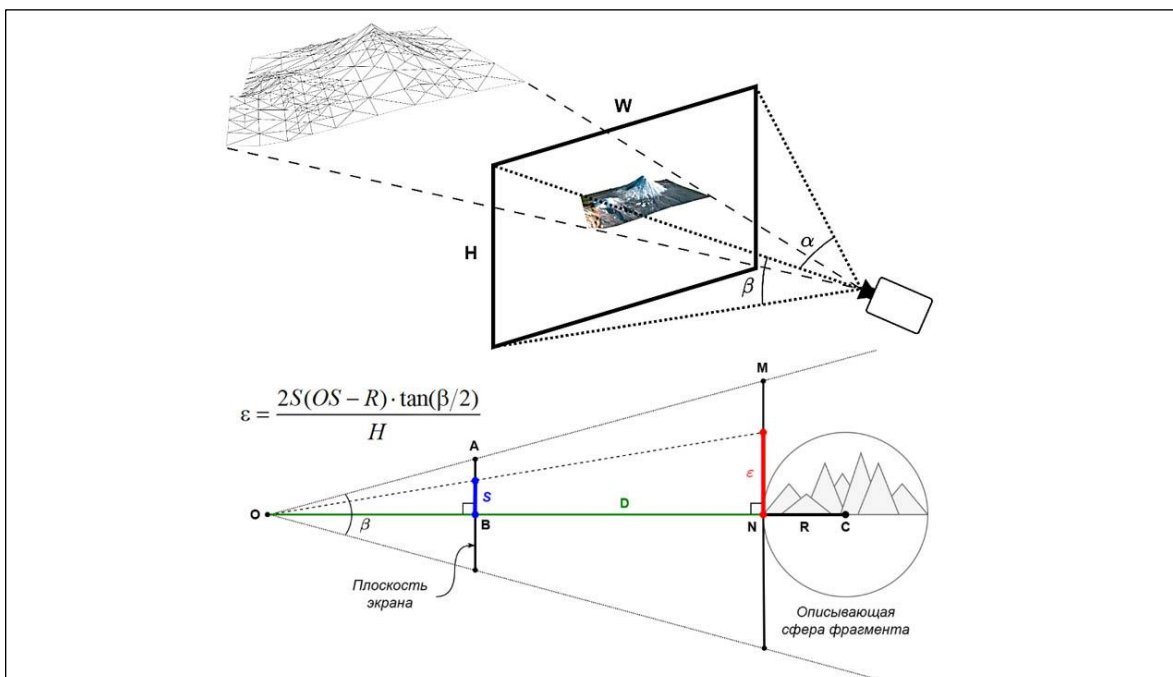
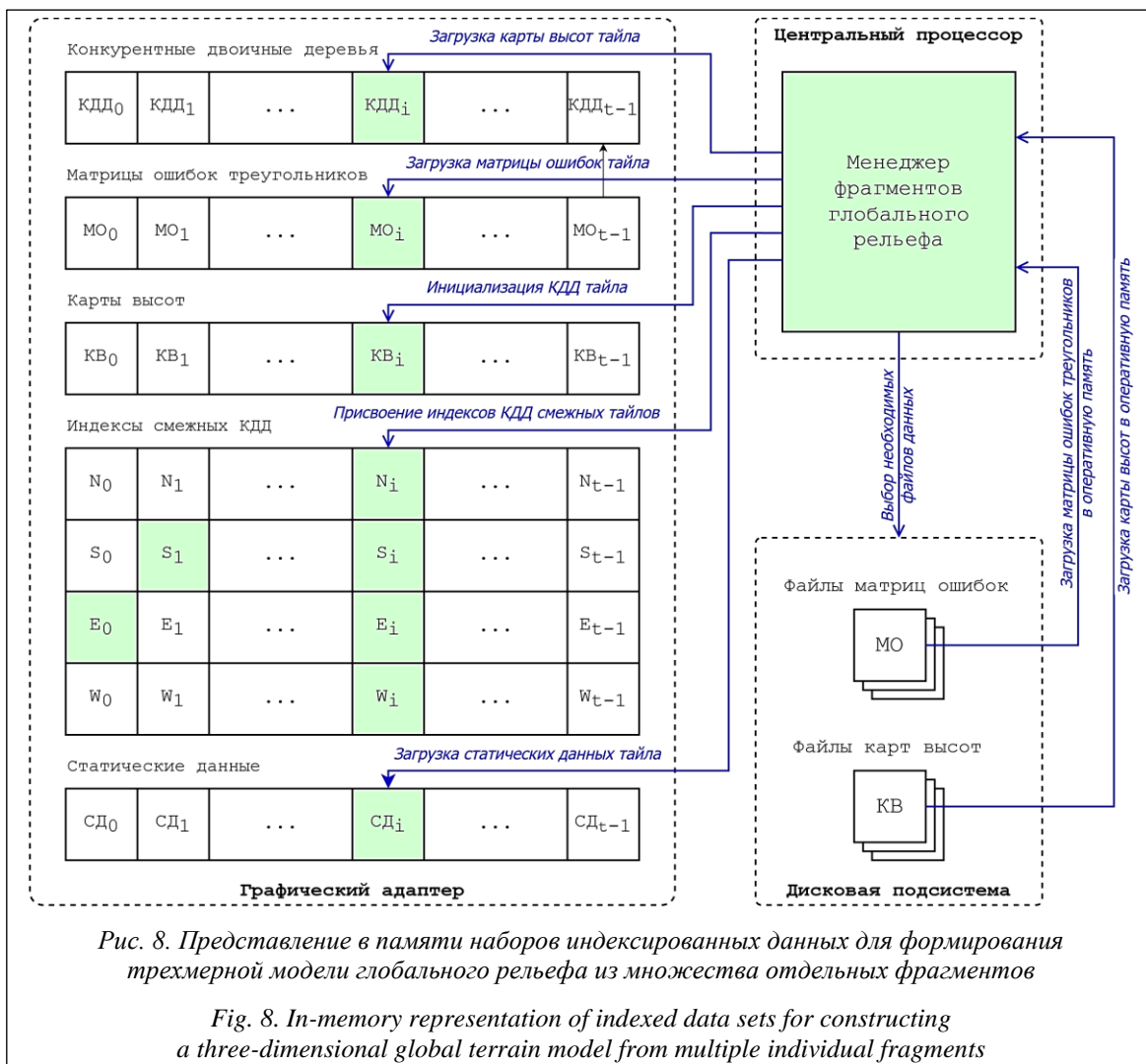


Рис. 7. Формирование растрового изображения фрагмента рельефа на прямоугольном экране в поле зрения виртуальной камеры:  $\alpha$  – угол горизонтального обзора камеры;  $\beta$  – угол вертикального обзора камеры;  $O$  – позиция виртуальной камеры;  $C$  – позиция центра модели фрагмента рельефа;  $R$  – радиус описывающей сферы модели фрагмента рельефа;  $W$  – ширина экрана;  $H$  – высота экрана;  $S$  – заданная ошибка представления в экранных координатах;  $\epsilon$  – заданная ошибка представления

Fig. 7. Raster image generation of a terrain fragment on a rectangular viewport within the virtual camera's field of view:  $\alpha$  – camera horizontal field of view;  $\beta$  – camera vertical field of view;  $O$  – virtual camera position;  $C$  – center position of the terrain fragment model;  $R$  – radius of the terrain fragment model's bounding sphere;  $W$  – screen width;  $H$  – screen height;  $S$  – specified error in screen-space coordinates;  $\epsilon$  – specified representation error



ванные алгоритмы согласованного разделения и слияния треугольников отдельных фрагментов глобального рельефа учитывают информацию об их взаимном расположении, представленную в виде матрицы индексов смежных фрагментов. Для обеспечения бесшовной стыковки трехмерных моделей отдельных фрагментов в общий глобальный рельеф распространение разделения треугольников выполняется не только в пределах одного фрагмента, но и продолжается в смежных с ним (рис. 9). При выполнении операций слияния треугольников также обрабатываются ромбовидные структуры, которые формируются сливаемыми треугольниками, принадлежащими смежным фрагментам рельефа.

Таким образом, метод видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки в системе имитации визуальной обстановки КТ по управлению кораблем сочетает свойства локальной

адаптивности и видозависимости формируемой трехмерной модели рельефа и при этом выполняет все необходимые операции непосредственно на графическом адаптере в реальном масштабе времени.

### Автоматизированное создание и отображение протяженных рельефов в СИВО КТ

Методы когнитивного представления рельефа макрорегионов тренировки были реализованы в алгоритмическом и программном обеспечении автоматизированного создания и отображения протяженных рельефов в разработанной СИВО КТ по управлению кораблем. При этом решаются две основные практические задачи: подготовка необходимых данных о глобальном районе тренировки и их отображение в реальном времени в ходе выполнения тренировок на КТ.

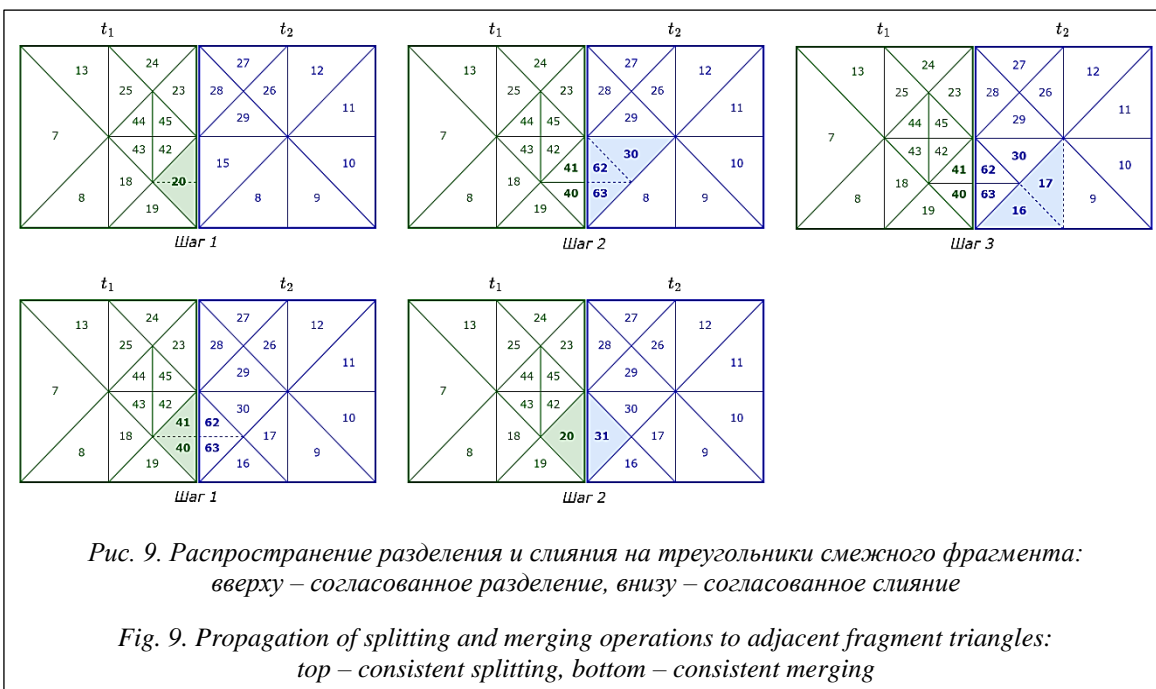


Рис. 9. Распространение разделения и слияния на треугольники смежного фрагмента: вверху – согласованное разделение, внизу – согласованное слияние

Fig. 9. Propagation of splitting and merging operations to adjacent fragment triangles: top – consistent splitting, bottom – consistent merging

На этапе подготовки используются исходные данные о высотах и глубинах из различных источников – глобальные и региональные цифровые модели рельефа, электронные морские навигационные карты, данные аэро- и космической фотосъемки. Обобщенная регулярная сетка высот макрорегиона формируется путем интеллектуального комбинирования данных из различных источников с учетом зон их покрытия, пространственного разрешения и правил, заданных специалистом. Сформированная сетка высот проходит обязательную автоматическую валидацию для выявления узлов с отсутствующими данными или аномальными значениями.

В процессе тренировки подготовленные данные с использованием рассмотренных методов в реальном времени преобразуются в трехмерную модель рельефа макрорегиона тренировки, которая затем отображается средствами СИВО. Благодаря применению специальных принципов и техник численных расчетов программная реализация отображения фрагментов глобального рельефа гарантирует непрерывность его трехмерной модели и отсутствие визуальных артефактов.

Новые возможности КТ по управлению кораблем при реализации в нем положений парадигмы глобального района тренировки повышают его функциональные и дидактические возможности, а также уровень технического исполнения. Это, в свою очередь, приводит к повышению эффективности использования тренажера при подготовке специалистов ВМФ.

### Выводы

В данном исследовании показано, что существует актуальная потребность обеспечения возможности проведения на КТ по управлению кораблем тренировок в макрорегионах с их отображением на системе имитации визуальной обстановки, однако технологические решения для этого отсутствуют.

Для когнитивного представления протяженных массивов земной поверхности необходим механизм динамического формирования в реальном времени трехмерного описания протяженного рельефа с учетом локальных особенностей на базе цифровых моделей Земли. Эффективным методом решения этой задачи будет рекурсивное деление крупных исходных треугольников отдельных элементов массива суши с дальнейшим уточнением результирующей триангуляции.

Метод параллельного рекурсивного деления иерархии на базе КДД обладает высокой вычислительной производительностью за счет многопоточного выполнения непосредственно на графических адаптерах. Это позволяет эффективно использовать его в приложениях реального времени, таких как вычислительно-моделирующий комплекс и СИВО КТ по управлению кораблем.

Метод формирования локально-адаптивной трехмерной модели фрагмента рельефа макрорегиона тренировки оптимально утилизирует интегральные вычислительные ресурсы системы «центральный процессор – шина данных –

графический адаптер» и позволяет в полной мере задействовать возросшие вычислительные мощности современного аппаратного обеспечения тренажеров.

Метод видозависимого когнитивного представления протяженного рельефа макрорегиона тренировки в системе имитации визуальной обстановки КТ по управлению кораблем обеспечивает бесшовную стыковку трехмерных моделей отдельных фрагментов рельефа с сохранением свойства их локальной адаптив-

ности в условиях установленных ограничений используемой памяти.

Реализованное алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного создания и отображения протяженных рельефов в СИВО КТ по управлению кораблем существенно повышает эффективность использования тренажера при подготовке специалистов за счет новых функциональных и дидактических возможностей, а также благодаря более высокому уровню технического исполнения.

#### Список литературы

1. Захаров В.Л., Ильин В.А. Тренажеры Военно-Морского Флота: создание и использование. СПб; Тверь: Центрпрограммсистем, 2019. 248 с.
2. Lindstrom P., Koller D., Ribarsky W., Hodges L.F. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields. Proc. SIGGRAPH '96, 1996, pp. 109–118. doi: 10.1145/237170.237217.
3. Duchaineau M., Wolinsky M., Sigeti D.E., Miller M.C., Aldrich C., Mineev-Weinstein M.B. ROAMing terrain: Real-time optimally adapting meshes. Proc. Visualization'97, 1997, pp. 81–88. doi: 10.1109/VISUAL.1997.663860.
4. Thatcher U. Rendering massive terrains using chunked level of detail control. Tulrich, 2002. URL: <http://tulrich.com/geekstuff/sig-notes.pdf> (дата обращения: 23.04.2025).
5. Tatarchuk N., Barczak J., Bilodeau B. Programming for Real-Time Tessellation on GPU. AMD, Inc., Tech. Rep., 2009. [https://web.tecgraf.puc-rio.br/~abraposo/inf2063/alunos/Real-Time\\_Tessellation\\_on\\_GPU.pdf](https://web.tecgraf.puc-rio.br/~abraposo/inf2063/alunos/Real-Time_Tessellation_on_GPU.pdf)
6. Cantlay I. DirectX 11 Terrain Tessellation. NVIDIA Developer, 2010, 26 p. URL: [https://developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/files/sdk/11/TerrainTessellation\\_WhitePaper.pdf](https://developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/files/sdk/11/TerrainTessellation_WhitePaper.pdf) (дата обращения: 23.04.2025).
7. Грачёв В.Г. Когнитивное представление рельефа глобального района тренировки в навигационных тренажерах Военно-морского флота. М.: Эдитус, 2024. 252 с.
8. Moir M., Shavit N. Concurrent data structures. In: Handbook of Data Structures and Applications. Boca Raton, CRC Press, 2018, pp. 741–764.
9. Грачёв В.Г., Ушаков А.С. Исследование свойств конкурентного двоичного дерева // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 398–413. doi: 10.15827/0236-235X.143.398-413.
10. Evans W., Kirkpatrick D., Townsend G. Right triangular irregular networks. Algorithmica, 2001, vol. 30, pp. 264–286. doi: 10.1007/s00453-001-0006-x.

### Cognitive representation methods for global training areas in complex ship handling simulators

© 2026 Vsevolod G. Grachev <sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Research Institute Centerprogramsistem, Tver, 170024, Russian Federation

#### For citation

Grachev, V.G. (2026) 'Cognitive representation methods for global training areas in complex ship handling simulators', *Software & Systems*, 39(1), pp. 039–050 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.153.039-050

#### Article info

Received: 27.04.2025

After revision: 15.05.2025

Accepted: 29.05.2025

**Abstract.** This paper examines methods for the automated generation and visualization of extended terrain in macro-regional training areas using visual simulation systems integrated into complex ship handling simulators. Current technological limitations in the cognitive representation of macro-regional training terrain are analyzed, and potential solutions are proposed. It is noted that enhancing the fidelity of environmental modeling in complex ship handling simulators can be achieved through a substantial increase in the computational performance of modeling methods. In this context, the significantly expanded processing power of modern graphics processing units – already integrated into the simulator's visual simulation system but currently underutilized by existing simulator software – is proposed as a key computational resource.

The main features of the proposed approach are described, including a parallel recursive subdivision method based on concurrent binary tree techniques, the generation of a locally adaptive three-dimensional terrain fragment model, and view-dependent cognitive representation of extended macro-regional terrain. Optimality criteria for these methods are formulated, and results confirming the efficient utilization of the integrated computational resources of the “CPU – data bus – graphics adapter” system are presented. The algorithmic and software implementation specifics of these methods within the automated generation and visualization pipeline for extended terrains in the visual simulation system are discussed. The new capabilities introduced into complex ship handling simulators by implementing the global training area paradigm enhance both the functional and didactic characteristics of the simulator, as well as its overall technical sophistication.

**Keywords:** complex ship handling simulator, visual simulation system, three-dimensional model, dynamic level of detail

### References

1. Zakharov, V.L., Ilin, V.A. (2019) *Ship Handling Simulators for the Navy: Development and Application*. St. Petersburg; Tver, 248 p. (in Russ.).
2. Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., Hodges, L.F. (1996) ‘Real-time, continuous level of detail rendering of height fields’, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp. 109–118. doi: 10.1145/237170.237217.
3. Duchaineau, M., Wolinsky, M., Sigeti, D.E., Miller, M.C., Aldrich, C., Mineev-Weinstein, M.B. (1997) ‘ROAMing terrain: Real-time optimally adapting meshes’, *Proc. Visualization'97*, pp. 81–88. doi: 10.1109/VISUAL.1997.663860.
4. Thatcher, U. (2002) ‘Rendering massive terrains using chunked level of detail control’, *Tulrich*, available at: <http://tulrich.com/geekstuff/sig-notes.pdf> (accessed April 23, 2025).
5. Tatarchuk, N., Barczak, J., Bilodeau, B. (2009) ‘Programming for Real-Time Tessellation on GPU’, *AMD, Inc., Tech. Rep.* [https://web.tecgraf.puc-rio.br/~abraposo/inf2063/alunos/Real-Time\\_Tessellation\\_on\\_GPU.pdf](https://web.tecgraf.puc-rio.br/~abraposo/inf2063/alunos/Real-Time_Tessellation_on_GPU.pdf)
6. Cantlay, I. (2010) *DirectX 11 Terrain Tessellation*. NVIDIA Developer, 26 p., available at: [https://developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/files/sdk/11/TerrainTessellation\\_WhitePaper.pdf](https://developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/files/sdk/11/TerrainTessellation_WhitePaper.pdf) (accessed April 23, 2025).
7. Grachev, V.G. (2024) *Cognitive Representation of Global Training Area Terrain in Naval Navigation Simulators*. Moscow, 252 p. (in Russ.).
8. Moir, M., Shavit, N. (2018) ‘Concurrent data structures’, in *Handbook of Data Structures and Applications*. Boca Raton, CRC Press, pp. 741–764.
9. Grachev, V.G., Ushakov, A.S. (2023) ‘A research on concurrent binary tree properties’, *Software & Systems*, 36(3), pp. 398–413 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.143.398-413.
10. Evans, W., Kirkpatrick, D., Townsend, G. (2001) ‘Right triangular irregular networks’, *Algorithmica*, 30, pp. 264–286. doi: 10.1007/s00453-001-0006-x.

### Авторы

Грачёв Всеволод Геннадиевич<sup>1</sup>,  
к.т.н., ведущий научный сотрудник,  
grachev@cps.tver.ru

<sup>1</sup> НИИ «Центрпрограммсистем»,  
г. Тверь, 170024, Россия

### Authors

Vsevolod G. Grachev<sup>1</sup>,  
Cand. of Sci. (Engineering),  
Leading Researcher, grachev@cps.tver.ru

<sup>1</sup> Research Institute Centerprogramsistem,  
Tver, 170024, Russian Federation