

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.94:519.63

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

Способ 3D-визуализации горного отвода на основе дискретной воксельной модели для анализа пространственных процессов

Л. Н. Бурмин¹✉

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: LNBurmin@mail.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в создании рационального способа моделирования горного отвода, включающего оптимальный алгоритм интерполяции данных разведочных скважин, визуализацию модели горного массива, формирование цифровой дискретной модели и возможность моделирования поведения углепородного массива в различных имитационных ситуациях. Для достижения поставленной цели на первом этапе исследования необходимо решить ряд задач: выбрать алгоритм визуализации и интерполяции, определить структуру для хранения и манипулирования модельными данными, реализовать базовый алгоритм в виде компьютерной программы для изучения возможной работоспособности выбранного решения и существующих ограничений. Для выбора рационального алгоритма проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов визуализации, их достоинств и недостатков при визуализации получаемых результатов исследования предметной области. Для решения задачи хранения и манипулирования данными в модели предлагается подход создания структуры данных, представляющей собой реализацию дискретизации трехмерного пространства конечными трехмерными блоками (чанками) с возможностью рекурсивной декомпозиции на несколько более подробных объектов, повторяющих родительскую структуру. Каждый конечный объект такой модели может обладать собственными свойствами, что позволит моделировать напряженно-деформированное состояние углепородного массива. Для реализации компьютерной программы, обладающей достаточной для решения поставленных задач функциональностью, использован трехмерный движок Unity. Проведены синтетические тесты, позволяющие сделать положительный вывод о возможности построения трехмерной графической модели, сопоставимой по объему и масштабу с горным отводом в условиях ограничений в аппаратных ресурсах. Сделан вывод, что предложенный способ дискретизации может быть применим для дальнейших задач моделирования.

Ключевые слова: горный массив, ГИС, горное дело, геоинформатика, алгоритмы построения 3D-изображений

Для цитирования:

Бурмин Л. Н. Способ 3D-визуализации горного отвода на основе дискретной воксельной модели для анализа пространственных процессов. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 75–83. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

3D visualization method of a mining lease based on a discrete voxel model for analysis of spatial processes

L. N. Burmin¹✉

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: LNBurmin@mail.ru

Abstract. The study proposes an efficient method for modeling mining lease areas, comprising an optimized interpolation algorithm for exploration borehole data, visualization of the rock-mass model, construction of a discrete digital representation, and simulation of coal-bearing massif behavior under diverse scenarios. The initial phase addresses the following tasks: selection of suitable visualization and interpolation algorithms; definition of a data structure for storage and manipulation of model information; and implementation of a prototype algorithm as a software application to assess the feasibility and limitations of the proposed approach. A comparative analysis of existing visualization algorithms was conducted to identify the most appropriate technique, evaluating their advantages and limitations with respect to the study objectives. To address the problem of data storage and manipulation, a hierarchical discretization data structure is proposed, which partitions three-dimensional space into finite volumetric blocks (chunks) with support for recursive decomposition into progressively finer child elements that inherit the parent topology. Each final element may be assigned distinct physical and mechanical properties, enabling representation of the stress-strain state of the coal-rock mass. A prototype implementation was developed in the Unity 3D engine. Synthetic experiments demonstrate the practicability of constructing a three-dimensional graphical model comparable in extent and scale to an actual mining lease while operating under limited hardware resources. The findings suggest that the proposed discretization method is suitable for subsequent modeling and simulation tasks.

Keywords: rock mass, GIS, mining, geoinformatics, 3D image generation algorithms

For citation:

Burmin L. N. (2026). 3D visualization method of a mining lease based on a discrete voxel model for analysis of spatial processes. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 75–83. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

Введение

Среди актуальных направлений исследований Земли [1–3] в области геодезии, геоинформатики и картографии особое внимание уделяется проблемам визуализации результатов моделирования участков горного производства. Кроме того, в современных работах отмечается растущая роль цифровых технологий и виртуальной реальности при подготовке персонала и анализе горных процессов [4, 5]. Теоретические и методические аспекты представления геопространственных данных имеют важное прикладное значение в горном деле, особенно при моделировании различных стадий разработки месторождений. Задача построения трехмерной модели пространства горного отвода обусловлена необходимостью проведения имитационного моделирования для определения вероятности риска обрушения горной породы в области подземных очистных выработок. Авторы разных научных работ [6, 7] отмечают, что исследование динамических процессов разрушения горных пород с использованием геоин-

формационных технологий позволит более достоверно получать результаты прогнозирования опасных участков, что поможет скорректировать план эвакуации работников или изменения технологии процесса выемки угля для предотвращения аварийных ситуаций.

Другой задачей является моделирование геофизических данных [8, 9] и способа хранения трехмерных объектов с учетом анализа их пространственных свойств как в статическом состоянии, так и в динамическом, а также существующих в этой области математических и компьютерных методов [8]. Разработка схемы месторождения полезных ископаемых в трехмерном пространстве позволит предприятиям повысить рациональное использование природных ресурсов, технических средств, горного оборудования и т. п., что позволит формировать комплекс управленческих решений для проведения мероприятий в области обеспечения безопасности ведения горных работ.

Ряд исследований в области 3D-моделирования подтверждает эффективность компьютерных систем визуализации для анализа состояния массива [10]. Для наглядного пред-

ставления процессов выемки угля развиваются программные продукты 3D-моделирования, разрабатываются новые технологии в предметной области, которые позволяют повысить качество моделирования [1]. Прогресс развития системы моделирования в разных отраслях горной промышленности приводит к потребности описания структуры взаимодействия различных объектов горного предприятия для проектирования горнотехнических систем. Сложность проектирования горных выработок заключается в их пространственном расположении: очистные выработки должны находиться вдоль линии простирания пласта. Поэтому одним из важных этапов в оценке состояния горного массива является трехмерная модель полезных ископаемых.

Среди основных проблем, которые многие авторы современных исследований оставляют без внимания, можно выделить такие, как построение визуальной модели объектов больших масштабов с достаточным уровнем визуализации детализации, недостаточная эргономика и удобство управления трехмерными компьютерными моделями, недостаточно универсальный способ хранения и манипулирования данными, полученными в результате моделирования. Существует гипотеза, что в итоговом результате эргономичность работы может быть значительно повышена за счет предоставления реализации возможности интерактивной работы с любой частью модели горного массива, в том числе посредством построения среза по любой плоскости и декомпозиции локальной области горного массива на составные элементы для детального анализа свойств смещения и напряжения.

Методы и материалы

Целью данного исследования является определение рационального способа построения модели горного отвода шахты с применением современных технологий визуализации для декомпозиции локальных областей напряженно-деформированного состояния угленосного массива. Поскольку породный массив имеет неоднородную структуру и включает как зоны подземных выработок, так и отрабо-

танные борты, то необходимо учитывать неравномерное распределение тектонических сил путем расчета вертикальных и горизонтальных смещений и напряжений в окрестности ведения горных работ. Это позволит рассматривать горный отвод как единую горнотехническую систему с учетом положения горных выработок и применяемого оборудования.

Для этого необходимо решить ряд задач: определить алгоритм построения трехмерной поверхности; разработать структуру данных для хранения сведений об объекте моделирования; выбрать подходящий инструментарий визуализации. Основным объектом исследования является напряженно-деформированное состояние массива в близости горных выработок.

В качестве исходных данных выступают имитационные данные о разведочных скважинах, включающие координаты на поверхности земли, глубину, виды породы на разной глубине залегания, замеры мощности залегания и идентификатор каждой скважины. У каждой породы в свою очередь определены геомеханические свойства, которые необходимы для расчета напряженно-деформированного состояния в горном массиве. По этим данным требуется построить цифровую модель горного массива и визуализировать ее в виде трехмерного компьютерного изображения.

Определение алгоритма визуализации. Существует несколько алгоритмов построения 3D-моделей с использованием средств компьютерной графики: *marching cubes*, *dual contouring*, *marching tetrahedra*, *surface nets* [11–13]. Рассмотрим перечисленные технологии.

Алгоритм *marching cubes* [11] прост в реализации, однако у него есть ряд недостатков: избыточное количество операций, потенциальная возможность дефектов в модели, невозможность создавать резкие перепады в изоповерхности.

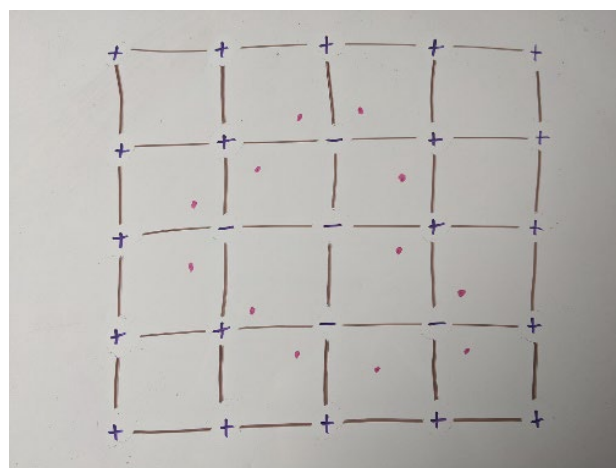
Dual contouring некоторым образом позволяет преодолеть эти проблемы и более удобен с точки зрения потенциального масштабирования модели [13]. Недостаток алгоритма *dual contouring*, по сравнению с *marching cubes*, состоит в том, что вычислить ячейки отдельно не представляется возможным. Для соедине-

ния точек и нахождения конечной гипсометрии обязательно нужно просмотреть соседние ячейки. Тем не менее с точки зрения реализации это более простой алгоритм, чем шагающие кубы.

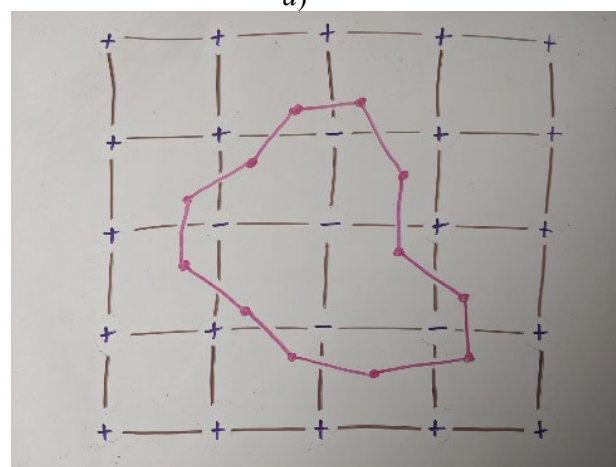
Marching tetrahedra (марширующие тетраэдры) имеют девятнадцать пересечений граней на куб, в то время как для шагающих кубов нужно всего двенадцать. Однако одно из этих пересечений не получится использовать вместе с соседним кубом, который стоит на главной диагонали. Если такое пересечение использовать совместно на гранях куба, то это усложняет реализацию алгоритма и потребует больше оперативной памяти во время выполнения. С другой стороны, дополнительные пересечения дают немного лучшее разрешение выборки.

Surface nets – алгоритм, использующий сетку вершин. Он применяет к вершинам определенный алгоритм сглаживания [12]. Это позволяет осуществлять построение трехмерной визуальной модели горного массива без применения дополнительных методов интерполяции. В процессе сглаживания крайне важно учитывать, чтобы вершина не покидала границ своего вокселя (трехмерного пикселя, в нашем случае – куба). Для данного алгоритма нужно представить сетку кубов в виде развертки, в которой будет осуществляться визуализация с учетом того, что каждый воксель в действительности является не кубом, а точкой в трехмерном пространстве.

Каждый воксель хранит в себе значение функции расстояния со знаком в углу сетки. Для каждого куба в сетке нужно определить, где возможно найти точку изоповерхности, если она принципиально существует. Далее нужно изучить 8 углов куба. Если в них есть сочетание разных знаков, то в этой области есть точка поверхности (рис 1, а). Точно так же можно рассматривать 12 ребер куба. Если ребро соединяет две точки (вокселя) с разными знаками, то на ребре должна быть какая-то точка поверхности, т. е. этот край пересекает поверхность. Затем просматриваются все такие ребра в кубе и усредняются их точки пересечения поверхностей (рис 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Визуализация алгоритма (знаки – это воксели по углам кубов):

- а) точки означают точки на поверхности;
б) сегмент линий образуют поверхность

Создание структуры данных. Цель итоговой работы заключается в построении среза по любой плоскости и декомпозиции части массива на отдельные элементы для моделирования изменения их свойств. Для решения требуется определить, каким образом будут описаны данные для наиболее комфортного оперирования в программном коде. Следует рассмотреть несколько альтернативных подходов.

Первый метод – массив плоскостей породных слоев. Представляет собой набор точек, где каждая точка содержит следующую информацию: координаты относительно поверхности (x, z); начальная высота (y_0); конечная высота (y_1); материал наполнения данного слоя (рис. 2).

Второй – трехмерное воксельное пространство (неограниченное трехмерное координированное пространство, где каждая точка является независимой трехмерной дискретой – вокселем). Воксель содержит следу-

ющие данные: координаты в пространстве (x , y , z); материал (наполнение данной точки). Общим свойством для данных подходов будет зависимость точности от размера минимального сегмента.

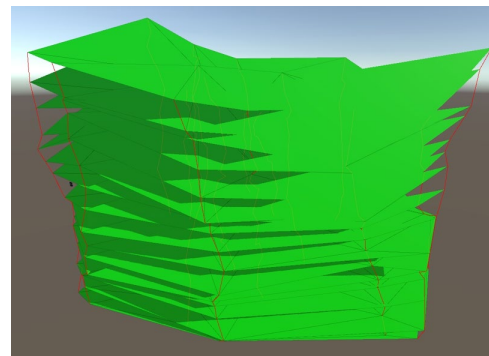
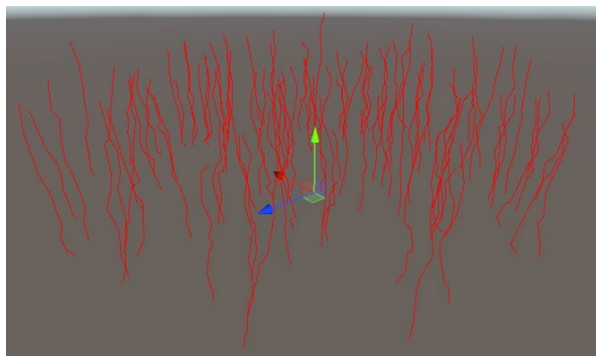


Рис. 2. Визуализация плоскостей породных слоев

Поскольку необходимо совершать моделирование свойств отдельных частей горного отвода, то для представления данных крайне важно иметь возможность отделить некоторые сегменты данных для их более подробного исследования. С этой точки зрения наиболее оптимальной структурой данных целесообразнее выбрать трехмерное воксельное пространство, расширив эту структуру разбиением на отдельные сегменты пространства – чанки.

Каждый чанк содержит в себе 4 096 вокселей, которые составляют трехмерный куб с размерами $16 \times 16 \times 16$. Затем данные сегменты пространства группируются в секции по 64 элемента, которые также представляют собой куб, но с размерами $4 \times 4 \times 4$. Далее эти сегменты будут именоваться как килочанк (262 144 отдельных вокселей), мегачанк (16 777 216 отдельных вокселей) и гигаханк (1 073 741 824 отдельных вокселей) соответственно. Поскольку создание меша является достаточно затратной операцией, то формирование итоговых мешей, которые будут непосредственно отрисовываться движком, планируется осуществлять на уровне килочанков.

Выбор инструментария для реализации. Для визуализации моделей горных отводов было принято решение использовать одну из трехмерных сред динамической визуализации как основу, содержащую необходимые

средства по работе с графикой, интерфейсом и пользовательским вводом. Также было необходимо учесть особенности требований к аппаратной части.

Из рассмотренных платформ в качестве основных кандидатов сопоставлялись Unity и Unigine. Обе платформы обладают высоким уровнем оптимизации и гибкости. Преимущество Unity заключается в более обширном сообществе, высокой производительностью рендера графики в стандартной конфигурации, а также широком выборе итоговых операционных систем для компиляции программного обеспечения, включая мобильные устройства [14–16].

Основой архитектуры была выбрана модульная структура. Это позволит испытать различные способы построения итоговой визуализации и обработки входных данных, не внося критических изменений в архитектурное ядро программной реализации.

Платформа Unity изначально предлагает разработчику компонентную структуру объектов: итоговое приложение состоит из сцен, которые содержат в себе пользовательский интерфейс, различную логику и динамическое содержание. Объекты сцены, также известные как GameObject, представляют собой иерархическую структуру в виде дерева, где каждый элемент может иметь множество раз-

личных компонентов, определяющих его логику взаимодействия.

Результаты

В качестве наиболее рационального алгоритма для задачи визуализации горного отвода был выбран алгоритм surface nets. Основным аргументом при его выборе является оптимальный баланс между результирующим числом вершин и точностью описываемой поверхности на крупном горизонте моделирования. На горизонте исследования в несколько километров моделируемой области алгоритмы marching cubes и marching tetrahedra оказываются слишком требовательными к аппаратным ресурсам относительно времени вычисления. С учетом особенностей выбранного метода трехмерного воксельного пространства при реализации было принято несколько решений. Во-первых, отделить меши Unity от всех операций создания и редактирования, ограничив взаимодействие только непосредственным созданием базового экземпляра и установкой его вершин и треугольников при соответствующих операциях. Во-вторых, использовать структуру данных, позволяющую иметь минимальное число объектов сцены.

Для проверки выбранных решений была разработана минимальная работоспособная программная реализация алгоритма surface nets. Экспериментальные исследования проводились на имитационных данных, моделирующих информацию о разведочных скважинах, что является распространенным подходом на ранних этапах разработки и валидации алгоритмов. В результате было получено, что построение модели для объема данных размером $32 \times 32 \times 32$ чанка занимает около 7,5 минут и требует около 2,7 ГБ оперативной памяти. Проседание частоты кадров в режиме реального времени при использовании данных такого типа не превышает 3 кадров в секунду. Дополнительно были проведены эксперименты на мобильных платформах с целью предварительной оценки работоспособности алгоритма в условиях ограниченных аппаратных ресурсов. Результаты показали, что при использовании синтетических данных алгоритм демонстрирует стабильную ра-

боту и приемлемые показатели производительности даже на маломощных мобильных устройствах. Вместе с тем следует отметить, что полученные результаты относятся к идеализированному набору данных и не учитывают возможную неоднородность, зашумленность и масштаб реальных полевых геофизических данных. Потенциал повышения производительности алгоритма в дальнейшем связан с возможностью его масштабирования за счет применения многопоточной обработки и оптимизаций, ориентированных на работу с большими объемами реальных данных.

На рис. 3 представлена визуализация результирующей дискретной модели, отражающая структуру воксельного пространства и сформированную изоповерхность горного массива. Изображение иллюстрирует принцип организации данных и характер получаемой геометрии.

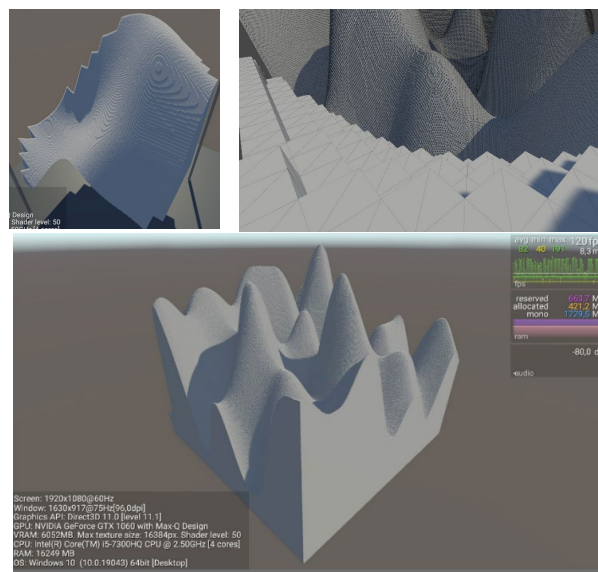


Рис. 3. Пример визуализации дискретной воксельной модели горного отвода, сформированной с использованием алгоритма surface nets

При подобном подходе, когда модельные данные дополняются визуализацией, появляется возможность в «покадровом» отслеживании процесса изменения напряжения и смещения при ведении горных работ. Построенная в результате модельная поверхность поз-

воляет локализовать области обрушения или частичного проседания горной породы путем наложения условной плоскости для построения сечений по пороговому значению напряжения и смещения. Сам процесс визуализации при этом не требователен к аппаратным ресурсам, если область моделирования не выходит за пределы одного кубического километра горного отвода.

Обсуждение

Стоит отметить, что у описанного решения существует ряд недостатков, требующий некоторых улучшений в будущем исследовании. Алгоритм визуализации и архитектурная структура данных, описанная в статье, может быть адаптирована под различные особенности конкретного горного отвода, однако инструмент реализации имеет ряд значительных ограничений, о которых следует упомянуть. Логика взаимодействия компонентов, необходимых для выполнения, постоянно зависит от глобальных контроллеров, отслеживающих события API Unity. Как правило, наиболее часто вызываются `FixedUpdate` и `Update`. При этом нужно помнить, что создание и удаление `GameObject` сами по себе затратные операции, очень неэффективные по памяти и времени [15]. Также необходимо учитывать то, что API данного движка не является потокобезопасным [15]. Следовательно, крайне важно проработать корректный алгоритм работы и синхронизации действий между потоками. Эти свойства приводят к следующим выводам: нужно избегать множественного создания объектов сцены в одном кадре; следить, что число объектов сцены находится в допустимых пределах; крайне важно, чтобы операции внутри `FixedUpdate()` и `Update()` укладывались во временные рамки.

Зная особенности платформы, стоит установить следующие ограничения реализации: все дорогостоящие действия должны иметь минимальное число зависимостей от Unity API; необходимо минимизировать вызовы стандартного API для работы с мешами, используя собственные промежуточные структуры данных; итоговая реализация должна уметь масштабировать рабочие потоки.

Также стоит отметить, что полученные результаты целесообразно проверить на реальных данных либо на имитационных моделях, значительно приближенных к действительно существующим объектам, чтобы полноценно убедиться в приемлемой эффективности выбранных решений.

Заключение

В результате исследования был проведен сравнительный анализ алгоритмов трехмерной визуализации, в процессе которого в качестве наиболее рационального был выбран `surface nets`. Предложена структура данных для программной реализации алгоритма и выбран наиболее гибкий в контексте задачи инструмент реализации – платформа Unity. Полученные в результате исследования инструменты визуализации позволят повысить удобство работы с данными о напряженно-деформированном состоянии модели углепородного массива. Методы визуализации позволят наглядным образом выявлять области смещения и напряжения для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Предлагаемый способ моделирования может быть использован в системах поддержки принятия решений при планировании и анализе горных работ, в том числе для визуального анализа состояния горного массива, оценки зон повышенного риска и подготовки инженерно-технических решений. Кроме того, разработанный подход может применяться в учебно-тренировочных и имитационных системах, а также в составе геоинформационных систем горных предприятий.

В будущем планируется использовать полученную программную реализацию для построения произвольных сечений и разметки локальной области горного отвода с указанием свойств конкретных конечных элементов. Это в перспективе позволит моделировать и визуализировать динамические процессы обрушения горной породы в подземной очистной горной выработке для обеспечения дополнительных мер безопасности в процессе добычи полезного ископаемого.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Burmin L. N., Stepanov Yu. A., Marchenko V. A. Computer visualization and zoning parameters of technogenic impact on the environment. *Scientific Visualization*. 2017. Vol. 9. No. 1. С. 137–145.
2. Новиков А. В., Паневников К. В., Писарев И. В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт: визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера. *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 65–69.
3. Артамонов Е. Б., Головач Ю. Ю., Остапенко В. А. Модификация принципов визуализации контента в информационных системах. *Magyar Tudományos Journal*. 2020. № 47. С. 50–52.
4. Гендлер С. Г., Гришина А. М. Обоснование риск-ориентированного подхода к совершенствованию системы обучения подземного персонала угольных шахт нормам и правилам техники безопасности. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2018. № 4. С. 24–33.
5. Бартош В. С. Виртуальная реальность: новые методы подготовки личного состава МЧС. ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. С. 204–209.
6. Шек В. М., Соболева М. Ю. Использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. № 10. С. 201–205.
7. Киршина Е. В., Колокольникова А. И. Геоинформационные системы и промышленная безопасность угольных предприятий. *Безопасность жизнедеятельности предприятий*. Кемерово : КузГТУ, 2017. С. 404.
8. Ногин С. А., Усанов С. В. Моделирование системы «Горные выработки – крепь – вмещающие породы» в программной среде визуализации. *Проблемы недропользования*. 2021. № 1 (28). С. 42–49.
9. Цивилева А. Е. Развитие производственно-технологического потенциала предприятий угольной промышленности на основе внедрения цифровых технологий. *Научный вестник ОПК России*. 2022. № 1. С. 56–63.
10. Скворцов А. В., Мирза Н. С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. – Томск : Изд-во Томского университета, 2006. 168 с.
11. Lorensen W. E., Cline H. E. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, № 4. P. 163–169.
12. Hansen C. D., Johnson C. R. *Visualization Handbook*. Academic Press, 2004. P. 7–11.
13. Raposo A. N., Gomes A. J. P. Pi-surfaces: products of implicit surfaces towards constructive composition of 3D objects. *Journal of WSCG*. 2019. arXiv:1906.06751.
14. Карелова Р. А., Коробейников П. С. Контроль над проектом на Unity: частые проблемы начинающих разработчиков и пути их решения. *МНИЖ*. 2020. № 5-1 (95). С. 47–50.
15. Трохова Т. А. Компьютерное моделирование динамических объектов с использованием среды разработки компьютерных игр Unity. *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. № 1 (18). С. 74–80.
16. Цветков В. Я., Мордвинов В. А., Матчин В. Т. Технология генерации виртуальных ландшафтов с применением метода вокселизации и волюметрических данных. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2023. № 1 (42). С. 91–99.

REFERENCES

1. Burmin, L. N., Stepanov, Yu. A., & Marchenko, V. A. (2017). *Computer visualization and zoning parameters of technogenic impact on the environment. Scientific Visualization*, 9(1), 137–145.
2. Novikov, A. V., Panevnikov, K. V., & Pisarev, I. V. (2021). *Multifunctional safety system of coal mines: Visualization of events (mining processes) from the miner's workplace. Gornaya Promyshlennost' [Mining Industry]*, (5). 65–69 [in Russian].
3. Artamonov, E. B., Golovach, Yu. Yu., & Ostapenko, V. A. (2020). *Modification of visualization principles of content in information systems. Magyar Tudományos Journal*, (47). 50–52.
4. Gendler, S. G., & Grishina, A. M. (2018). *Substantiation of a risk-oriented approach to improving the training system of underground coal mine personnel in safety rules. Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle [Tula State University News. Earth Sciences]*. (4). 24–33 [in Russian].

5. Bartosh, V. S. (2010). *Virtual reality: New methods of training the personnel of the Ministry of Emergency Situations Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, Vol. 1, No. 3. 204–209 [in Russian].
6. Shek, V. M., & Soboleva, M. Yu. (2005). *Use of simulation modeling to optimize mining operations. Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten' [Mining information and analytical bulletin]*, (10), 201–205 [in Russian].
7. Kirshina, E. V., & Kolokolnikova, A. I. (2017). *Geoinformation systems and industrial safety of coal enterprises. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy [Safety of Industrial Enterprises in Industrially Developed Regions]* (pp. 404). Kemerovo: Kuzbass State Technical University [in Russian].
8. Nogin, S. A., & Usanov, S. V. (2021). *Modeling of the “Mine Workings – Support – Surrounding Rocks” system in a visualization software environment. Problemy Nedropol'zovaniya [Problems of subsoil use.]*, 1(28). 42–49 [in Russian].
9. Tsvileva, A. E. (2022). *Development of the production and technological potential of coal industry enterprises through the introduction of digital technologies. Nauchnyy Vestnik OPK Rossii [Scientific Bulletin of the Defense Industrial Complex of Russia]*, (1). 56–63 [in Russian].
10. Skvortsov, A. V., & Mirza, N. S. (2006). *Algorithms for constructing and analyzing triangulation [Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsii]*. Tomsk: Tomsk University Press. 168 [in Russian].
11. Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). *Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics*, 21(4), 163–169.
12. Hansen, C. D., & Johnson, C. R. (2004). *Visualization Handbook*. San Diego: Academic Press. 7–11.
13. Raposo, A. N., & Gomes, A. J. P. (2019). *Pi-surfaces: Products of implicit surfaces towards constructive composition of 3D objects. Journal of WSCG*. arXiv:1906.06751.
14. Karelova, R. A., & Korobeynikov, P. S. (2020). *Project control in Unity: Common problems of novice developers and ways to solve them. MNIZH [MNIZH]*, 5-1(95). 47–50 [in Russian].
15. Trokhova, T. A. (2018). *Computer modeling of dynamic objects using a game development environment Unity. Agrotehnika i Energoobespechenie [Agrotechnics and Energy Supply.]*, 1(18). 74–80 [in Russian].
16. Tsvetkov V. Ya., Mordvinov V. A., Matchin V. T. (2023). *Technology for Generating Virtual Landscapes Using the Voxelization Method and Volumetric Data. Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii. [Educational Resources and Technologies]*. No. 1 (42). 91–99 [in Russian].

Об авторе

Леонид Николаевич Бурмин – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых технологий.

Author details

Leonid N. Burmin – PhD, Associate Professor, Department of Digital Technologies.

Получено / Received 13.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.12.2025

Принята к публикации / Accepted 22.04.2026