

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ

В.Н. Гусев, А.А. Филиппов,

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Приведены результаты анализа существующих методик для классификации маркшейдерско-геодезических данных, в частности данных лазерного сканирования. В настоящее время применяются различные программные решения для моделирования объектов подземной разработки, карьеров, а также объектов нефтедобычи. Существуют алгоритмы для решения конкретных задач, связанных с этапами моделирования, однако большинство из них создаются как универсальные инструменты. Проведена оценка существующих программных алгоритмов для решения задачи классификации. В условиях горной промышленности адаптация существующих алгоритмов позволила бы значительно ускорить и упростить процессы актуализации маркшейдерско-геодезической информации, что в свою очередь косвенно повлияет на скорость и качество отработки месторождения в целом. Результаты исследований могут быть полезны при работе с данными лазерного сканирования и выбора оптимальных решений.

Ключевые слова: программные решения для моделирования, адаптация алгоритмов для маркшейдерских съемок, маркшейдерско-геодезические измерения.

Для цитирования: Гусев В.Н., Филиппов А.А. Оптимизация процесса классификации данных лазерного сканирования для преодоления избыточности // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 1. С. 80-89. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_80_89.

OPTIMIZING THE DATA CLASSIFICATION PROCESS IN LASER SCANNING TO OVERCOME REDUNDANCY

V.N. Gusev, A.A. Filippov,

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia

Abstract: The article presents the results of analyzing existing methodologies for classifying mine surveying and geodetic data, particularly laser scanning data. Various software solutions are currently employed for modeling underground development, quarries, and oil extraction facilities. While there are algorithms designed to address specific tasks related to modeling stages, the majority of them are created as versatile tools. An evaluation of existing software algorithms for classification tasks has been conducted. In the mining industry, adapting these algorithms would significantly expedite and simplify the processes of updating mine surveying and geodetic information, indirectly impacting the overall speed and quality of deposit development. The research findings can be valuable for working with laser scanning data and selecting optimal solutions.

Keywords: software solutions for modeling, adaptation of algorithms for surveying surveys, surveying and geodetic measurements.

For citation: Gusev V.N., Filippov A.A. Optimizing the data classification process in laser scanning to overcome redundancy. Surveying and subsoil use. 2024;1:80-89.(In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_1_80_89.

Аппаратно-программный комплекс для производства маркшейдерско-геодезических работ на сегодняшний день представлен перечнем из беспилотных летательных аппаратов (БЛА), лазерно-сканирующих систем (ЛСС), спутниковых систем для производства методов дистанционного зондирования, а также электронными нивелирами, тахеометрами и ГНСС оборудованием. Все они предоставляют данные измерений в электронном виде с целью дальнейшей обработки на ЭВМ.

Предоставляемые данные из современного маркшейдерско-геодезического оборудования имеют в себе большое количество информации для решения любого рода задач за счет своей избыточности, как в случае с результатами ла-

зерного сканирования или же данными со снимков дистанционного зондирования.

С точки зрения точности и потенциала решаемых задач данный факт можно расценивать как положительный. Однако для обработки и использования всей получаемой информации с современных аппаратных комплексов специалисту необходимы инструменты и программные решения для использования всего спектра данных.

Развитие программного обеспечения для анализа, интерпретации и обработки данных маркшейдерско-геодезических измерений на данный момент является наиболее актуальным направлением, поскольку дает возможность для получения новой более детализированной информации

об объекте съемки. Алгоритмы, встроенные в программное обеспечение, открывают новые возможности для применения уже имеющихся данных маркшейдерских съемок.

Несмотря на наличие программных алгоритмов для обработки и интерпретации данных маркшейдерских съемок, существует проблема качества самих данных. Одним из решений может стать развитие съемочных систем и оборудования, но нельзя исключать природные факторы, такие как тени, пыль, засветы на снимках и т. д. Как пример, для специалиста не составит труда определить контур трещины на стене подрабатываемого здания даже при наличии теней и других различных факторов. Однако не исключается и человеческий фактор ошибки, в результате которого могут быть приняты неверные производственные решения [1]. Алгоритмы, разработанные на основе нейронных сетей, позволяют производить обработку исходной информации с ЛСС с наибольшей эффективностью за счет способности к самообучению. Такие алгоритмы способны не только первично обрабатывать информацию, но и определять различные объекты и зоны воздействия в зависимости от предоставляемых данных [2].

Что касается горной промышленности, область программирования нуждается в развитии, поскольку спектр инструментов для наблюдения за состоянием объекта горных работ и контроля сопутствующих процессов производства постоянно растет и развивается [3-5]. На сегодняшний день большое распространение получили ЛСС, потенциал использования которых можно расширить при помощи программных продуктов и интеграции нейронных сетей [6-8].

По своей сути, имеющиеся данные о месторождениях полезных ископаемых (ПИ) содержат в себе всю необходимую информацию для выявления закономерностей между деятельностью при разработке и состоянием массива, но для их обработки потребуются большие человеческие ресурсы. Инструменты в виде программных алгоритмов и нейронных сетей для структурирования и анализа имеющихся данных позволят оптимизировать изучение закономерностей в массиве. В свою очередь возможности программных алгоритмов для увеличения спектра решаемых задач уже существующими маркшейдерскими приборами также поспособствуют процессу изучения закономерностей между деятельностью человека и состоянием массива.

На сегодняшний день единственным способом для наблюдения за напряженно-деформационным состоянием в массиве при подземной разработке являются наблюдательные станции. Над объектом разработки на начальных этапах создаются системы наблюдательных станций, представляющие собой профильные линии, пересекающие друг друга и покрывающие область, требующую охраны от геомеханических воздействий.

На некоторых месторождениях, где не предусмотрена закладка выработанного пространства, создаются наблюдательные станции в самих выработках, однако эта особенность встречается крайне редко и в горном деле ограничивается поверхностными наблюдениями.

Параметров, влияющих на состояние массива при разработке месторождений, — большое множество [9, 10], за счет чего присутствует неопределенность во взаимоотношении процессов, происходящих в массиве, и результатов этих процессов на поверхности. Факторы, зависящие от системы раз-

работки, этапов состояния горной выработки, начиная от проходки и заканчивая закладкой выработанного пространства или же установкой постоянной крепи, оказывают большое влияние на состояние массива в определенный момент времени, их моделирование способствует выявлению закономерностей [11].

Поскольку существует факт отставания между деформационными процессами в глубине массива и на поверхности, необходимы исследования в данной области [12, 13]. Определение такого параметра позволит выявить закономерность для определения деформаций в любой точке массива в любой момент времени, соотнося их с положением горных работ.

Опыт, накопленный за годы разработки большого числа подземных рудников, позволяет структурировать данные и найти новые закономерности, однако самым важным является качество данных и их объем с целью дальнейшего анализа и обработки современными алгоритмами.

Алгоритмы и нейронные сети работают по принципу качества предоставляемых данных, чем обширнее и точнее имеющаяся в доступе у нейронной сети информация об объекте изучения, тем эффективнее работа самих алгоритмов [14, 15].

В области маркшейдерского дела необходима не только интеграция систем для анализа существующих данных о мониторинговых наблюдениях на объектах добычи, но и развитие областей получения новых данных о состоянии массива в различных точках.

Большой прорыв производится в области мониторинга и актуализации состояния объектов открытой разработки [16, 17]. Связано это с условиями окружающей среды и возможностью получения большого объема данных из имеющихся средств съемки. Из-за специфики при съемке объектов открытой разработки можно захватывать большие участки для последующего анализа. Также отсутствует ограничение пространства, в связи с чем возможно применение беспилотных летательных аппаратов с методами лазерного сканирования [18], фотограмметрии [19, 20] и дистанционного зондирования [21-23]. При открытой разработке месторождений чаще всего объекты строительства относятся к площадным в отличие от подземных шахт и рудников. Оптимизация и автоматизация съемочных процессов и повышение информативности съемок горных выработок является важной задачей при подземной разработке.

Объекты подземного строительства разрушают горный массив частично, в связи с чем влияние каждой выработки имеет собственное значение на напряженно-деформированное состояние массива в целом. Нужно отметить, что неопределенность в параметрах самого массива играет большую роль, поскольку геологические нарушения оказывают непосредственное влияние на моделирование состояния горных пород, делая его нелинейным [24, 25].

Выявление закономерностей в распределении деформационных процессов в разрабатываемом массиве прямым образом отражается на экономической эффективности рудника. Возникновение аварий на производстве в результате дестабилизации массива горных пород, безопасность персонала, зависящая от предотвращения инцидентов по типу горных ударов, вывалов и т. д., связаны со своевременными мерами по стабилизации состояния массива горных пород.

Прогнозирование и ликвидация подобных инцидентов имеют большое значение и на объектах открытой разработки. Выявление аномалий в деформационных процессах бортов карьера является основой для сохранения работоспособности такого рода объектов.

Развивая системы по сбору информации, а также алгоритмы по её дальнейшей обработке и интерпретации, напрямую можно воздействовать на параметры эффективности и безопасности отработки как подземных, так и открытых объектов добычи.

Материал и методы

Классификация

Процесс разделения объектов или данных на различные категории или классы в соответствии с определенными характеристиками или правилами, называемый классификацией, играет значительную роль в современном мире, поскольку позволяет структурировать и организовать информацию, улучшить эффективность обработки данных, принимать обоснованные решения и автоматизировать процессы в различных областях деятельности.

Классификация играет важную роль в горном деле и может быть применена в таких аспектах отрасли, как:

1. *Геологическое исследование.* Классификация горных пород и минералов является основой геологического исследования. Геологи классифицируют и описывают различные типы пород и минералов для определения их свойств, состава и потенциальной ценности. Это позволяет определить месторождения полезных ископаемых, проводить оценку их запасов и планировать добычу.

2. *Разработка горных работ.* Классификация горных пород и условий разработки является важной задачей при проектировании и планировании горных работ. Она помогает инженерам и горнякам понять характеристики горной массы, определить оптимальные методы добычи и оценить риски, связанные с геотехнической стабильностью и безопасностью работ.

3. *Обработка и обогащение руды.* Классификация руды по ее физическим и химическим свойствам играет важную роль в процессе обработки и обогащения. Различные методы классификации применяются для сортировки и разделения руды на различные фракции в зависимости от содержания ценных компонентов. Это позволяет повысить эффективность извлечения полезных ископаемых и оптимизировать процесс обогащения.

Классификация в горном деле имеет большое значение: систематизирует и организует информацию о горных материалах, их свойствах и условиях эксплуатации. Это способствует эффективному планированию и принятию обоснованных решений, оптимизации процессов добычи и обработки ресурсов, а также повышает безопасность и устойчивость горнодобывающих операций.

Однако недостаточная информативность маркшейдерских съемок в подземном руднике или карьере может иметь негативные последствия (и влиять на безопасность и эффективность работы):

1. *Неправильное планирование и проектирование.* Маркшейдерские съемки предоставляют информацию о геометрии и расположении горных выработок, рудных залежей, геологических структур и других факторов, влияющих на разработку и добычу полезных ископаемых. Если съемки

не обладают достаточной информативностью, возможны ошибки в планировании и проектировании горных выработок, что может привести к неправильному выбору методов добычи, недооценке ресурсов или возникновению нежелательных геотехнических проблем.

2. *Увеличение риска аварийных ситуаций.* Маркшейдерские съемки играют важную роль в обеспечении безопасности подземных работ. Недостаточная информативность съемок может привести к неправильной оценке геологических условий, геотехнической стабильности и других факторов, связанных с безопасностью. Это повлечет за собой увеличение риска возникновения оползней, обвалов, затоплений или других аварийных ситуаций, которые могут угрожать жизням и здоровью работников.

3. *Потери ресурсов и времени.* Недостаточная информативность маркшейдерских съемок может привести к потере ресурсов и времени при проведении работ. Кроме того, неправильные или недостаточно точные съемки могут привести к неправильному выбору направления разработки, неэффективному использованию оборудования и перерасходу материалов. Это повлечет за собой дополнительные затраты, задержки в работе и нежелательные перерывы в производстве.

4. *Ограничение возможностей планирования и оптимизации.* Маркшейдерские съемки являются основой для планирования и оптимизации подземных работ. Недостаточная информативность съемок может ограничить возможности анализа и моделирования горных условий, что затруднит принятие обоснованных решений и оптимизацию процессов добычи и разработки.

В целом недостаточная информативность маркшейдерских съемок может привести к ошибкам в планировании, безопасности и эффективности работы подземного рудника или карьера. Точные и достоверные съемки играют ключевую роль в обеспечении безопасности, оптимизации процессов и устойчивого развития горнодобывающей деятельности.

Перспективы внедрения классифицированной модели подземного рудника

Представьте себе, что у нас есть полностью отсканированная модель всего подземного рудника, включая информацию о расположении систем выработок, оборудовании и объектах внутри них. Эта информация предоставляет невероятные возможности для специалистов и горных инженеров для улучшения и оптимизации работы всего предприятия.

Приведем три примера, как эта информация может быть использована:

1. *Виртуальное моделирование и симуляция.* Используя отсканированную модель рудника, специалисты могут создать виртуальные модели и проводить симуляции различных сценариев добычи. Это позволяет проводить виртуальные испытания и анализировать влияние изменений в проектной форме выработок, размещении оборудования и оптимизации процессов на производительность и эффективность работы. Такие симуляции помогут определить оптимальные стратегии разработки и улучшить процессы на предприятии.

2. *Мониторинг и управление оборудованием.* Отсканированная модель рудника может использоваться для мониторинга и управления оборудованием в режиме реального вре-

мени. С помощью сенсоров и IT-технологий специалисты могут отслеживать положение и состояние оборудования, а также предсказывать потенциальные сбои или проблемы. Это позволяет предпринимать превентивные меры, планировать техническое обслуживание и оптимизировать использование оборудования, что приводит к снижению простоев и повышению эффективности работы.

3. *Автоматизация и роботизация.* Отсканированная модель рудника предоставляет информацию о физической среде и препятствиях, с которыми сталкиваются роботы и автоматизированные системы. Это позволяет специалистам разрабатывать и применять инновационные решения в области автоматизации и роботизации в горном деле. Например, автономные роботы могут использоваться для инспекции, обследования и обслуживания выработок, а также для выполнения опасных и рутинных задач. Это повышает безопасность работников, улучшает производительность и снижает затраты на человеческий труд.

Все эти примеры демонстрируют потенциал отсканированной модели подземного рудника для инноваций и оптимизации работы предприятия. Они позволяют специалистам принимать осознанные решения, повышать эффективность и снижать риски, что в итоге приводит к улучшению результатов и устойчивому развитию горнодобывающей отрасли.

Перспективы отказа от внедрения классифицированной модели подземного рудника

Если у горных инженеров и специалистов нет доступа к полностью отсканированной модели рудника, они лишаются ряда возможностей, отсутствие которых может негативно сказываться на работе подземного рудника.

Речь идет о таких моментах, как:

1. *Ограниченная видимость и понимание геологической среды.* Отсутствием достаточной информации о структуре горных пород, геологических разломах, рудных залежах и других важных факторах объясняются затруднения в принятии обоснованных решений по планированию и оптимизации добычи, а также возможные непредвиденные проблемы с геотехнической стабильностью и безопасностью.

2. *Отсутствие возможности проводить виртуальное моделирование и симуляции.* Виртуальное моделирование и симуляции являются мощными инструментами для оптимизации процессов и принятия решений. Без модели рудника специалисты не могут проводить виртуальные испытания различных сценариев добычи, оценивать влияние изменений в дизайне выработок или оптимизации процессов. Это может привести к потере возможностей улучшить производительность, эффективность и безопасность работы.

3. *Ограниченная возможность мониторинга и управления оборудованием.* Отсканированная модель рудника позволяет мониторить и управлять оборудованием в режиме реального времени. Без такой модели специалисты могут столкнуться с ограничениями в отслеживании положения и состояния оборудования, а также в прогнозировании возможных проблем. Это затрудняет планирование технического обслуживания, повышение эффективности и снижение рисков аварийных ситуаций.

4. *Увеличение вероятности ошибок и неэффективности.* Отсутствие подробной модели рудника может привести к большей вероятности ошибок и неэффективности в планировании, проектировании и выполнении работ. Горные ин-

женеры могут не иметь полной информации о расположении систем выработок, препятствиях, объектах внутри выработок и других факторах, которые влияют на работу. Это приводит к неправильному выбору методов добычи, недооценке ресурсов, увеличению затрат и времени на работы.

В целом отсутствие полностью отсканированной модели рудника ограничивает способности горных инженеров и специалистов, что может негативно сказываться на безопасности, эффективности и результативности работы подземного рудника.

Существующие методы обработки данных лазерного сканирования

Маркшейдер является инженерным звеном, предоставляющим актуальную информацию о состоянии объекта производства. Внедрение алгоритмов для повышения точности отображения данных об объекте строительства, интерпретации информации для решения и визуализации тех или иных производственных процессов позволит повысить эффективность внедрения нейронных сетей, а также способствует развитию их точности в принятии решений.

В библиотеках CGAL представлены инструменты для моделирования деформационных процессов (рис. 1). Алгоритмы деформации поверхностной сетки вычисляют новые положения вершин поверхностной сетки при позиционных ограничениях некоторых ее вершин, не требуя какой-либо дополнительной структуры, кроме самой поверхностной сетки [26].

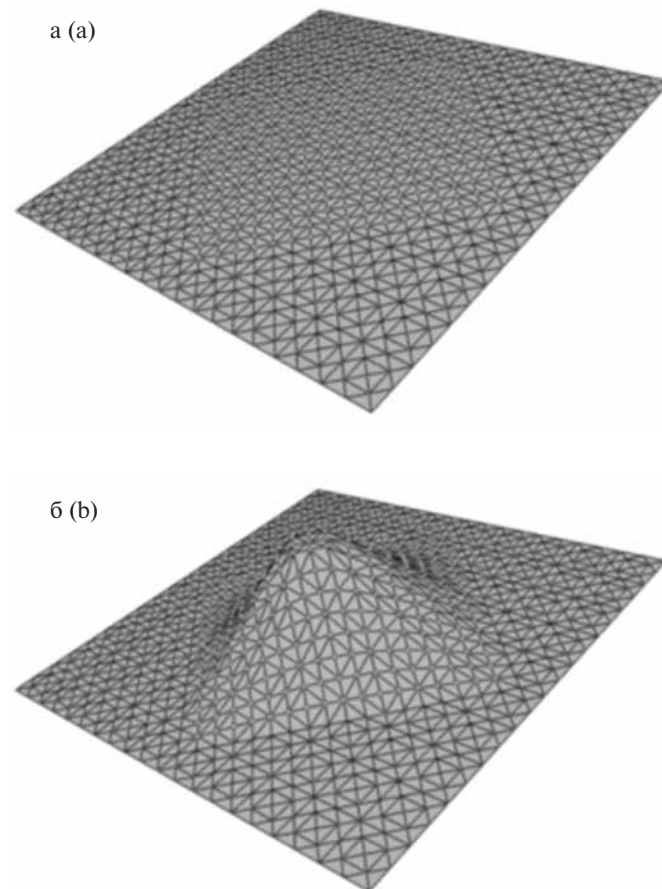


Рис. 1. Деформирование поверхности: а - поверхность; б - деформированная поверхность

Fig.1. Surface deformation: a - surface; b - deformed surface

Алгоритм по созданию каркасов из поверхностей представлен на рисунке 2.

Скелеты — это эффективные абстракции формы, используемые при сегментации, сопоставлении форм, реконструкции, виртуальной навигации и т. д. Алгоритм реализации скелета средней кривизны извлекает скелет кривой из триангулированной поверхностной сетки без границ путем итеративного сжатия входной триангулированной поверхностной сетки [27]. Данный алгоритм как никогда кстати может быть применим к работам, направленным на проверку соблюдения проектных направлений выработок и конфигураций подземных рудников.

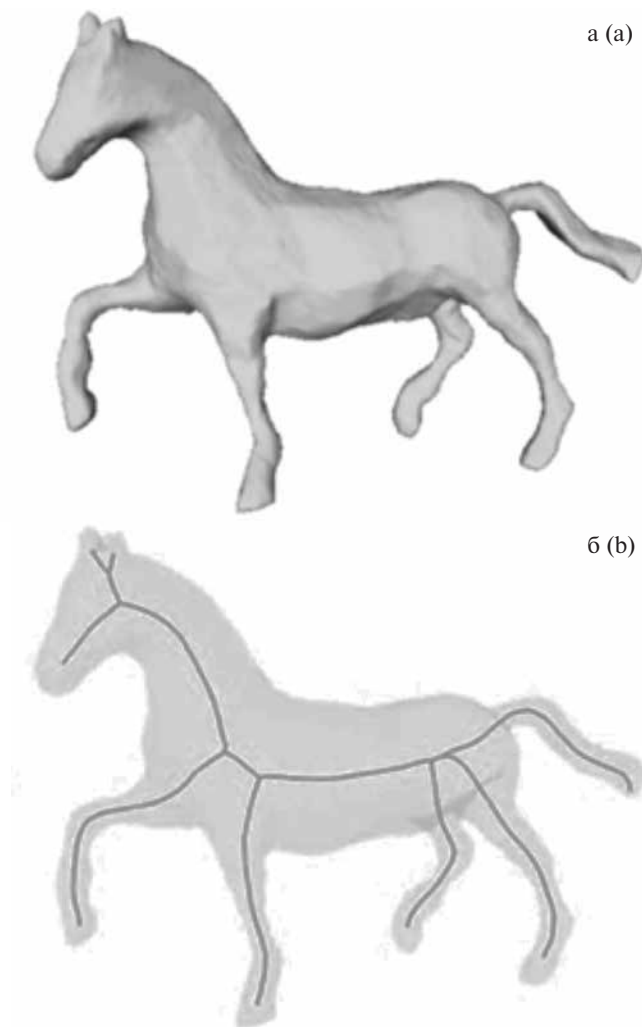


Рис. 2. Создание каркаса: а - поверхность; б - скелет
Fig. 2. Frame construction: a - mesh; b - skeleton

Алгоритмы классификации объектов основаны на вычислении местных особенностей. Эти функции могут использовать преимущества общих структур данных, которые предварительно вычисляются и хранятся отдельно. Как эти функции, так и лежащие в их основе структуры данных зависят от типа данных, которые необходимо классифицировать. CGAL предоставляет структуры данных для классификации наборов точек, сеток поверхностей и кластеров.

Ограничивающие объемы, полученные методом упрощения данных точек до простых объектов, могут быть использованы для получения простых приближений сложных объектов (рис. 3).

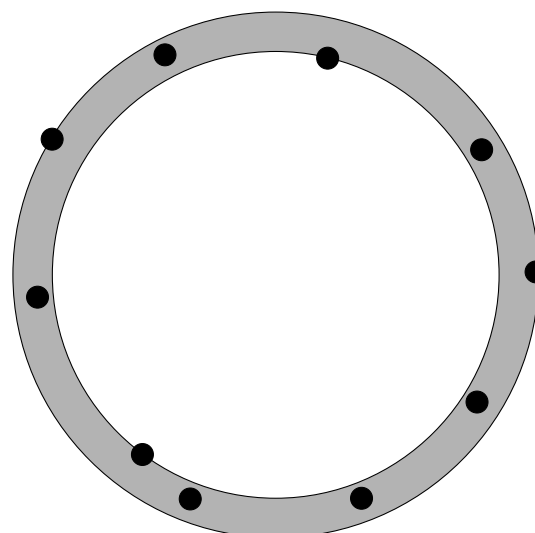


Рис. 3. Использование алгоритма ограничивающих объемов
Fig. 3. Application of bounding volume algorithm

На практике иерархии ограничивающих объемов часто используются поверх простых ограничивающих объемов для более точного приближения сложных объектов. Ограничивающие объемы также часто применяются для извлечения геометрических свойств объектов. Ширина кольцевого объекта является хорошей мерой для этого свойства [28].

Алгоритм суммы Минковского представляет собой анализ движения объекта заданной площади по известной траектории (рис. 4).

Основной особенностью данного алгоритма является определение возможности беспрепятственного движения объекта по заданной траектории. Такой сценарий движения возникает при планировании движения объекта, когда ширина объекта равна проходу, который ему необходимо преодолеть. Для решения данной задачи хотя бы один многогранник (препятствие или объект) должен быть смоделирован как открытое множество, тогда сумма Минковского также будет открытым множеством, а тесные переходы будут возникать как грани, линии или вершины, которые в отличие от окружающего их объема не входят в результирующее множество точек.

Сам объект может быть представлен различными видами, например поверхностью, гранями, вершинами. Все грани объекта должны быть выпуклыми, невыпуклые грани игнорируются алгоритмом. Алгоритм предусматривает операцию скольжения, которая позволяет использовать траекторию движения и тело объекта для построения сложных фигур, вычисления объема. Данная операция применима для определения проходимости различной техники в условиях подземной разработки и строительства [29].

Алгоритм реконструкции поверхности реализует метод реконструкции поверхности, который принимает в качестве входных данных наборы точек с ориентированными нормальными (рис. 5). Входные точки не должны содержать выбросов и незначительного шума. Сетка выходной поверхности генерируется путем извлечения изоповерхности этой функции с помощью генератора сетки поверхности CGAL или, возможно, с помощью любого другого алгоритма конструирования поверхности [30].

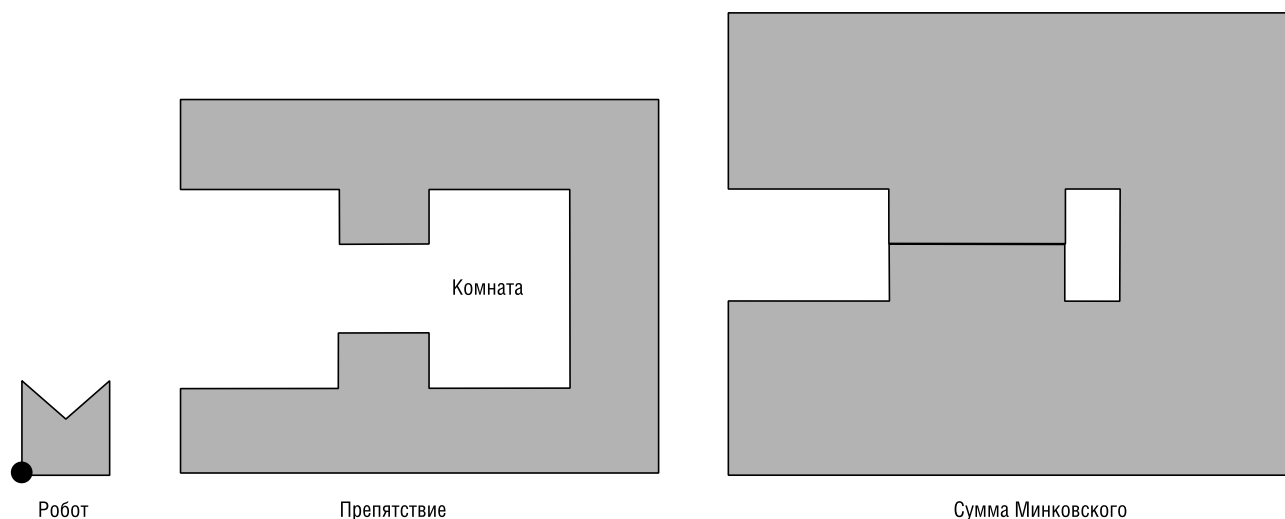


Рис. 4. Принцип работы суммы Минковского: а - начальная фигура; б - результат операции суммы Минковского

Fig. 4. Operation principle of Minkowski Sum: a - initial figure; b - the result of the operation Minkowski Sum

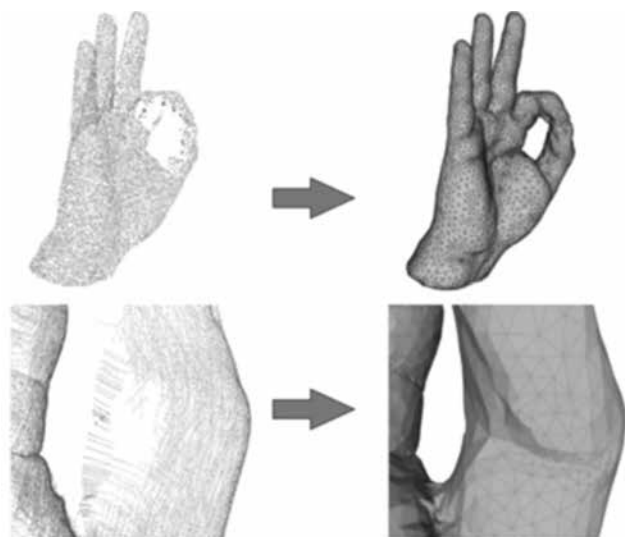


Рис. 5. Реконструкция поверхности: а - набор точек с ориентированными нормальными; б - поверхность, построенная на основе набора точек с ориентированными нормальными

Fig.5. Surface reconstruction: a - a set of points with oriented normals; b - a surface based on a set of points with oriented normals

Алгоритм упрощения поверхностей объектов реализует основанный на гипотезе и выборе метод восстановления кусочно-плоских объектов из облаков точек. Метод принимает в качестве входных данных неупорядоченный набор точек, отобранный из кусочно-плоского объекта. На выходе получается компактная и водонепроницаемая поверхностная сетка, интерполирующая набор входных точек. Метод предполагает, что все необходимые основные плоскости предоставлены или могут быть извлечены из набора входных точек.

Алгоритм, представленный в этом пакете, предназначен для создания упрощенных и водонепроницаемых поверхностных сеток. Он может восстанавливать четкие черты объектов и обрабатывать большое количество шума и выбросов, дополняя другие методы восстановления поверхности.

Алгоритм реконструкции поверхности Делоне использует ранее выбранные треугольники для выбора нового треугольника с целью продвижения фронта.

На каждом шаге продвижения (рис. 6) выбирается наиболее правдоподобный треугольник, причем такой, чтобы выбранные треугольники создавали ориентируемую многообразную триангулированную поверхность [31].

Что касается алгоритма сегментации, сначала применяется мягкая кластеризация к фасетам, используя соответствующие значения SDF. Окончательная сегментация затем получается с помощью алгоритма разрезания графа, учитывающего особенности поверхности вместе с результатом мягкой кластеризации [32].

Этот пакет предлагает вычисление значений SDF и результата сегментации сетки в качестве независимых функций. Это позволяет альтернативную реализацию SDF напрямую подключать к алгоритму сегментации, а также повторно использовать значения SDF несколько раз с различными параметрами для алгоритма сегментации.

Интеграция нейронных сетей доступна и для результатов лазерного сканирования.

Сами точки лазерного сканирования без использования специализированных алгоритмов выявления признаков не являются дескрипторами данных для дальнейшей обработки, так как содержат не увязанные данные по отношению к другим точкам (координаты, интенсивность).

Авторы статьи, используя существующие алгоритмы для выявления признаков у точек лазерного сканирования [33], сумели закодировать информацию для алгоритмов машинного обучения.

Данная информация в дальнейшем была применена для алгоритма «случайный лес», способствующего выявлению болтов анкерной крепи.

Стоит отметить детальную съемку местности, выполняемую маркшейдерским отделом, которая является аналогом представленного выше метода, но имеет в себе ошибку человеческого фактора, а также большой объем временных затрат. Недостатком данного метода является пренебрежение различными нюансами, относящимися к объекту (объектам) съемки, и документирование только ключевых аспектов ситуации. Данный способ съемки исключает избыточность данных, что в дальнейшем препятствует применению нейронных сетей для обучения и выяв-

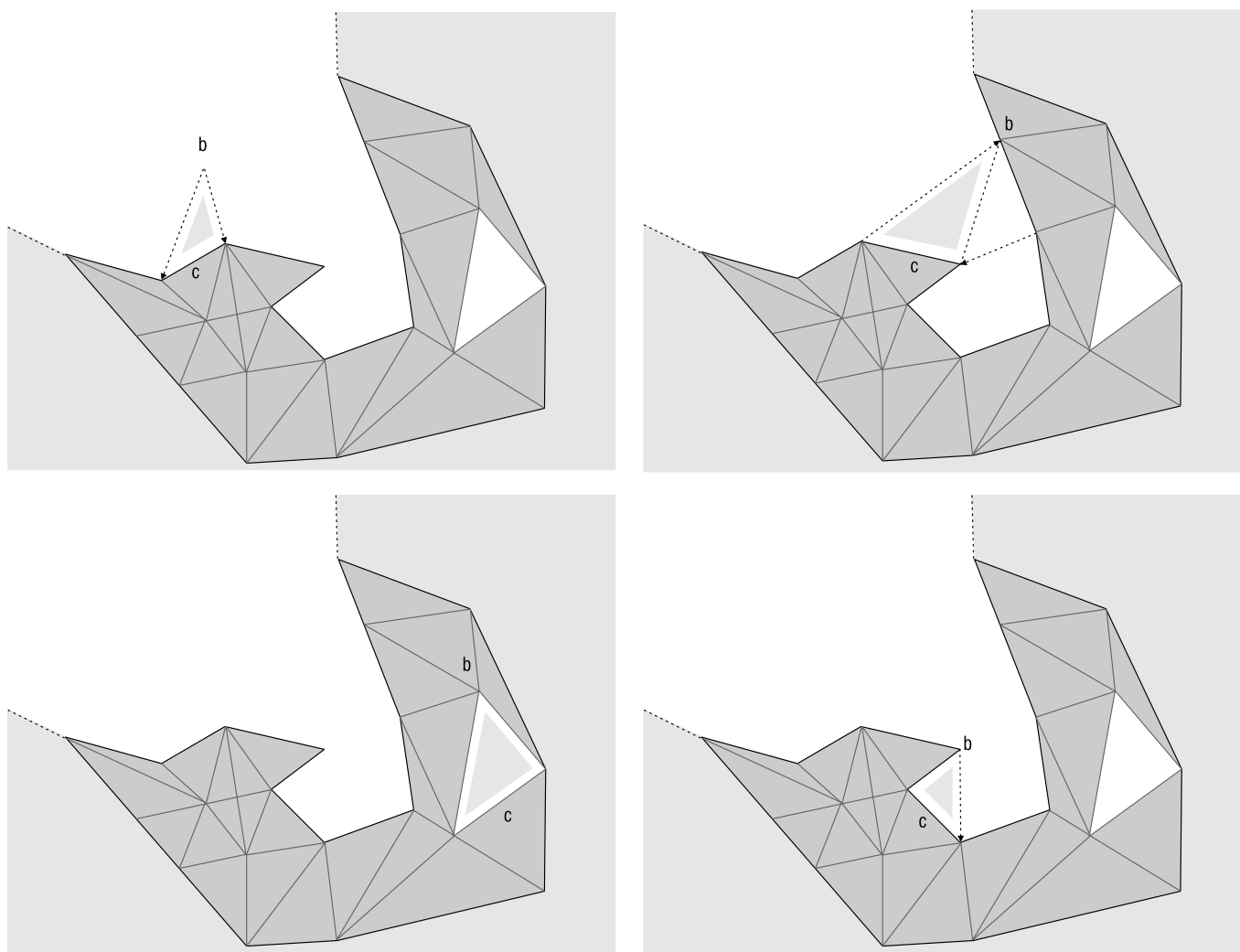


Рис. 6. Возможные варианты реконструкции поверхности
Fig. 6. Surface reconstruction

ления аспектов природных закономерностей в массиве обрабатываемых пород.

Предлагаемые методы обработки данных лазерного сканирования

Необходимо отметить, что в статье описывается метод обработки показателей, представляющих собой саму горную выработку. В условиях решения данной задачи это необходимо, поскольку болты анкерной крепи находятся непосредственно в стенках выработки.

В большинстве своем горная выработка содержит большое количество инфраструктурных объектов, относящихся к областям электрификации, вентиляции и безопасности выработки, а также горные машины и сопутствующее оборудование.

Все эти объекты также имеют важное значение для стабильной работы рудника и горного предприятия в целом. На сегодняшний день в задачи маркшейдерского отдела не входит съемка и какое-либо документирование расположения инфраструктурных объектов. Область маркшейдера ограничена добычей полезных ископаемых и безопасностью объекта горных работ, исключением является область строительства метрополитена.

Как уже говорилось ранее, качество результатов, предоставляемых нейронными сетями и алгоритмами машин-

ного обучения, напрямую зависит от исходных данных и их информативности. Существующие методы представляют собой загрузку всего облака точек без какой-либо предобработки. В связи с этим решением в обучающие данные попадает большое количество информации, не относящейся к интересующим нас объектам классификации, что в целом увеличивает время обучения модели и усложняет процесс.

Заключение

Существующие универсальные алгоритмы для анализа изображений и результатов съемок не адаптированы для объектов горного производства. Уже разработанные наборы алгоритмов частично внедрены в область горного дела, однако объем получаемых данных из результатов маркшейдерских съемок содержит много избыточной информации, которую можно использовать для оптимизации процессов моделирования месторождений и выявления неизученных физических закономерностей.

Адаптация уже существующих алгоритмов из библиотек и интеграция нейронных сетей позволит оптимизировать процессы производства для месторождений открытой и подземной добычи. Выявленные закономерности и разработанные для их выявления методы автоматизированной обработки и интерпретации результатов маркшейдерско-

геодезических съемок и мониторинговых наблюдений помогут не только увеличить эффективность разработки месторождения, но и косвенно повлияют на безопасность объектов разработки.

Существующие примеры интеграции таких алгоритмов в обработку результатов различных съемочных систем требуют дополнительных исследований и уточнений для повышения эффективности разрабатываемых алгоритмов и поиска закономерностей.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований существующих универсальных алгоритмов для анализа изображений и результатов съемок. Уже разработанные наборы алгоритмов частично внедрены в область горного дела, однако объем получаемой информации из результатов маркшейдерских съемок содержит в себе большой объем избыточной информации, которую можно использовать для оптимизации

процессов моделирования месторождений и выявления неизученных физических закономерностей.

2. Установлено, что адаптация уже существующих алгоритмов из библиотек и интеграция нейронных сетей позволит оптимизировать процессы производства для месторождений открытой и подземной добычи. Выявленные закономерности и разработанные для их выявления методы автоматизированной обработки и интерпретации результатов маркшейдерско-геодезических съемок и мониторинговых наблюдений помогут не только увеличить эффективность разработки месторождения, но и косвенно повлияют на безопасность объектов разработки.

3. Результаты исследований могут быть полезными при обработке данных лазерного сканирования и их классифицировании. Выбор оптимальных решений позволит извлечь больший объем полезной информации для дальнейшего анализа и использования данных в производственных процессах. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Li, S. Image-Based Concrete Crack Detection Using Convolutional Neural Network and Exhaustive Search Technique / S. Li, X. Zhao // *Advances in Civil Engineering*. - 2019. - Vol. 2019. - P. 1-10.
2. Evaluating and Predicting the Stability of Roadways in Tunnelling and Underground Space Using Artificial Neural Network-Based Particle Swarm Optimization / X. Zhang, H. Nguyen, X.-N. Bui [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2020. - Vol. 103. - P. 1-15.
3. Kim, H. Self-driving algorithm and location estimation method for small environmental monitoring robot in underground mines / H. Kim, Y. Choi // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. - 2021. - Vol. 127, № 3. - P. 943-964.
4. Выстрчил, М.Г. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна / М. Г. Выстрчил, В. Н. Гусев, А. К. Сухов // *Записки Горного института*. - 2023. - Т. 262. - С. 562-570.
5. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions / M. G. Vystrechil, A. K. Sukhov, S. U. Novozhenin [et al.] // *Journal of Physics Conference Series*. - 2020. - Vol. 1661. - P. 012089.
6. Automatic classification of urban ground elements from mobile laser scanning data / J. Balado, L. Diaz-Vilarino, P. Arias [et al.] // *Automation in Construction*. - 2018. - Vol. 86. - P. 226-239.
7. Bassier, M. Classification of sensor independent point cloud data of building objects using random forests / M. Bassier, B. van Genechten, M. Vergauwen // *Journal of Building Engineering*. - 2019. - Vol. 21. - P. 468-477.
8. Blomley, R. Classification of airborne laser scanning data using geometric multi-scale features and different neighbourhood types / R. Blomley, B. Jutzi, M. Weinmann // *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. - 2016. - Vol. III-3. - P. 169-176.
9. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints / H. N. Wu, S. L. Shen, J. Yang [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2018. - Vol. 78. - P. 168-177.
10. Inventory of Landslides Triggered by Hurricane Matthews in Guantanamo, Cuba. / G. B. Pospehiov, Y. Savon, R. Delgado [et al.] // *Geography, environment, sustainability*. - 2023. - Vol. 16, № 1. - P. 55-63.
11. A prediction model for surface deformation caused by underground mining based on spatio-temporal associations / M. Ren, G. Cheng, W. Zhu [et al.] // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. - 2022. - Vol. 13, № 1. - P. 94-122.
12. Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // *Machine Learning*. - 2001. - Vol. 45. - P. 5-32.
13. Проблема оценки влияния горных работ на объекты наземной инфраструктуры / Е.М. Волохов, В.К. Кожухарова, И.А. Бритвин [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. - 2023. - № 8. - С. 72-93.
14. Neaupane, K.M. Prediction of tunneling-induced ground movement with the multi-layer perceptron / K.M. Neaupane, N.R. Adhikari // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2006. - Vol. 21, № 2. - P. 151-159.
15. Accuracy assessment of mine walls' surface models derived from terrestrial laser scanning / N.Q. Long, M.M. Buczek, L.P. Hien [et al.] // *International Journal of Coal Science and Technology*. - 2018. - Vol. 5, № 3. - P. 328-338.
16. Кузин, А.А. Выделение оползнеопасных территорий на основе методов нейронных сетей / А.А. Кузин // *Записки горного университета*. - 2013. - № 204. - С. 46-51.
17. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В.А. Вальков, К.П. Виноградов, Е.О. Валькова, М.Г. Мустафин // *Геодезия и картография*. - 2022. - № 11. - С. 40-49.
18. A practical methodology for generating high-resolution 3D models of open-pit slopes using UAVs: Flight path planning and optimization / R. Battulwar, G. Winkelmaier, J. Valencia [et al.] // *Remote Sensing*. - 2020. - Vol. 12, № 14. - P. 2283.
19. Weidner, L. Classifying rock slope materials in photogrammetric point clouds using robust color and geometric features / L. Weidner, G. Walton, A. Krajnovich. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. - 2021. - Vol. 176. - P. 15-29.
20. Machine learning-based classification of rock discontinuity trace: SMOTE oversampling integrated with GBT ensemble learning / J. Chen, H. Huang, A. G. Cohn [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. - 2021. - Vol. 32, № 2. - P. 309-322.

21. Airborne/uav multisensor surveys enhance the geological mapping and 3d model of a pseudoskarn deposit in ploumanac'h, french brittany / G. Martelet, E. Gloaguen [et al.] // *Minerals*. - 2021. - Vol. 11, № 11. - P. 1259.
22. Zarychta, R. Progress in the reconstruction of terrain relief before extraction of rock materials-The case of Liban Quarry, Poland / R. Zarychta, A. Zarychta, K. Bzdega // *Remote Sensing*. - 2020. - Vol. 12, № 10. - P. 1548.
23. Continuum analysis of the structurally controlled displacements for large-scale underground caverns in bedded rock masses / A. Li, Y. Liu, F. Dai [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2020. - Vol. 97. - P. 103288.
24. Monitoring, modelling and prediction of segmental lining deformation and ground settlement of an EPB tunnel in different soils / B. Mu, X. Xie, X. Li [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2021. - Vol. 113. - P. 103870.
25. Xing, Y. Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine / Y. Xing, P. H. S. W. Kulatilake, L. A. Sandbak // *Engineering Geology*. - 2018. - Vol. 238. - P. 62-75.
26. CGAL 5.6 - Triangulated Surface Mesh Deformation: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_deformation/index.html.
27. CGAL 5.6 - Triangulated Surface Mesh Skeletonization: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_skeletonization/index.html.
28. CGAL 5.6 - Bounding Volumes: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Bounding_volumes/index.html.
29. CGAL 5.6 - 3D Minkowski Sum of Polyhedra: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Minkowski_sum_3/index.html.
30. CGAL 5.6 - Poisson Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Poisson_surface_reconstruction_3/index.html.
31. CGAL 5.6 - Polygonal Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Polygonal_surface_reconstruction/index.html.
32. CGAL 5.6 - Advancing Front Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Advancing_front_surface_reconstruction/index.html.
33. Gallwey, J. A machine learning approach for the detection of supporting rock bolts from laser scan data in an underground mine / J. Gallwey, M. Eyre, J. Coggan // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2021. - Vol. 107. - P. 103656.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li, S. Image-Based Concrete Crack Detection Using Convolutional Neural Network and Exhaustive Search Technique / S. Li, X. Zhao // *Advances in Civil Engineering*. - 2019. - Vol. 2019. - P. 1-10.
2. Evaluating and Predicting the Stability of Roadways in Tunnelling and Underground Space Using Artificial Neural Network-Based Particle Swarm Optimization / X. Zhang, H. Nguyen, X.-N. Bui [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2020. - Vol. 103. - P. 1-15.
3. Kim, H. Self-driving algorithm and location estimation method for small environmental monitoring robot in underground mines / H. Kim, Y. Choi // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. - 2021. - Vol. 127, № 3. - P. 943-964.
4. Vystrchil MG, Gusev VN, Sukhov AK. Methodology for determining errors of segmented GRID models of open mine workings based on unmanned aerial vehicle aerial photography results // *Notes of the Mining Institute*. 2023;262:562-570. (In Russ.)
5. Vystrchil MG, Sukhov AK, Novozhenin SY. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1661:012089.
6. Automatic classification of urban ground elements from mobile laser scanning data / J. Balado, L. Diaz-Vilarino, P. Arias [et al.] // *Automation in Construction*. - 2018. - Vol. 86. - P. 226-239.
7. Bassier, M. Classification of sensor independent point cloud data of building objects using random forests / M. Bassier, B. van Genechten, M. Vergauwen // *Journal of Building Engineering*. - 2019. - Vol. 21. - P. 468-477.
8. Blomley, R. Classification of airborne laser scanning data using geometric multi-scale features and different neighbourhood types / R. Blomley, B. Jutzi, M. Weinmann // *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. - 2016. - Vol. III-3. - P. 169-176.
9. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints / H. N. Wu, S. L. Shen, J. Yang [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2018. - Vol. 78. - P. 168-177.
10. Inventory of Landslides Triggered by Hurricane Matthews in Guantanamo, Cuba. / G. B. Pospheov, Y. Savon, R. Delgado [et al.] // *Geography, environment, sustainability*. - 2023. - Vol. 16, № 1. - P. 55-63.
11. A prediction model for surface deformation caused by underground mining based on spatio-temporal associations / M. Ren, G. Cheng, W. Zhu [et al.] // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. - 2022. - Vol. 13, № 1. - P. 94-122.
12. Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // *Machine Learning*. - 2001. - Vol. 45. - P. 5-32.
13. Volokhov EM, Kozhukharova VK, Britvin IA et al. The problem of assessing the impact of mining operations on surface infrastructure objects. *Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2023;8:72-93. (In Russ.)
14. Neaupane, K.M. Prediction of tunneling-induced ground movement with the multi-layer perceptron / K.M. Neaupane, N.R. Adhikari // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2006. - Vol. 21, № 2. - P. 151-159.
15. Accuracy assessment of mine walls' surface models derived from terrestrial laser scanning / N.Q. Long, M.M. Buczek, L.P. Hien [et al.] // *International Journal of Coal Science and Technology*. - 2018. - Vol. 5, № 3. - P. 328-338.
16. Kuzin AA. Identification of landslide-prone areas based on neural network methods. *Notes of the Mining University*. 2013;204:46-51. (In Russ.)
17. Valkov VA, Vinogradov KP, Valkova EO et al. Creation of high-informative raster data from laser scanning and aerial photography *Geodesy and Cartography*. 2022;11:40-49. (In Russ.)
18. A practical methodology for generating high-resolution 3D models of open-pit slopes using UAVs: Flight path planning and optimization / R. Battulwar, G. Winkelmaier, J. Valencia [et al.] // *Remote Sensing*. - 2020. - Vol. 12, № 14. - P. 2283.
19. Weidner, L. Classifying rock slope materials in photogrammetric point clouds using robust color and geometric features / L. Weidner, G. Walton, A. Krajnovich. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. - 2021. - Vol. 176. - P. 15-29.
20. Machine learning-based classification of rock discontinuity trace: SMOTE oversampling integrated with GBT ensemble learning / J. Chen, H. Huang, A. G. Cohn [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. - 2021. - Vol. 32, № 2. - P. 309-322.

21. Airborne/uav multisensor surveys enhance the geological mapping and 3d model of a pseudoskarn deposit in ploumanac'h, french brittany / G. Martelet, E. Gloaguen [et al.] // *Minerals*. - 2021. - Vol. 11, № 11. - P. 1259.
22. Zarychta, R. Progress in the reconstruction of terrain relief before extraction of rock materials-The case of Liban Quarry, Poland / R. Zarychta, A. Zarychta, K. Bzdega // *Remote Sensing*. - 2020. - Vol. 12, № 10. - P. 1548.
23. Continuum analysis of the structurally controlled displacements for large-scale underground caverns in bedded rock masses / A. Li, Y. Liu, F. Dai [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2020. - Vol. 97. - P. 103288.
24. Monitoring, modelling and prediction of segmental lining deformation and ground settlement of an EPB tunnel in different soils / B. Mu, X. Xie, X. Li [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2021. - Vol. 113. - P. 103870.
25. Xing, Y. Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine / Y. Xing, P. H. S. W. Kulatilake, L. A. Sandbak // *Engineering Geology*. - 2018. - Vol. 238. - P. 62-75.
26. CGAL 5.6 - Triangulated Surface Mesh Deformation: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_deformation/index.html.
27. CGAL 5.6 - Triangulated Surface Mesh Skeletonization: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_skeletonization/index.html.
28. CGAL 5.6 - Bounding Volumes: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Bounding_volumes/index.html.
29. CGAL 5.6 - 3D Minkowski Sum of Polyhedra: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Minkowski_sum_3/index.html.
30. CGAL 5.6 - Poisson Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Poisson_surface_reconstruction_3/index.html.
31. CGAL 5.6 - Polygonal Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Polygonal_surface_reconstruction/index.html.
32. CGAL 5.6 - Advancing Front Surface Reconstruction: User Manual - URL: https://doc.cgal.org/latest/Advancing_front_surface_reconstruction/index.html.
33. Gallwey, J. A machine learning approach for the detection of supporting rock bolts from laser scan data in an underground mine / J. Gallwey, M. Eyre, J. Coggan // *Tunnelling and Underground Space Technology*. - 2021. - Vol. 107. - P. 103656.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гусев Владимир Николаевич:

доктор технических наук,
заведующий кафедрой Маркшейдерского дела,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: kmd@spmi.ru

Филиппов Антон Александрович:

аспирант,
кафедра маркшейдерского дела,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: antoniofl@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gusev Vladimir Nikolaevich:

Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Surveying,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russia,
e-mail: kmd@spmi.ru

Filipov Anton Alexandrovich:

post-graduate student,
the Department of Surveying,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russia,
e-mail: antoniofl@mail.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе в работу над статьей. / The authors declare an equal contribution to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г. И. НОСОВА

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова – один из крупнейших многопрофильных вузов страны, в котором обучается более девяти тысяч студентов и работает около двух тысяч преподавателей и сотрудников.

Институты, факультеты, кафедры

- Институт металлургии, машиностроения и материаловедения
- Институт горного дела и транспорта
- Институт энергетики и автоматизированных систем
- Институт дополнительного профессионального образования и кадрового инжиниринга МГТУ «Горизонт»
- Проектная школа

Контакты : единый контакт-центр: +7 800 100 1934, e-mail: mgtu@magtu.ru; приемная комиссия: +7 3519 33 09 39, e-mail: priem@magtu.ru




WWW.N-GN.RU