

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНО- СКАНИРУЮЩЕЙ СЪЕМКИ

М. Г. Выстрчил¹, Д. З. Мукминова¹, Т. И. Балтыжакова², Л. А. Рамирес Мелендес¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Vystrchil_MG@pers.spmi.ru

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, e-mail:
tibaltyzhakova@itmo.ru

Аннотация: В работе описан алгоритм расчета деформаций по данным лазерно-сканирующих съемок, выполняемых в рамках маркшейдерского мониторинга подземных горных выработок. Оригинальность предлагаемого способа вычислений заключается в том, что деформации определяются на основании отклонений точек лазерных отражений от проектного положения выработки. Благодаря этому решается проблема полигонизации облака точек, вызванная тем, что модель выработки образует в вертикальном сечении замкнутый контур. Предлагаемый способ основан на вычислении смещений между облаками точек не в исходных пространственных координатах XYZ, а во вводимой при расчете системе координат выработки, что позволяет локализовать каждую из точек относительно ее проектного положения согласно плану горных работ. Облако точек в введенной системе координат при этом представляет собой, независимо от сложности геометрии исходной горной выработки, «развертку», топологически эквивалентную цифровой модели высот рельефа. Указанная топологическая эквивалентность позволяет при дальнейшем анализе использовать методики расчета деформаций, реализованные и апробированные для облаков точек земной поверхности. Разработанный алгоритм была апробирован на результатах лазерно-сканирующей съемки горных выработок, выполненной наземным лазерным сканером Leica BLK-360. Результаты показали эффективность предлагаемого способа вычислений для оценки состояния крепи выработки и позволили локализовать изменения в форме выработки в пределах 1 см.

Ключевые слова: Маркшейдерское дело, деформационный мониторинг, мониторинг крепи, лазерно-сканирующая съемка, обработка данных сканирования, подземные горные выработки.

Для цитирования: Выстрчил М. Г., Мукминова Д. З., Балтыжакова Т. И., Рамирес Л. А. Мелендес. Алгоритм вычисления деформаций подземных горных выработок на основании данных лазерно-сканирующей съемки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11-1. — С. 57–76. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.

Algorithm of deformation assessment for underground mine workings based on laser-scanning survey data

M. G. Vystrchil¹, D. Z. Mukminova¹, T. I. Baltyzhakova², L. A. Ramírez Meléndez¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia,
e-mail: Vystrchil_MG@pers.spmi.ru

² ITMO University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: tibaltyzhakova@itmo.ru

Abstract: Paper presents an algorithm for calculating deformations using laser scanning data acquired during mine survey monitoring of underground mine workings. The novelty of the proposed method lies in determining deformations by measuring deviations of laser-reflected points from their designed positions within the workings. This approach addresses challenges in point cloud polygonization arising as a result of underground mine workings forming closed contours within cross-sections. The method calculates displacements between point clouds not in the original XYZ coordinates, but within a local coordinate system specific to the mine working. This localizes each point relative to its design position defined in the mine plan. Within this local coordinate system, the point cloud—regardless of the original working’s geometric complexity—effectively becomes topologically equivalent to a digital elevation model. This leverages techniques originally developed and tested for terrestrial surface point clouds. The proposed method was validated using laser scanning data from underground mine workings, collected with the Leica BLK-360 laser scanner. Results demonstrated the method’s effectiveness for assessing the condition of mine support systems and enabled the detection of shape changes in the workings to within 1 cm.

Key words: Mine surveying, deformation monitoring, mine working support monitoring, laser scanning, scanning data processing, underground mine workings.

For citation: Vystrčil M. G., Mukminova D. Z., Baltyzhakova T. I., Ramírez L. A. Meléndez. Algorithm of deformation assessment for underground mine workings based on laser-scanning survey data. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):57–76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.

Введение

На всем протяжении развития горного дела вопросы безопасного, рационального и эффективного извлечения недр являлись краеугольными и формировали базис нормативных и методических документов, регламентирующих процесс добычи полезных ископаемых [1]. Каждая из новых технологий, внедряемых в горную отрасль, стремится найти свое место среди методов обеспечения этих задач, дополняя или замещая существующие решения [2, 3]. Лазерно-сканирующие технологии, как инструмент маркшейдерской съемки подземных горных выработок, не являются исключением, однако в силу своей специфики до сих пор не смогли полностью реализовать весь свой потенциал в решении поставленных практических задач.

Несмотря на постоянное развитие, лазерное сканирование до сих пор не нашло повсеместного внедрения в практику маркшейдерского обеспече-

ния подземных горных работ [4]. Отчасти это можно объяснить объективными ограничениями радиуса съемки в узких выработках, что определяет необходимость увеличения числа станций сканирования при наземном (стационарном) сканировании [5]. Указанное ограничение закономерно увеличивает количество операций по пространственному ориентированию сформированных на станциях сканов, приводя к неизбежному накоплению погрешности результирующей модели и увеличению объемов подготовительных работ по съемке [6].

Естественные ограничения подземных горных выработок (геометрическая форма, невозможность использования измерений с помощью спутниковых систем навигации (Global Navigation Satellite System – GNSS)) также не позволяют экстраполировать опыт эффективных решений для лазерно-сканирующей съемки с дневной поверхности под землю [7]. Этот

факт делает невозможным применение традиционных мобильных лазерно-сканирующих комплексов, использующих GNSS/IMU (Inertial Measurement Unit (IMU) — инерциальный измерительный блок) навигационный блок [8].

Совокупность перечисленных факторов сводила применение лазерно-сканирующих технологий в маркшейдерском обеспечении подземных горных работ к сектору съемки очистных пространств, выполняемой для контроля объема добычи, потерь и разубоживания полезного ископаемого. Несмотря на несомненную важность названных операций, все их объединяют пониженные требования к подробности и точности моделей, а изолированность камер между собой позволяет выполнять ориентирование моделей прямым инструментальным способом [9].

Сложившуюся ситуацию принципиально изменило развитие SLAM (Simultaneous Localization And Mapping — одновременная локализация и построение карты) технологий, позволяющих реализовать возможность мобильной лазерной съемки в замкнутых пространствах, изолированных от сигналов космических спутников, за счет автокорреляционного ориентирования моделей в режиме реального времени [10]. Современные SLAM-сканеры, благодаря исключению из конструкции спутниковых и инерциальных систем, конструктивно просты и дешевы [11], что дает им значительное преимущество над прочими лазерно-сканирующими системами [12].

Предельный радиус съемки (до 100 метров) ограничивает область использования SLAM-сканеров при съемке открытых горных выработок [13], но достаточен для съемки подземных [14].

Все это, в совокупности с постоянной интенсификацией горных работ, открывает перед маркшейдерами возможность быстрой и полной съемки протяженных выработок. Что несет с собой такая возможность? С одной стороны — отсутствие разработанной методической базы [15], регламентирующей проведение лазерно-сканирующей съемки, а также очевидные трудности с хранением формируемых моделей и сложностью их обработки [6]. С другой стороны, формируемые в результате облака точек обладают недостижимой для классических технологий подробностью и пригодны как для формирования маркшейдерских планшетов, замеров, так и для оценки деформаций горных выработок [16]. Возможному решению задачи оценки деформаций горных выработок по результатам лазерно-сканирующих съемок посвящена представленная статья.

Состояние изученности вопроса

Многие научные работы были направлены на решение задачи деформационного мониторинга по результатам лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок [17]. Большинство из них посвящены мониторингу земной поверхности и, как частному случаю, оценке устойчивости бортов открытых горных выработок.

Однако, несмотря на популярность этого направления исследований, исчерпывающего решения до сих пор не существует [18]. Одной из фундаментальных проблем имплементации технологии лазерного сканирования для наблюдения за деформациями является случайность распределения точек по снимаемому объекту. В результате этого теряется возможность однозначного сопоставления точек в моделях, полученных в результате разновремен-

ных съемок, что является естественной необходимостью для вычисления полного вектора смещений, возникающих в процессе деформирования горной выработки.

Фактически единственной возможностью решения этой проблемы является использование однозначно дешифрируемых на моделях точек, определяемых пересечениями характерных геометрических форм снимаемой поверхности или специальных отражателей, предварительно закрепленных на объекте [19]. К сожалению, оба эти варианта не могут быть полноценно реализованы в подземных горных выработках из-за технологических условий их эксплуатации и отсутствия в них достаточного числа четко и однозначно распознаваемых характерных объектов, имеющих математически описываемую форму. Размещение специальных отражателей также малопродуктивно в силу объективных трудностей с сохранением наблюдаемых точек в условиях замкнутого пространства при обработке месторождений.

Таким образом, формируется вывод о невозможности надежного сопоставления точек в моделях между собой. Что это означает в рамках задачи мониторинга деформаций? Что деформации могут быть определены только путем вычисления смещений как дистанций между разновременными моделями. Опыт применения такого подхода реализован во многих программных продуктах по обработке данных лазерного сканирования. Наиболее показательными примерами результатов такого расчета являются карты оседания земной поверхности, вычисляемые как разность высотных отметок между моделями земной поверхности.

Однако применение такого подхода напрямую возможно только между цифровыми моделями рельефа (ЦМР)

(Digital Elevation Model — DEM), в которых каждому положению в плане соответствует лишь одна высотная отметка [20]. В случае подземных горных выработок, формирующих в вертикальном сечении замкнутый контур, прямое сравнение моделей между собой возможно только в границах фрагментов модели, внутри которых возможна аппроксимация точек математической функцией.

Требуемая сегментация облака точек чаще всего выполняется путем вокселизации модели — совмещения облака точек с регулярной трехмерной сеткой кубов (вокселей) и разделения исходного облака точек по признаку попадания точек в конкретный воксель [21]. При условии, что размер вокселя относительно мал, становится возможным допущение о линейном характере изменения положения точек внутри этого замкнутого объема. Вследствие этого допущения точки внутри вокселя аппроксимируются плоскостью, положение которой определяется минимизацией суммы квадратов нормалей, проводимых от точек к плоскости [22]. При условии постоянства положения воксельной сетки вычисление смещений между разновременными циклами съемки определяется как нормальный вектор от центра базовой поверхности до поверхности сравнения [23]. Показательным примером реализации такого способа вычисления смещений является программный пакет RIEGL 3D VOXEL ANALYSIS [24].

Основным преимуществом этого подхода является его независимость от формы и содержания анализируемого объекта, так как, регулируя параметры вокселя, возможно подобрать такой размер сетки, при котором допущение о линейном характере распределения точек будет выполняться [23]. Однако в противовес этому преиму-

шеству выступает ряд неустранимых недостатков, таких как неравномерное насыщение вокселей точками, несогласованность положения аппроксимирующих плоскостей между смежными вокселями, возможность перехода деформированной поверхности из стартового вокселя между циклами наблюдений [25]. Все это в совокупности не позволяет гарантировать постоянного качества получаемого решения внутри всего объема модели, а кубическая зависимость количества вокселей от их размера делает применение такого подхода для моделей больших размеров нерациональным с вычислительной точки зрения [26].

Альтернативой описанным подходам может являться использование более сложных функций для одновременной аппроксимации большого количества точек модели [27]. Примером такого подхода может служить вычисление деформаций стальных вертикальных нефтяных резервуаров, при которых в облако точек вписывается цилиндрическая поверхность, а деформации определяются как разница между радиусом базовой фигуры и горизонтальным расстоянием от центральной оси резервуара до точки [28]. При этом количество точек, участвующих в анализе, относительно базовой поверхности становится максимально возможным, что формирует большой объем избыточных измерений, позволяющих как проконтролировать качество получаемых результатов, так и выполнить сопутствующие операции: фильтрацию посторонних точек и уточнение положения базовой фигуры [29].

Очевидным ограничением применения этого подхода к подземным горным выработкам напрямую является невозможность выбора единственной непрерывной математической функции, описывающей все пространство модели.

Исходя из этого, решение поставленной задачи становится выполнимым как компромисс между всеми описанными подходами.

Методы

На основе анализа существующих исследований по теме был сделан вывод о том, что для разработки эффективной методики вычисления деформаций подземных горных выработок по данным лазерно-сканирующей съемки необходимо помимо анализируемых облаков точек использовать дополнительные сведения об их пространственном положении и геометрии [30, 31]. Принципиальная возможность реализации этого существует за счет того, что горные выработки, являясь антропогенными объектами, создаются согласно утвержденным проектам горных работ [32]. Использование проектных параметров выработок позволяет локализовать каждую точку лазерных отражений относительно ее положения в руднике или шахте. В результате такого сопоставления задача вычисления деформаций горных выработок может быть представлена как нахождение разности нормальных расстояний от точек разновременных сканов до проектного положения выработки.

На первом этапе решения этой задачи необходимо выбрать способ математического описания горных выработок. Предлагаемый метод параметризации состоит в сопоставлении проектного сечения выработки относительно положения ее непрерывной осевой линии (задаваемой в трехмерном пространстве комбинациями полилиний, дуг, переходных кривых или сплайнов).

Принципиальным условием при этом является то, что на всем протяжении осевой линии (относительно пикетажа выработки) ей присваива-

ется единственное сечение. Приняв также то, что у каждой выработки может существовать лишь одна осевая линия, становится возможным представить весь комплекс горных выработок как совокупность их осевых линий, совмещенных с соответствующими им сечениями. Статичность проектного положения горных выработок, в свою очередь, может служить неизменяемой точкой отсчета для вычисления деформаций горных выработок на всей продолжительности выполняемых работ по их мониторингу. Таким образом, локализовав точку относительно конкретного пикета осевой линии, становится возможным вычисление единственного нормального расстояния от точки до проектного сечения.

На следующем этапе выполнения алгоритма необходимо произвести классификацию точек по признаку их принадлежности к конкретной горной выработке и определить соответствующие им пикеты внутри нее. Математически поставленная задача сводится к поиску для точки Q , заданной координатами (x, y, z) , ближайшей к ней точки P , лежащей на осевой линии выработки, и определению расстояния до нее от начала базовой линии по пикетажу (рис. 1).

Рассмотрим пример необходимых вычислений для осевой линии, заданной комбинацией трехмерных отрезков, определяемых начальными и конечными точками $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ и $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$ соответственно. Ближайшая точка P в этом случае может быть найдена по формуле

$$P = P_0 + t \cdot \vec{v},$$

где P — искомая ближайшая точка на прямой; P_0 — точка начала отрезка; \vec{v} — направляющий вектор между точками начала и конца отрезка (P_0 и P_1); $v = (x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$ (см. фор-

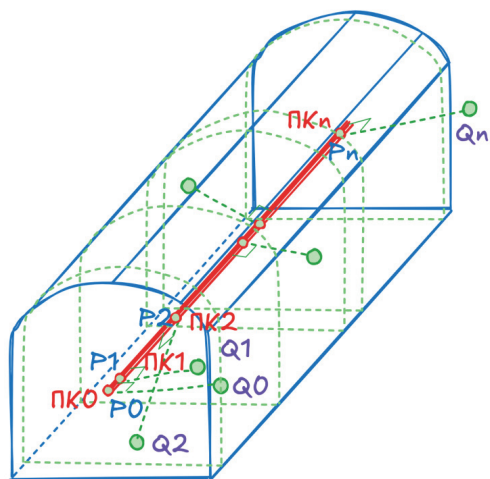


Рис. 1. Схема определения пикетажа точек лазерных отражений относительно проектного положения горной выработки [составлено авторами]

Fig. 1. Scheme for determining the stationing of laser reflection points relative to the project position of the mine workings [compiled by the authors]

мулу (5)); t — параметр, который вычисляется как отношение скалярного произведения $P_0Q \cdot \vec{v}$ к квадрату длины направляющего вектора:

$$t = \frac{(Q - P_0) \cdot \vec{v}}{\vec{v} \cdot \vec{v}}.$$

Принадлежность точки P отрезку $[P_0, P_1]$ будет определяться выполнением условия $0 \leq t \leq 1$, где параметр t вычисляется по формуле (2), в которой точка Q заменена на точку P .

В том случае, если сегменты осевых линии различных выработок коллинеарны между собой или имеют взаимные пересечения, в описанном алгоритме сопоставления точки Q будут возникать коллизии принадлежности точки одновременно нескольким выработкам. Разрешить возникающую неоднозначность возможно путем выбора сегмента выработки, отстоящего от рассматриваемой точки Q на минимальное расстояние d , вычисляемое по формуле

$$d = |\overline{QP}| = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}.$$

После чего положение пикета точки относительно начала выработки можно определить по формуле

$$ПК = \sum_{i=0}^{i-1} L_i + l_i,$$

где L_i — длина сегментов осевой линии от начального ($i = 0$) до сегмента, предшествующего тому, к которому относится точка Q (i -сегмент); l_i — расстояние от начала i -го сегмента до точки P .

После определения положения всех точек относительно соответствующих им выработок выполняется определение положения точки Q относительно проектного сечения, соответствующего точке P .

То есть необходимо для точки Q определить положение точки Q' в условной системе координат X', Y', Z' , положение которой задается следующими параметрами:

– начало системы координат совпадает с точкой P ;

– направление оси Z' совпадает с направлением сегмента $P_0 - P_1$ (направляющим вектором \vec{v});

– направление оси X' лежит в горизонтальной плоскости XOY исходной системы координат и перпендикулярно направлению выработки Z' ;

– направление оси Y' перпендикулярно осям X' и Z' .

Обозначим направляющий вектор \vec{v} как

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z).$$

Направляющие косинусы для вводимой системы координат X, Y, Z могут быть найдены по следующим формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} z' = \frac{\vec{v}}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}, \\ x' = \frac{(v_x, v_y, 0)}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}, \\ y' = z' \times x' = (-z_z x_y, z_z x_x, z_x x_y - z_y x_x) \end{array} \right.$$

Координаты точки Q' в введенной системе координат сечения X', Y', Z' для точки Q можно определить по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} Q'_x = x' \cdot Q_0 \\ Q'_y = y' \cdot Q_0 \\ Q'_z = z' \cdot Q_0 \end{array} \right.$$

где

$$Q_0 = Q - P = (Q_x - P_x, Q_y - P_y, Q_z - P_z).$$

В результате такого перехода определение положения точки Q относительно сечения выработки можно рассматривать как плоскую задачу. Проектное сечение горной выработки можно рассматривать как кусочно-заданную функцию в полярных координатах. Например, сечение, изображенное на рис. 2, представлено совокупностью отрезков

$$\{P_0 P_1, P_4 P_5, P_5 P_6, P_6 P_0\}$$

$$\text{и дуг } \{P_1 C_1 P_2, P_2 C_2 P_3, P_3 C_3 P_4\}.$$

Положение точки Q' относительно сечения может быть представлено кривой с длиной s , проходящей вдоль контура сечения в секторе $[0, \phi]$, и длиной нормали d от точки до сечения. Для определения параметров s и d необходимо сопоставить точку Q' и соответствующий ей фрагмент контура сечения, что легко выполнимо путем проверки следующего условия:

$$\phi_i \leq \phi_{Q'} < \phi_{i+1},$$

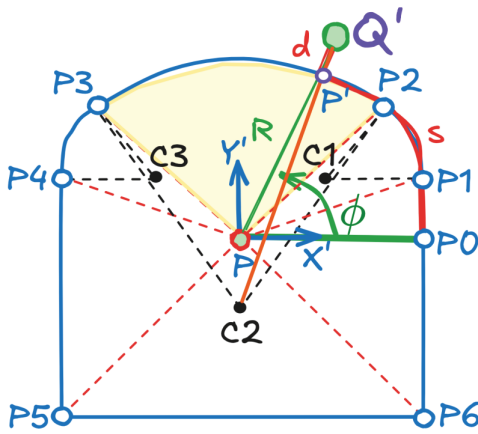


Рис. 2. Схема определения положения точки Q' относительно проектного сечения горной выработки [составлено авторами]
 Fig. 2. Scheme for determining Q' point location relative to the project position of the mine workings [compiled by the authors]

где $\phi_{Q'}$ — полярный угол, определяемый от оси X' до точки Q' в направлении оси Y' и лежащий в пределах $[0, 2\pi)$; ϕ_i, ϕ_{i+1} — полярные углы, определяющие начальную P_i и конечную P_{i+1} точки фрагмента контура.

Конкретный способ вычисления параметров s и d может варьироваться из-за различной комбинации фрагментов контура от начальной точки отсчета сечения P_0 до точки P' , являющейся проекцией точки Q' на сечение выработки. В общем случае длина s может быть найдена путем интегрирования длин фрагментов, лежащих в секторе $[0, \phi_{Q'}]$. Для рассматриваемого случая длина s может быть найдена по формуле

$$s_{P'} = \left| \overrightarrow{P_0 P_1} \right| + \frac{\left| \overrightarrow{C_1 P_1} \right| \cdot \pi \cdot \angle P_1 C_1 P_2^\circ}{180^\circ} + \frac{\left| \overrightarrow{C_2 P_2} \right| \cdot \pi \cdot \angle P_2 C_2 P'^\circ}{180^\circ}.$$

Способ вычисления нормали d от точки Q' до проектного сечения

выработки будет зависеть от типа фрагмента. Так, для рассматриваемого примера, в котором фрагмент контура является дугой, величина d может быть найдена с использованием следующего выражения:

$$d_{Q'} = \left| \overrightarrow{C_2 Q'} \right| - \left| \overrightarrow{C_2 P_2} \right|.$$

Положительное значение величины $d_{Q'}$ будет указывать на то, что точка Q' находится вне проектного контура, а отрицательное — на то, что внутри.

В случае принадлежности точки P' фрагменту контура, являющемуся отрезком, величина d может быть найдена как длина вектора $\left| \overrightarrow{P' Q'} \right|$, а знак, определяющий положение точки относительно сечения, может быть получен из результатов векторного произведения: $\overrightarrow{P_i Q'} \times \overrightarrow{P_i P_{i+1}}$. Так, если результирующий вектор будет иметь положительную z -координату, точка Q' будет лежать снаружи сечения, а если отрицательную — то внутри.

В результате произведенных вычислений каждая из точек лазерных отражений Q_i помимо собственных прямоугольных координат (x_i, y_i, z_i) получает новые координаты: (PK_i, s_i, d_i, n) , определяющие ее положение относительно проекта выполнения горных работ (n — уникальный номер выработки, относительно базовой линии которой выполняется вычисление остальных параметров).

Полученные значения (PK_i, s_i, d_i, n) позволяют представить исходное облако точек в виде цифровой модели отклонений скана от проекта выработки. После замены для n -й выработки системы координат точек с XYZ на $PKSD$ исходное облако точек может быть представлено в виде «развертки» относительно проекта горных работ. Полученная в результате развертка будет топологически эквивалентна

ЦМР, получаемой при сканировании дневной поверхности, что позволит использовать напрямую методы оценки деформированного состояния земной поверхности, примеры которых описаны в работах [8, 33].

Принципиальная схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 3.

Результаты

Апробация предлагаемого алгоритма была выполнена на основании двух одновременных сканов буро-доставочного штрека БДШ 023, сопряженного с ортом ВТО 1/1. Горные работы по проходке ВТО 1/1 на рассматриваемом участке были завершены в январе 2016 года, а БДШ 023 — в декабре 2024 года. Способ проходки горных

выработок — буровзрывной. Сечение горных выработок прямоугольно-сводчатое: ширина выработки по подошве 4.6 м; высота выработки 4.0 м для БДШ 023; 5.1 м по подошве и 4.05 м по высоте для ВТО 1/1. Горно-геологические условия на участке БДШ 023 включает крутопадающую зону окисленных пород (интенсивность трещиноватости — 20 тр./п.м, прочность — V кат., устойчивость — III кат.), вследствие чего были организованы работы по мониторингу устойчивости целиков.

Съемка выполнялась с интервалом в 27 суток: 20 марта и 16 апреля 2025 года с применением лазерно-сканирующей системы Leica BLK-360. Съемка 20 марта была выполнена с 3 станций сканирования, 16 апреля —



Рис. 3. Блок-схема алгоритма [составлено авторами]

Fig. 3. Block schematic of the algorithm [compiled by the authors]

с двух, взаимное ориентирование сканов в рамках одного цикла измерений производилось автокорреляционным методом: ICP-алгоритм (Iterative Closest Point — итеративный алгоритм ближайших точек) [34]. Ориентирование результирующих моделей во внешнюю систему координат выполнялось по 4 маркам внешнего ориентирования, закрепленным попарно на периферии модели. Результирующее облако точек от 20 марта содержит 432.4 тыс. точек, 16 апреля — 609.4 тыс. точек.

Исходя из описанных параметров сечения и представленного плана горных работ (рис. 4), была выполнена параметризация проектного положения горных выработок ВТО 1/1 и БДШ 023 (рис. 5, а), после чего были рассчитаны отклонения облаков точек от проектного положения каждой из выработок (рис. 5, б). Разделение облака точек по принадлежности конкретной выработке было выполнено по признаку минимума отклонения каждой точки от проекта (рис. 5, в).

На основе полученных значений была сформирована модель фактических отклонений выработки от проекта (рис. 6). Следует отметить, что, безотносительно к деформационному мониторингу, рассчитанные для точек лазерных отражений точки отклонения от проекта имеют собственную ценность и могут использоваться при оценке качества проходки выработки, выполняемой в рамках маркшейдерского замера.

Осуществив перечисленные операции для облака точек, полученного при выполнении второго цикла мониторинга, облака точек по каждой из выработок «развернули» относительно проектного положения выработки в систему координат *ПКSD*. После чего по полученным «разверткам» была рассчитана разность между точками съемки от 16 апреля и триангуляционной нерегулярной поверхностью (Triangulated Irregular Network — TIN), построенной по данным от 20 марта. Полученные значения разностей явля-

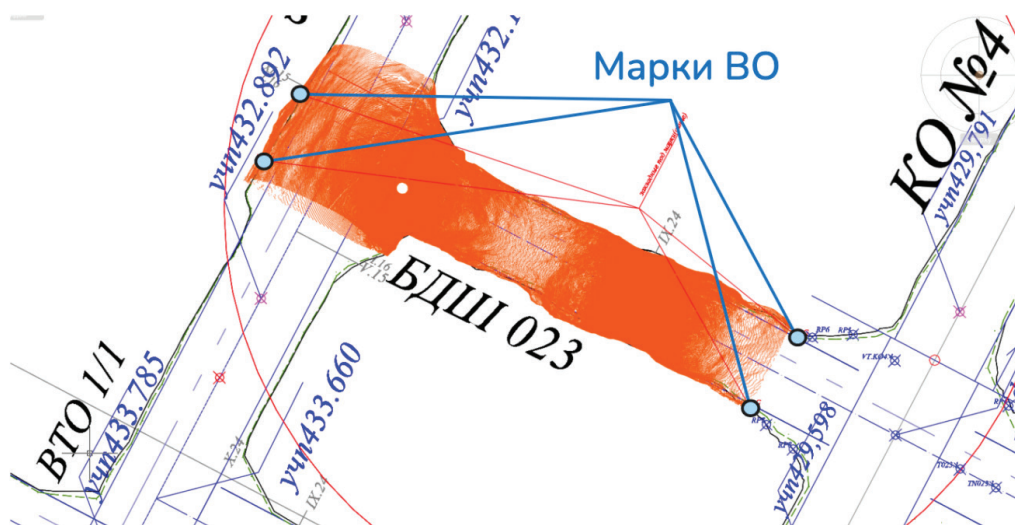


Рис. 4. Фрагмент плана горных работ, совмещенного с облаком точек от 16 апреля [составлено авторами]

Fig. 4. Mining plan fragment combined with point cloud from April 16 [compiled by the authors]

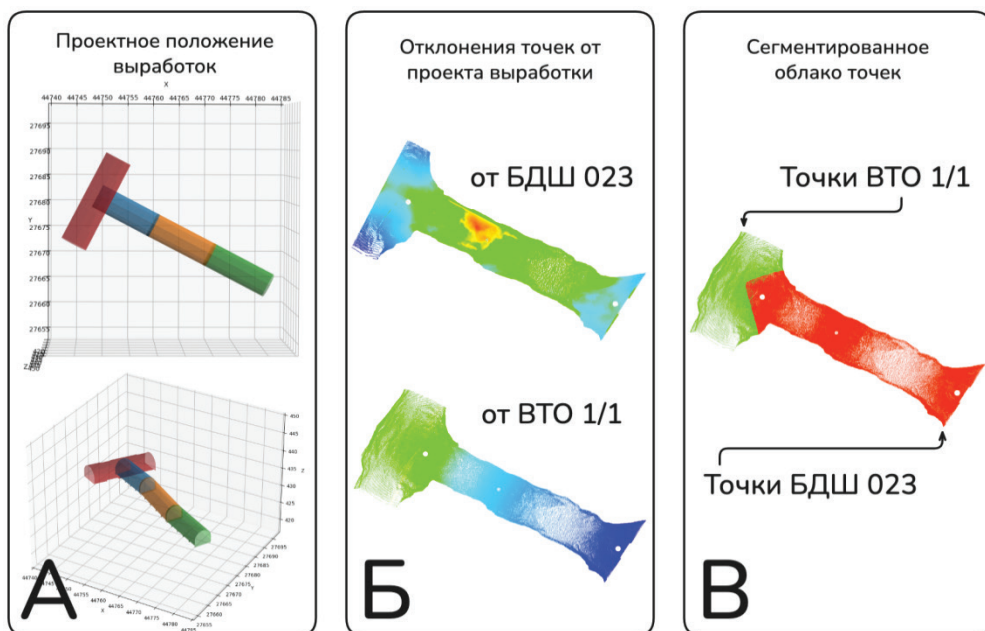


Рис. 5. Процесс сегментации точек модели по их принадлежности к выработке [составлено авторами]

Fig. 5. Model segmentation based on its location within mine workings [compiled by the authors]

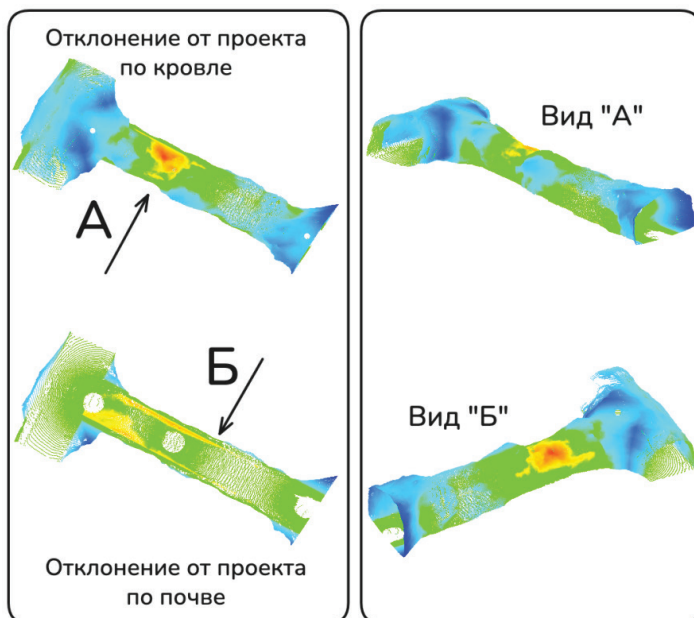


Рис. 6. Визуализация отклонений выработки от проектного положения [составлено авторами]

Fig. 6. Visualization of deviations of mine working from the project position [compiled by the authors]

ются наблюдаемыми деформациями горной выработки и визуализированы на рис. 7 вместе с исходными «развертками».

Улучшить визуальное восприятие полученных значений можно, сопоставив рассчитанные значения дефор-

маций с исходным облаком точек от 16 апреля (рис. 8).

Визуальный анализ модели, представленной на рис. 8, позволяет субъективно оценить изменение состояния горной выработки между циклами выполненных измерений.

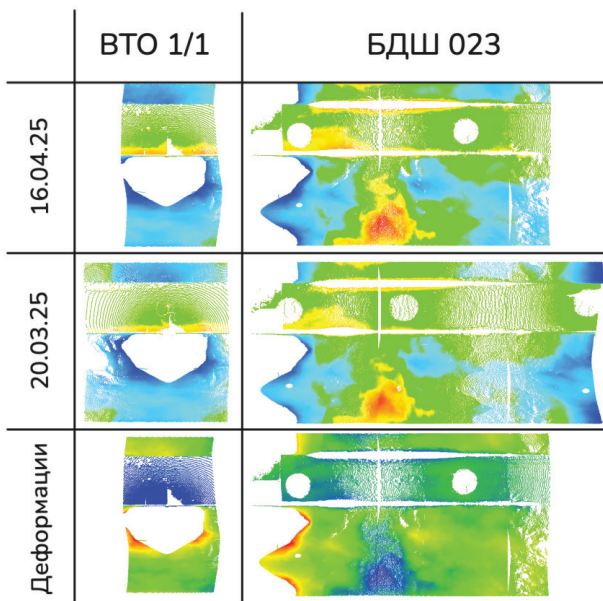


Рис. 7. Визуализация анализа «разверток» сканов по выработкам [составлено авторами]
 Fig. 7. Visualization of the analysis of point cloud “unfolding” by mine workings [compiled by the authors]

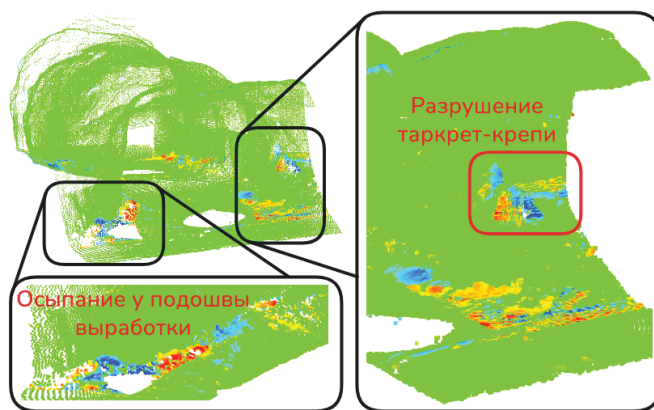


Рис. 8. Визуализация изменений выработки между циклами мониторинга [составлено авторами]
 Fig. 8. Visualization of changes in mine working between monitoring cycles [compiled by the authors]

Классифицировать точки лазерных отражений по признаку направления и существенности произошедших деформаций возможно с использованием GMM-классификации (Gaussian Mixture Model (классификация по смешанным Гауссовским распределениям)) [33, 35].

Использованный способ классификаций основывается на представлении эмпирического распределения деформаций в виде суммы нормальных распределений. Сформированный GMM-классификатор позволяет определить вероятность отношения каждой точки лазерных отражений к конкретному типу смещений. На рис. 9 представлена визуализация GMM-классификации (стабильное положение точек выделено зеленым цветом, деформация наружу — синим, а внутрь — красным).

Исходя из характера распределения зон смещений внутри модели, был сделан вывод о том, что выработка стабильна (в пределах точности выполненных измерений). Основное место проявления деформаций локализовано на южном сопряжении выработок ВТО

1/1 и БДШ 023 и проявляет себя в разрушении торкрет-крепи. Остальные зоны проявления деформаций локализованы у границ подошвы выработки и могут быть объяснены работами по зачистке почвы выработки и движением погрузочно-доставочных машин.

Численно оценив параметры полученного при GMM-классификации распределения, относящегося к стабильной зоне (рис. 10), становится возможным дать характеристику чувствительности полученного классификатора. Так, математическое ожидание полученного распределения, равное 2 мм, определяет систематическую погрешность взаимного ориентирования моделей между собой. А среднеквадратическое отклонение (12 мм) — фактическую погрешность вычисления деформаций в модели. Полученная погрешность является результатом суммы погрешностей, присутствующих в исходных данных, и вызвана непосредственными погрешностями измерений при сканировании и ошибками «аналогии» моделей из-за неравномерной плотности точек.

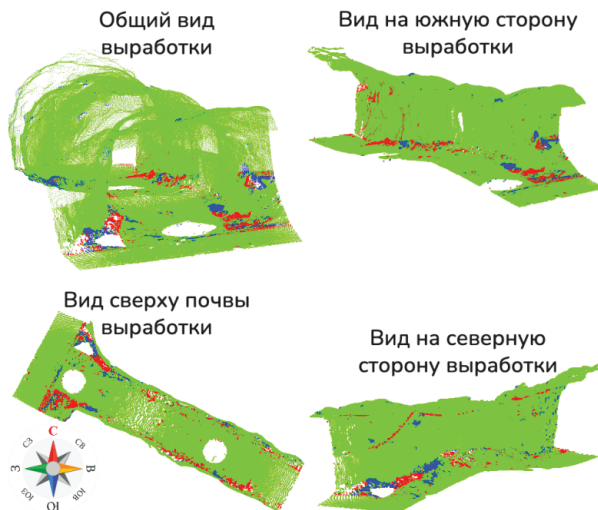


Рис. 9. Визуализация облака точек после GMM-классификации деформаций [составлено авторами]

Fig. 9. Point cloud visualization after GMM-classification of deformations [compiled by the authors]

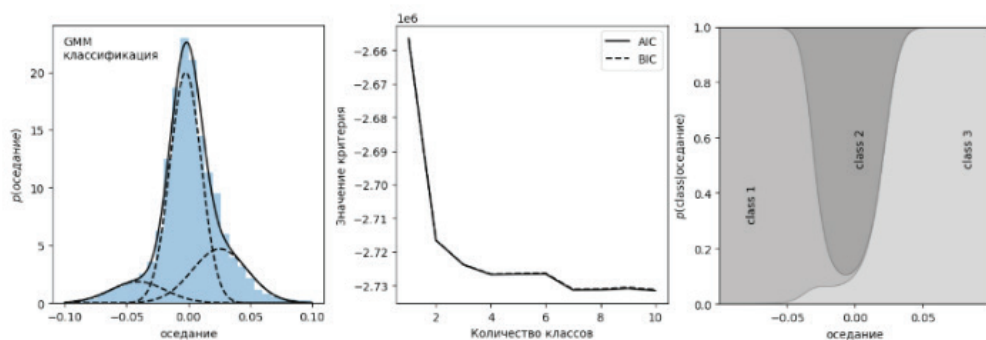


Рис. 10. Оценка качества работы GMM-классификатора по рассчитанным деформациям [составлено авторами]

Fig. 10. Quality assessment of GMM-classification based on deformation values [compiled by the authors]

Заключение

Оценивая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что предлагаемая методика расчета деформаций позволяет оценить изменение формы горной выработки по данным разновременных лазерно-сканирующих съемок. Чувствительность метода напрямую определяется качеством используемых в расчете исходных данных и в рассмотренном примере находится в пределах ± 1 см. Промежуточные результаты расчетов, заключающиеся в анализе отклонений точек от проектного положения выработок, могут быть полезны в ходе выполнения работ при маркшейдерском замере для оценки качества ведения горных работ. Полученные результаты позволяют также рекомендовать предлагаемую методику как способ оценки качества торкретирования горной выработки и мониторинга состояния крепи.

Потенциально повысить качество решения возможно путем использования более плотных облаков точек, получаемых при съемке с уменьшенным шагом сканирования при большем количестве станций, расположенных ближе друг к другу. Такая организа-

ция съемки позволит снизить взаимную погрешность аналогии между разновременными моделями благодаря более плотному покрытию снимаемой поверхности точками. Снижение погрешности модели также может быть достигнуто за счет исключения из нее точек, измеренных под острым углом падения лазерного луча к снимаемой поверхности. Вероятной альтернативой, позволяющей компенсировать возрастающий при этом объем полевых измерений, может являться мобильное SLAM-сканирование, однако это требует отдельной проверки на соответствующих исходных данных.

Также на качество получаемых результатов могут оказывать влияние существенные расхождения между проектным и фактическим сечениями горной выработки, в связи с чем при расчете отклонений может использоваться не соответствующий точке фрагмент сечения. Решение данной проблемы может быть получено за счет использования в расчете модели горной выработки, скорректированной по результатам первого цикла наблюдений. Фактическое положение такой модели может быть определено по уточненной осевой линии и с учетом масштабиро-

вания проектного сечения вдоль горизонтальных и вертикальных осей. Подтверждение представленной гипотезы будет рассмотрено в дальнейших работах авторов и потенциально позволит автоматизировать процесс построения маркшейдерских планов и профилей выработок.

Вклад авторов:

Выстрчил М. Г. — генерация идеи исследования, реализация программы для обработки данных лазерного сканирования продукта, написание текста статьи.

Мукминова Д. З. — получение данных для анализа, анализ результатов исследования и подготовка данных.

Балтыжакова Т. И. — анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Рамирес Мелендес Л. А. — выполнение работы по систематизации исходных данных, выполнение расчетов.

Авторы выражают признательность за помощь своим учителям и коллегам за ценные советы и поддержку в процессе работы над исследованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова Е. Ю., Полянкин А. Г., Потокина А. М. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. — 2023. — Т. 264. — С. 895–905.

2. Miller I. D., Cladera F., Cowley A., Shivakumar S. S., Lee E. S., Jarin-Lipschitz L., Bhat A., Rodrigues N., Zhou A., Cohen A., Kulkarni A., Laney J., Taylor C. J., Kumar V. Mine Tunnel Exploration Using Multiple Quadrupedal Robots // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 2840–2847. DOI: 10.1109/LRA.2020.2972872.

3. Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И., Шабаров А. Н. Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 56–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

4. Meaka D., Vokain T. LiDAR Technology in Underground Mining Research Topic in the Course-Mining Technology (MN223) // A project report By DESIDE MEAKA. — 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.25025.53608.

5. Jones E., Beck D. The use of 3D laser scanning for deformation monitoring in underground mines // Proceedings 13th AusIMM Underground Operators' Conference. 2017, pp. 267–270.

6. Lepikhina O. Yu., Pravdina E. A. Laser scanner data capture time management // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017, no. 12, pp. 1649–1661. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0317_5805.pdf (Date of request: 22.06.2025).

7. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Исследование технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK) для наблюдения за оползневыми деформациями // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 1594–1609. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1594-1609.

8. Zheng J., Yao W., Lin X., Ma B., Bai L. An Accurate Digital Subsidence Model for Deformation Detection of Coal Mining Areas Using a UAV-Based LiDAR // Remote Sensing. 2022, vol. 14, no. 2, p. 421. DOI: 10.3390/rs14020421.

9. Kumar Singh S., Pratap Banerjee B., Raval S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining // International Journal of Mining Science and Technology. 2023, vol. 33, no. 2, pp. 133–154. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.

10. Yang X., Lin X., Yao W., Ma H., Zheng J., Ma B. A Robust LiDAR SLAM Method for Underground Coal Mine Robot with Degenerated Scene Compensation // *Remote Sensing*. 2022, vol. 15, p. 186. DOI: 10.3390/rs15010186.
11. Grenon M., Caron A., Karampinos E., Dorion J. Towards an Efficient iPad-Based LiDAR Structural Mapping Methodology for Underground Mines // 57th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – 2023. DOI: 10.56952/ARMA-2023-0741.
12. Brigadnov I., Lutonin A., Bogdanova K. Error State Extended Kalman Filter Localization for Underground Mining Environments // *Symmetry*. 2023, vol. 15, no. 2, p. 344. DOI: 10.3390/sym15020344.
13. Tian R., Zhang Y., Feng Y., Yang L., Cao Z., Coleman S., Kerr D. Accurate and Robust Object SLAM With 3D Quadric Landmark Reconstruction in Outdoors // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 1534–1541. DOI: 10.1109/LRA.2021.3137896.
14. Lin X., Yao W., Yan T. A LiDAR SLAM Algorithm Considering Dynamic Extraction of Feature Points in Underground Coal Mine // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024, vol. XLVIII-4–2024, pp. 659–664. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-659-2024.
15. Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я. Расчет параметров наземного лазерного сканирования промышленных объектов // *Вестник СГУГиТ*. – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 26–39. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-26-39.
16. Глазунов В. В., Бурлуцкий С. Б., Шувалова Р. А., Жданов С. В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 257. – С. 771–782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
17. Корнилов Ю. Н., Романчиков А. Ю., Аникеева А. А. Оценка деформационных процессов фотограмметрическим способом в Agisoft Metashape // *Геодезия и картография*. – 2023. – № 10. – С. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-2-11.
18. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1176–1191. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.
19. Шокер Х. М., Мустафин М. Г. Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия // *Геодезия и картография*. – 2021. – № 2. – С. 2–10. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.
20. Petrie G., Kennie T. J. M. Terrain modelling in surveying and civil engineering // *Computer-Aided Design*. 1987, vol. 19, no. 4, pp. 171–187. DOI: 10.1016/0010-4485(87)90066-2.
21. Lim E., Suter D. 3D terrestrial LIDAR classifications with super-voxels and multi-scale Conditional Random Fields // *Computer-Aided Design*. 2009, vol. 41, no. 10, pp. 701–710. DOI: 10.1016/j.cad.2009.02.010.
22. Zhao H., Xiao Z. PVLF: point-voxel local feature fusion for 3D detection // *Discover Artificial Intelligence*. 2025, vol. 5. DOI: 10.1007/s44163-025-00299-5.
23. Zhou Y., Liu J., Jianxun Li, Zhou H. Voxel completion and 3D asymmetrical convolution networks for Lidar semantic segmentation // *Multimedia Tools and Applications*. 2024. DOI: 10.1007/s11042-024-19975-2.
24. He F., Li Y., Liu C., Zhiwei Z., Dai K., Wang W. A Voxel-FNO-based machining deformation prediction method for structural parts // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025, vol. 138, pp. 669–685. DOI: 10.1007/s00170-025-15551-6.
25. Plaza-Leiva V., Gómez-Ruiz J., Mandow A., Garcia A. Voxel-Based Neighborhood for Spatial Shape Pattern Classification of Lidar Point Clouds with Supervised Learning // *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 3, p. 594. DOI: 10.3390/s17030594.

26. *Mortazavi F., Shkedova O., Feuerhake U., Brenner C., Sester M.* Voxel-Based Point Cloud Localization for Smart Spaces Management // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023, vol. XLVIII-1/W1-2023, pp. 325–332. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-325-2023.

27. *Kang J., Li M., Mao S., Fan Y., Wu Z., Li B.* A Coal Mine Tunnel Deformation Detection Method Using Point Cloud Data // Sensors. 2024, vol. 27, no. 7, p. 2299. DOI: 10.3390/s24072299.

28. *Gumilar I., Gaol S. V. L. L., Munarda M., Bramanto B., Lukmanulhakim A.* Tank Modeling and Its Condition Assessment using Terrestrial Laser Scanner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 936. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012004.

29. *Bukuromo A.* Investigating the Sensitivity of Terrestrial Laser Scanning Model to Control Coordinates in Deformation Monitoring // International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI). 2025, vol. 12, no. 2, pp. 1029–1047. DOI: 10.51244/IJRSI.2025.12020082.


30. *Xu S., Huo Y., Wang C., Lin J., Shi B., Xing F.* Novel Feature Preserving Method for Simplifying the Surface Point Cloud of Underground Space Tunnel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024, vol. 73, pp. 1–14. DOI: 10.1109/TIM.2024.3420354.

31. *Yao D.* Measurement and deformation monitoring system for underground engineering robots based on Internet of Things architecture // Journal of Intelligent Systems. 2025, vol. 34, no. 1, p. 20240322. DOI: 10.1515/jisys-2024-0322.

32. *Тарасов В. В., Антуков В. Н., Иванов О. В.* Комплексная оценка деформирования системы жесткой армировки при конвергенции крепи шахтного ствола в неустойчивых породах // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 305–315.

33. *Выстрчил М. Г., Мукминова Д. З., Балтыжакова Т. И., Парамонов В. Г., Валькова Е. О.* Анализ деформационных процессов по данным маркшейдерских лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 2. — С. 78–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_78.

34. *Li P., Wang R., Wang Y., Tao W.* Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 68030–68048. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986470.

35. *Eirola E., Lendasse A.* Gaussian Mixture Models for Time Series Modelling, Forecasting, and Interpolation // Lecture Notes in Computer Science. 2013, vol. 8207, pp. 162–173. DOI: 10.1007/978-3-642-41398-8_15 

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Выстрчил Михаил Георгиевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры маркшейдерского дела, <https://orcid.org/0000-0002-1669-7776>, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Россия, e-mail: Vystrchil_MG@pers.spmi.ru;

Мукминова Диана Зинуровна — канд. техн. наук, заведующий лабораторией маркшейдерского обеспечения горных работ Научного центра геомеханики и проблем горного производства, <https://orcid.org/0000-0002-5595-9150>, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Россия, e-mail: Mukminova_DZ@pers.spmi.ru;

Балтыжакова Татьяна Игоревна — канд. техн. наук, доцент института дизайна и урбанистики, <https://orcid.org/0000-0001-9160-1167>, Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, лит. А, Россия, e-mail: tibaltyzhakova@itmo.ru;

Рамирес Мелендес Луис Альберто — аспирант кафедры маркшейдерского дела, <https://orcid.org/0000-0002-6459-8975>, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Россия, e-mail: s243021@stud.spmi.ru.

Для контактов: Выстрчил Михаил Георгиевич, e-mail: Vustrchil_MG@pers.spmi.ru.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kulikova E. Y., Polyankin A. G., Potokina A. M. Specifics of geotechnical risk control in the design of underground structures. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 895–905.

2. Miller I. D., Cladera F., Cowley A., Shivakumar S. S., Lee E. S., Jarin-Lipschitz L., Bhat A., Rodrigues N., Zhou A., Cohen A., Kulkarni A., Laney J., Taylor C. J., Kumar V. Mine Tunnel Exploration Using Multiple Quadrupedal Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 2840–2847. DOI: 10.1109/LRA.2020.2972872.

3. Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Open pit mining monitoring support with information and analysis using web mapping technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 56–70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

4. Meaka D., Vokain T. LiDAR Technology in Underground Mining Research Topic in the Course-Mining Technology (MN223). *A project report By DESIDE MEAKA*. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.25025.53608.

5. Jones E., Beck D. The use of 3D laser scanning for deformation monitoring in underground mines. *Proceedings 13th AusIMM Underground Operators' Conference*. 2017, pp. 267–270.

6. Lepikhina O. Yu., Pravdina E. A. Laser scanner data capture time management. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, no. 12, pp. 1649–1661. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0317_5805.pdf. (Date of request: 22.06.2025).

7. Kuzin A. A., Filippov V. G. Research of real-time kinematic satellite positioning technology (RTK) for monitoring landslide deformations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1594–1609. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1594-1609.

8. Zheng J., Yao W., Lin X., Ma B., Bai L. An Accurate Digital Subsidence Model for Deformation Detection of Coal Mining Areas Using a UAV-Based LiDAR. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, no. 2, p. 421. DOI: 10.3390/rs14020421.

9. Kumar Singh S., Pratap Banerjee B., Raval S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023, vol. 33, no. 2, pp. 133–154. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.

10. Yang X., Lin X., Yao W., Ma H., Zheng J., Ma B. A Robust LiDAR SLAM Method for Underground Coal Mine Robot with Degenerated Scene Compensation. *Remote Sensing*. 2022, vol. 15, p. 186. DOI: 10.3390/rs15010186.

11. Grenon M., Caron A., Karampinos E., Dorion J. Towards an Efficient iPad-Based LiDAR Structural Mapping Methodology for Underground Mines. *57th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. 2023. DOI: 10.56952/ARMA-2023-0741.

12. Brigadnov I., Lutonin A., Bogdanova K. Error State Extended Kalman Filter Localization for Underground Mining Environments. *Symmetry*. 2023, vol. 15, no. 2, p. 344. DOI: 10.3390/sym15020344.

13. Tian R., Zhang Y., Feng Y., Yang L., Cao Z., Coleman S., Kerr D. Accurate and Robust Object SLAM With 3D Quadric Landmark Reconstruction in Outdoors. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 1534–1541. DOI: 10.1109/LRA.2021.3137896.

14. Lin X., Yao W., Yan T. A LiDAR SLAM Algorithm Considering Dynamic Extraction of Feature Points in Underground Coal Mine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024, vol. XLVIII-4-2024, pp. 659–664. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-659-2024.
15. Sharafutdinova A. A., Bryn M. Ja. Calculating the parameters of terrestrial laser scanning of industrial object. *Vestnik of SSUGT*. 2023, vol. 28, no. 2, pp. 26–39. [In Russ]. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-26-39.
16. Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 771–782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
17. Kornilov Yu. N., Romanchikov A. Yu., Anikeeva A. A. Estimating deformation process through single shot close range photogrammetry method in Agisoft Metashape. *Geodesy and cartography*. 2023, vol. 84(10), pp. 2–11. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-2-11.
18. Kuzin A. A., Filippov V. G. Forecasting landslide displacement values based on geodetic data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1176–1191. [In Russ]. DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191>.
19. Choker H. M., Mustafin M. G. Geodesic support of laser scan technology use for fixing cultural heritage objects. *Geodesy and cartography*. 2021, vol. 82(2), pp. 2–10. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.
20. Petrie G., Kennie T. J. M. Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computer-Aided Design*. 1987, vol. 19, no. 4, pp. 171–187. DOI: 10.1016/0010-4485(87)90066-2.
21. Lim E., Suter D. 3D terrestrial LIDAR classifications with super-voxels and multi-scale Conditional Random Fields. *Computer-Aided Design*. 2009, vol. 41, no. 10, pp. 701–710. DOI: 10.1016/j.cad.2009.02.010.
22. Zhao H., Xiao Z. PVLf: point-voxel local feature fusion for 3D detection. *Discover Artificial Intelligence*. 2025, vol. 5. DOI: 10.1007/s44163-025-00299-5.
23. Zhou Y., Liu J., Jianxun Li, Zhou H. Voxel completion and 3D asymmetrical convolution networks for Lidar semantic segmentation. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. DOI: 10.1007/s11042-024-19975-2.
24. He F., Li Y., Liu C., Zhiwei Z., Dai K., Wang W. A Voxel-FNO-based machining deformation prediction method for structural parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025, vol. 138, pp. 669–685. DOI: 10.1007/s00170-025-15551-6.
25. Plaza-Leiva V., Gómez-Ruiz J., Mandow A., Garcia A. Voxel-Based Neighborhood for Spatial Shape Pattern Classification of Lidar Point Clouds with Supervised Learning. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 3, p. 594. DOI: 10.3390/s17030594.
26. Mortazavi F., Shkedova O., Feuerhake U., Brenner C., Sester M. Voxel-Based Point Cloud Localization for Smart Spaces Management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2023, vol. XLVIII-1/W1-2023, pp. 325–332. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-325-2023.
27. Kang J., Li M., Mao S., Fan Y., Wu Z., Li B. A Coal Mine Tunnel Deformation Detection Method Using Point Cloud Data. *Sensors*. 2024, vol. 27, no. 7, p. 2299. DOI: 10.3390/s24072299.
28. Gumilar I., Gaol S. V. L. L., Munarda M., Bramanto B., Lukmanulhakim A. Tank Modeling and Its Condition Assessment using Terrestrial Laser Scanner. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 936. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012004.
29. Bokuromo A. Investigating the Sensitivity of Terrestrial Laser Scanning Model to Control Coordinates in Deformation Monitoring. *International Journal of Research*

and Scientific Innovation (IJRSI). 2025, vol. 12, no. 2, pp. 1029–1047. DOI: 10.51244/IJRSI.2025.12020082.

30. Xu S., Huo Y., Wang C., Lin J., Shi B., Xing F. Novel Feature Preserving Method for Simplifying the Surface Point Cloud of Underground Space Tunnel. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024, vol. 73, pp. 1–14. DOI: 10.1109/TIM.2024.3420354.

31. Yao D. Measurement and deformation monitoring system for underground engineering robots based on Internet of Things architecture. *Journal of Intelligent Systems*. 2025, vol. 34, no. 1, p. 20240322. DOI: 10.1515/jisys-2024-0322.

32. Tarasov V. V., Aptukov V. N., Ivanov O. V. Comprehensive assessment of deformation of rigid reinforcing system during convergence of mine shaft lining in unstable rocks. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 305–315.

33. Vystrchil M. G., Mukminova D. Z., Baltyzhakova T. I., Paramonov V. G., Valkova E. O. Analysis of deformation processes by survey data of laser scanning and photogrammetry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, vol. 2, pp. 78–98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_78.

34. Li P., Wang R., Wang Y., Tao W. Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 68030–68048. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986470.

35. Eirola E., Lendasse A. Gaussian Mixture Models for Time Series Modelling, Forecasting, and Interpolation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2013, vol. 8207, pp. 162–173. DOI: 10.1007/978-3-642-41398-8_15.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vystrchil M. G., Ph.D., Associate Professor at the Department of Mining Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-1669-7776>, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, 2, St. Petersburg, Russia, e-mail: Vystrchil_MG@pers.spmi.ru;

Mukminova D. Z., Ph.D., Head of the Laboratory for Mining Surveying Operations Support of the Geomechanics and Mining Problems Research Centre., <https://orcid.org/0000-0002-5595-9150>, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, 2, St. Petersburg, Russia,, e-mail: Mukminova_DZ@pers.spmi.ru;

Baltyzhakova T. I., Ph.D., Associate Professor at the Institute of Design & Urban Studies, <https://orcid.org/0000-0001-9160-1167>, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, e-mail: tibaltyzhakova@itmo.ru;

Ramírez Meléndez Luis Alberto — Postgraduate at the Department of Mining Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-6459-8975>, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, 2, St. Petersburg, Russia, e-mail: s243021@stud.spmi.ru.

Corresponding author: *Vystrchil M. G.*, e-mail: Vystrchil_MG@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 31.07.2025; получена после рецензии 04.10.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 31.07.2025; received after the review 04.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.

