

УДК 528.721.221.6:553.411(571.54)
<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-5-17>

Опыт применения технологии Slam-сканирования для съемки очистных камер при отработке золоторудного месторождения «Зун-Холба» в Бурятии с использованием сканера Heron Lite

В. С. Писарев^{1,2✉}, К. К. Ершов¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова»
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Аннотация. Установлено, что при отработке золоторудных месторождений подземным способом происходит образование пустот в очистном пространстве горного массива. Доступ горнорабочих для картирования таких полостей традиционными технологиями запрещен. Несколько лет назад появилось новое оборудование на основе SLAM-технологий: оно является мобильным, функциональным и позволяет выполнять маркшейдерско-геодезические измерения с высокой точностью в дистанционном режиме. Поэтому целью научного исследования является разработка технологии лазерного сканирования при съемке очистных камер в ходе отработки месторождений золота подземным способом. В статье изложена технология применения лазерного сканирования при съемке очистных камер рудника, расположенного в Республике Бурятия. Полученный опыт имеет практическое применение, так как может быть полезен для съемки подземных пространств и очистных камер при отработке месторождений золота подземным способом.

Ключевые слова: маркшейдерско-геодезические съемки, лазерное сканирование, золоторудное месторождение, технология, полевые и камеральные работы, 3D-моделирование, точность, очистные камеры, безопасность

Для цитирования:

Писарев В. С., Ершов К. К. Опыт применения технологии Slam-сканирования для съемки очистных камер при отработке золоторудного месторождения «Зун-Холба» в Бурятии с использованием сканера Heron Lite. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 6. С. 5–17. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-5-17>

Application of SLAM scanning technology for surveying treatment chambers during the development of the Zun-Kholba gold ore deposit in Buryatia using the Heron Lite scanner

V. S. Pisarev^{1,2✉}, K. K. Yershov¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² N.V. Melnikov Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Abstract. Underground mining of gold ore deposits generates voids in the mined-out areas of the rock mass, where traditional worker access for mapping is prohibited due to safety risks. Recent advancements in mobile SLAM-based laser scanners enable remote, high-precision mine surveying and geodesy in such hazardous environments. The study develops and demonstrates a laser scanning protocol for surveying mined-out chambers during underground gold extraction at a mine in the Republic of Buryatia, Russia. The resulting methodology offers practical benefits for safe, efficient mapping of underground spaces in gold mining operations, enhancing operational planning and risk management.

Keywords: mine surveying and geodesy surveys, laser scanning, gold ore deposit, technology, field and office works, 3D modeling, accuracy, stopes, safety

For citation:

Pisarev V. S., Yershov K. K. (2025). Application of SLAM scanning technology for surveying treatment chambers during the development of the Zun-Kholba gold ore deposit in Buryatia using the Heron Lite scanner. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGIT] Vol. 30, No. 6.* pp. 5–17. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-5-17>

Введение

Лазерные сканеры, или как их еще часто называют, лидары, сравнительно недавно появились в практике маркшейдерии. Их применение во многом схоже с использованием в топографо-геодезических работах, но есть и отличия. По видам сканеры делятся на воздушные, наземные и подземные [1].

Пополнительная маркшейдерская съемка является востребованным классическим видом маркшейдерско-геодезических работ и широко освещена в открытой печати [2–4]. Ее актуальность не вызывает сомнений и обусловлена двумя основными факторами: масштабами и подземным способом добычи золота в Бурятии. Его добыча началась в 1844 г., спустя год после разрешения частным предпринимателям работать в Западном Забайкалье. Изначально золото добывали на приисках рек Бугарихта и Байчикан. К 1861 г. в регионе

насчитывалось 25 приисков, принадлежавших 11 золотопромышленным компаниям. В советский период золото добывали только из россыпей, годовой объем добычи составлял до 2 тонн. Сегодня доходы от золотодобычи являются основными для Бурятии. Обнаружено более 240 золотоносных месторождений с общими запасами 141,2 тонны и прогнозируемыми ресурсами в 2310 тонн. Бурятия занимает 10-е место в России и 3-е в Сибирском федеральном округе по добыче рудного золота [5].

Добыча золота в Бурятии ведется в основном подземным способом. Система разработки поэтажными штреками является распространенным вариантом для выемки рудных залежей, особенно когда речь идет о месторождениях со сложной формой и значительной мощностью. Применение этой системы сочетается с камерной отработкой, где очистные работы ведутся в больших камерах, выработанных в рудном теле [6]. Одним из основных негативных факторов указанной

технологии является образование пустот значительных размеров в выемочном пространстве, которые, безусловно, влияют на дальнейшую безопасную эксплуатацию рудника и на состояние горного массива в целом [7]. В условиях отработки месторождения подземным способом вероятность образования провалов связывают с устойчивостью пород кровли, высотой зоны обрушения и мощностью полезного ископаемого [8]. Очистные пространства, образующиеся в результате выемки руды на золоторудных месторождениях, представляют собой сложную задачу, влияющую на безопасность, эффективность и экономику горных работ. Их формирование сопряжено со следующими трудностями:

- неопределенность геометрии очистного пространства;

- риски безопасности;
- нестандартность съемки и картирования;
- экономическая неопределенность.

Неопределенность геометрии очистного пространства включает:

- разнообразие форм и размеров, что обусловлено неоднородностью рудного тела, методами отбойки и условиями залегания;

- динамику изменения формы и размеров очистных пространств по мере продвижения горных работ, что требует постоянного контроля и актуального редактирования планов и разрезов.

Риски безопасности включают:

- обрушение неустойчивых бортов и кровли выработанных пространств, что приводит к травмам и гибели персонала;

- угрозу образования провалов на поверхности, что представляет опасность для наземных объектов и инфраструктуры;

- загазованность.

Нестандартность съемки и картирования заключается:

- в больших размерах и труднодоступности очистных камер, что затрудняет их визуальный осмотр и контроль;

- ограниченности традиционных методов съемки вследствие их значительной продолжительности, неточности и проведения в опасных условиях выработанных пространств;

- необходимости точной и оперативной информации о геометрии выработок для обеспечения планирования, проектирования и контроля горных работ.

Экономическая неопределенность заключается:

- в отсутствии достоверной информации о форме и размерах очистных пространств, что определяет потери руды или перерасход взрывчатых материалов;

- невозможности точного прогнозирования объемов выемки и отработки, что приводит к неэффективному использованию ресурсов.

С учетом изложенного выше, традиционная технология дополнительной маркшейдерской съемки не обеспечивает решения указанной сложной задачи, влияющей на безопасность, эффективность и экономику горных и маркшейдерских работ. Поэтому сложилась проблемная ситуация между традиционной технологией ведения дополнительной маркшейдерской съемки при подземной добыче золота в Бурятии и современными достижениями развития геодезического приборостроения, обеспечивающего оперативность и автоматизацию измерений. Следовательно, целью научной работы является разработка технологии лазерного сканирования при съемке очистных камер в ходе отработки месторождений золота подземным способом на примере горнорудного предприятия «Холбинский». Эта технология недостаточно полно освещена в открытой печати [8–17].

Методика исследования

В настоящее время лазерное сканирование применяется для большого спектра маркшейдерско-геодезических работ, таких как: топографическая съемка, создание 3D-моделей горных выработок, мониторинг деформаций, создание съемочного и опорного обоснования, сканирование недоступных подземных полостей и решения других инженерно-геодезических задач.

Технология лазерного сканирования на протяжении десятков лет хорошо зарекомендовала себя при проведении съемочных работ на открытом пространстве, без использова-

ния лазерного сканирования уже невозможно представить выполнение исполнительских съемок или работ по созданию 3-мерных моделей карьеров или разрезов.

На данный момент ведутся разработки алгоритмов для ориентации внутри замкнутых пространств. Однако большинство из них ориентировано на использование в помещениях правильной геометрической формы сравнительно небольшой площади и соответственно, при небольших длинах полигонов [17].

Алгоритм HectorSLAM использует данные лидара и инерциальной навигационной системы, формируя таким образом двумерную модель окружающего пространства. Данный алгоритм не требует значительной вычислительной мощности и может применяться при уравнивании небольших полигонов, а также в сценариях, где необходима высокая скорость обновления данных [18].

GoogleCartografer выполняет двумерное построение модели окружающего пространства в виде сетки при помощи графов с расширением карты 5 см. Данный алгоритм позволяет успешно строить карту окружения, которое имеет похожие друг на друга участки, что обычно представляет сложность для остальных алгоритмов SLAM. Алгоритмы KartoSLAM, LagoSLAM также представляют собой графовые алгоритмы [19].

Технология лазерного сканирования для съемки очистных камер при отработке месторождений золота подземным способом заключается в создании проекта и проведении полевых и камеральных работ, которая представлена ниже:

1. Подготовительный этап.

Выбор типа мобильной платформы для проведения сканирования:

- ручное использование;
- на тележке / транспортном средстве;
- на БПЛА или другом устройстве.

Калибровка и настройка оборудования.

Определение зоны сканирования (забой, камера, штрек).

2. Полевые измерения.

Включение SLAM-системы и ориентирование в пространстве, сканирование исходных марок.

Сканирование выемочного пространства.

Алгоритм SLAM в реальном времени:

- сопоставление текущих и предыдущих наблюдений;
- оценка траектории (локализация);
- построение 3D-карты (mapping);
- коррекция дрейфа через loop closure (замыкание петель).

3. Постобработка.

Импорт данных в ПО (GeoSLAM Draw, NavVis IVION и др.).

Привязка к маркшейдерской опорной сети: ввод (2–3 известных точек).

Фильтрация шумов (оборудование, люди, пыль).

Генерация финальной 3D-модели:

- облако точек (в формате las);
- треугольная сетка (построение модели выемочного пространства);
- цветное/текстурное наложение.

4. Анализ и применение:

- экспорт модели в ГГИС;
- расчет объемов выработанного пространства;
- сравнение с проектными данными (проектной моделью);
- интеграция в цифровую модель шахты, используемую на руднике.

Таким образом, методы исследования включали анализ геологического строения участка, выбор очистной камеры для проведения экспериментов, изучение технических характеристик сканеров, методику проведения сравнительных измерений в условиях запыленности и отсутствия пыли, анализ влияния внешних факторов подземной среды и оценку стоимости и доступности оборудования [20].

В настоящее время сканер Heron, по мнению авторов, является одним из рациональных решений для быстрой и безопасной 3D-съемки, картографирования и визуализации съемки очистных камер на Зун-Холбинском руднике (рис. 1).



Рис. 1. Сканер Heron Lite

Необходимость его использования подтверждается следующими факторами. Во-первых, возможностью создания высокоточных цифровых 3-мерных моделей очистного пространства, что критически важно для детального картографирования выработок. Полученные модели позволяют с высокой точностью определять объемы выемки и остатков руды, контролировать геометрические параметры выработок, а также отслеживать динамику их изменения во времени. Это, в свою очередь, способствует оптимизации горных работ, более эффективному планированию и, как следствие, повышению производительности.

Во-вторых, применение мобильного лазерного сканирования существенно повышает безопасность выполнения съемки. В отличие от традиционных методов, требующих непосредственного присутствия маркшейдера в рабочей зоне, мобильное сканирование позволяет проводить измерения с безопасного расстояния, минимизируя риски, связанные с обрушениями, завалами и другими опасными условиями, характерными для очистных выработок. Это особенно важно в условиях высокой интенсивности горных работ и нестабильной геологической обстановки.

В-третьих, точность получаемых данных, достигаемая при использовании мобильного лазерного сканирования, значительно превосходит точность традиционных методов. Высокая детализация 3-мерных моделей позволяет выявлять мельчайшие особенности и отклонения от проектных параметров, что дает возможность своевременно реагировать на

возникающие проблемы и предотвращать их негативные последствия.

Heron Lite используется для эффективного и безопасного картографирования в режиме реального времени. Алгоритм позволяет при 360-градусном пространственном обзоре осуществлять сбор 3D-данных с помощью LiDAR, которые включают в себя калиброванные измерения расстояний лазерным дальномером. Его технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики лазерного сканера Heron Lite

Наименование	Характеристика
Метод измерения	Внутри/снаружи
Портативный	Да
Количество датчиков LiDAR	1
Измерение точек в секунду	300 000
Локальная точность	~ 3 см
Максимальное время работы от одной АКБ	3–8 ч
Рабочая температура	-10°; +45°

Основной критерий выбора применения технологии лазерного сканирования на Зун-Холбинском месторождении – ограниченный доступ в очистные камеры. Съемка горных выработок, в которых запрещается пребывание людей, выполняется после их приведения в безопасное состояние. Горные выработки большого сечения рекомендуется снимать с использованием лазерного сканера с пунктов съемочного обоснования, так как доступ персонала шахты в данные выработки закрыт. Длина, ширина, высота очистной камеры – 60, 22,5 и 15 м соответственно. Допустимый устойчивый пролет обнажения пород в заданных условиях принимается 22,6 м для мощности более 1,5 и 5,9 м и менее 1,5 м.

Для привязки нужно использовать минимум 2 точки, но для достижения наибольшей точности желательно не менее 3 точек. После привязки необходимо медленно следовать выбранной траектории и удерживать сканер на одной высоте, чтобы исключить ошибки сканирования по высотной отметке. По мере следования в забое к очистному пространству создается траектория движения и в реальном времени на планшете пользователя отображается результат съемки в виде разреженного облака точек (рис. 2). При съемке очистного простран-

ства лазерный сканер выдвигается на телескопической трубе внутрь камеры и удерживается в таком положении около 2–5 минут. В связи с системой обработки подэтажными штреками, для получения полноценной цифровой 3-мерной модели очистного пространства необходимо производить съемку как с верхнего, так и с нижнего горизонта.



Рис. 2. Результаты сканирования в Heron в режиме реального времени

После проведения сканирования очистного пространства выполняется камеральная обработка. Начинается процесс математической обработки в программном обеспечении Heron Lite, определение пунктов съемочного обоснования с редактированием высоты каждой точки на $-0,25$ метров (в учете размеров антенны сканера), затем нужно сшить измеренные пункты и пункты с отредактированными координатами [21, 22]. Суть данного процесса – в соединении измеренных пунктов с ранее существующими, координаты которых были загружены в программу. Далее в программе Cloud HERON Desktop необходимо выполнить обработку созданных траекторий, чтобы совместить точки сканирования на верхнем и нижнем горизонтах. Затем в программе CloudCompare производится корректировка облака точек, при необходимости – его фильтрация, и экспортируется в горно-геологическую информационную систему, в которой происходит создание каркасов выработанного пространства и встраивание полученной модели в единую цифровую модель горного предприятия.

На регулярной основе, но не реже чем раз в неделю, участковый маркшейдер готовит разрезы по фактической съемке отбитых вееров по проектным профилям. После этого выписывает на разрезе площади проектных и фактических

параметров очистного пространства, рассчитывает фактические потери и разубоживание [23].

Результаты и обсуждение

Реализация технологии лазерного сканирования для съемки очистных камер при обработке месторождений золота подземным способом осуществлена на золоторудном месторождении «Зун-Холба», которое находится в горах Восточного Саяна, в границах Республики Бурятия в Окинском районе (рис. 3).



Рис. 3. Схема расположения Зун-Холбинского месторождения

Рассмотрим подробнее работы по созданию геодезической основы на территории рудника, которые проводились с 1956 по 1961 г. одновременно с геологоразведочными работами. В 1991 г. проведены работы по обновлению топографической основы методом стереотопографической съемки. В настоящее время геодезическая основа представляет сеть пунктов триангуляции 4-го разряда и полигонометрии 1-го, 2-го разрядов. Использование местной системы координат для подходов пунктов штолен согласовано с Забайкальской территориальной инспекцией геодезического надзора в 1997 г. Используемая система высот – Балтийская. Центры на пунктах – скальные (марка в скале, выходящей на поверхность). Наружные знаки на всех пунктах сети – вехи высотой 2,5–3,0 м с тремя подпорками. Сгущение сети происходит от существующих пунктов опорной сети на поверхности, далее идут опорные маркшейдерские сети (ОМС) методом линейно-угловых построений (триангуляция, полигонометрия), а также с применением спутниковой геодезической аппаратуры глобальных навигационных систем. Таким образом, ОМС является комби-

нированным построением и используется при создании и развитии маркшейдерских съемочных сетей [24].

С учетом изучения и анализа горно-геологических и горнотехнических условий, а также характера оруднения запасов для подземной добычи, к рассмотрению приняты следующие системы разработки:

а) при мощности менее 1,5 м:

– с магазинированием руды блоками, мелкошпуровой отбойкой с применением самоходного оборудования;

– с нисходящей слоевой выемкой с твердеющей закладкой и применением самоходного оборудования;

б) при мощности более 1,5 м:

– подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды и применением самоходного оборудования;

– подэтажных штреков с торцевым выпуском руды и закладкой;

– подэтажных штреков.

По результатам экономического сравнения наиболее целесообразными для отработки запасов рудного тела считаются три системы: с магазинированием руды блоками, мелкошпуровой отбойкой с применением самоходного оборудования и подэтажных штреков. Система разработки подэтажных штреков с торцевым выпуском руды и закладкой по экономической эффективности близка к системе подэтажных штреков, поэтому их можно считать равнозначными. Остальные системы разработки также могут быть применены для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий [25]. Система разработки подэтажными штреками является распространенным вариантом для выемки рудных залежей, особенно когда речь идет о месторождениях со сложной формой и значительной мощностью. Применение этой системы сочетается с камерной отработкой, где очистные работы ведутся в больших камерах, выработанных в рудном теле. Важным показателем при этом является удельный вес камерных запасов, поскольку высокими технико-экономическими показателями характеризуется именно эта стадия работ – стадия отработки камерных запасов. Руда, оставляемая в целиках, или теряется безвозвратно, или отработывается с показателями значительно более низкими. Соотношение запасов руды в камерах и целиках предопределяется размерами несущих конструктивных элементов системы разработки – минимально допустимыми размерами междукамерных целиков с одной стороны и предельно допустимыми пролетами и площадями породных и рудных обнажений в камерах – с другой [26].

Параметры камер и целиков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические параметры очистных камер

Параметры	Значения, м
Пролет в камере (при мощности рудного тела более 1,5 м)	22,6
Пролет в камере (при мощности рудного тела менее 1,5 м)	5,9
Высота потолочины в междуэтажном целике (при мощности рудного тела более 1,5 м)	11
Высота потолочины в междуэтажном целике (при мощности рудного тела менее 1,5 м)	6
Высота междукамерного целика (при мощности рудного тела более 1,5 м)	14
Высота междукамерного целика (при мощности рудного тела менее 1,5 м)	8

Принятые параметры междуэтажного целика удовлетворяют условию прочности по величине сжимающих напряжений в центральной его части и условию предельной прочности по величине касательных (срезающих) напряжений, действующих в плоскости его контакта с вмещающими породами [27].

Система разработки имеет следующие достоинства:

– возможность разработки рудных тел сложной формы и различной мощности;

– позволяет эффективно вынимать большие объемы руды;

– подэтажные штреки обеспечивают удобный доступ к камерам и эффективную транспортировку руды.

Система разработки имеет следующие недостатки:

– требует высококвалифицированного и специального оборудования для производства работ;

- требует эффективной системы вентиляции из-за больших объемов выработанных пространств;
- необходимость контролировать качество крепи выработок и отсутствия заколов при плохой устойчивости пород, а также исключение обрушений;
- наличие технологии или систем программного обеспечения для точного картирования и визуализации очистных выработок.

На рис. 4 представлены построенные каркасы подземных горных выработок и очистных пространств, выделенные красным контуром в горно-геологической системе Micromine по результатам съемки, с использованием сканера Heron Lite.

Точность построенной модели выработанного пространства составила до 1 см. Время сканирования составило до 30 минут.

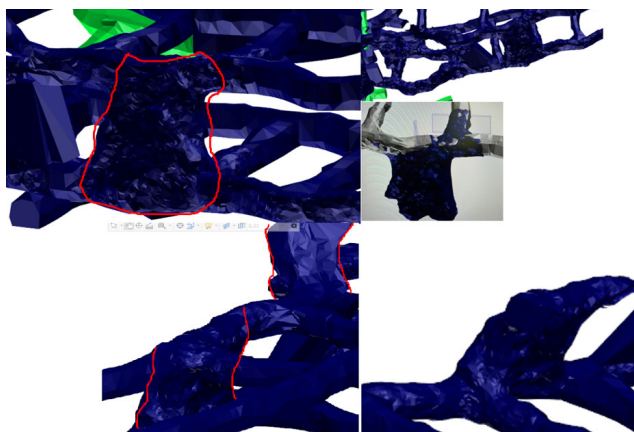


Рис. 4. Примеры построенных каркасов очистного пространства в ГГИС Micromine

Преимущества использования применяемого сканера для выполнения съемки очистных камер:

- скорость съемки и высокая производительность в сравнении с традиционными методами;
- выполнение работ в труднодоступных местах;
- безопасность, бесконтактная съемка;
- высокая детализация и точность.

Основным недостатком технологии лазерного сканирования очистных камер является

необходимость присутствия оператора сканера в очистном пространстве, что опасно и противоречит соблюдению техники безопасности. При использовании сканера Heron Lite область сканирования ограничена из-за того, что сканер нужно использовать на выдвижной штанге, а следовательно, такие участки, как «заколы», не попадут в область съемки.

В табл. 3 приводится сравнение традиционных маркшейдерско-геодезических измерений при функционировании подземного рудника и технологии Slam сканирования.

Таблица 3

Сравнительные критерии традиционных маркшейдерско-геодезических измерений и технологии SLAM-сканирования

Критерий	Маркшейдерско-геодезические измерения	SLAM-сканирование
Принцип работы	Геодезические приборы (тахеометры, теодолиты); измерения по опорной сети в руднике	Мобильные сенсоры; одновременная локализация и построение карты
Точность	Высокая: от 1 мм до 1–2 см	Средняя/умеренная: 1–10 см (зависит от системы и условий)

Критерий	Маркшейдерско-геодезические измерения	SLAM-сканирование
Скорость сбора данных	Низкая: требуется установка, визирование, запись по точкам	Высокая: сканирование сотен метров за минуты
Требуемая видимость	Обязательна прямая видимость между точками	Не требуется; работает в слепых зонах и извилистых выработках
Стоимость оборудования	Относительно низкая	Высокая
Безопасность работ	Персонал должен находиться в зоне измерений	Возможна работа без присутствия людей при использовании автономных устройств
Тип выходных данных	Координаты точек, планы горных выработок	3D-облако точек горной выработки или выемочного пространства
Объем охвата	Точечный или линейный (ходы)	Полный – все пространство выработки
Устойчивость к пыли/темноте	Затруднена работа в темноте и при сильной запыленности	Устойчива (особенно LiDAR-системы)
Области применения	Разбивка, съемка для отчетности, контрольные точки	Съемка горных выработок, мониторинг, 3-мерная визуализация объектов съемки, выемочные пространства

Заключение

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что мобильное лазерное сканирование благодаря своей гибкости, точности и безопасности представляет собой передовую технологию, которая открывает новые возможности для маркшейдерских работ в подземных условиях и способствует повышению эффективности и безопасности золотодобывающей промышленности.

2. Отмечено, что построение полноценных цифровых 3-мерных моделей очистных выработок в шахте с помощью лазерного сканирования имеет решающее значение для повышения эффективности и безопасности горных работ. Полученные модели дают точное и детальное представление о геометрии выработок, позволяя проводить расчеты объемов, оптимизировать планирование и контроль работ, а также эффективно управлять рисками, связанными с возможными обрушениями и другими опасными ситуациями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охотин А. Л. Применение лазерного сканирования в маркшейдерии. ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. С. 296–305.
2. Маркшейдерское дело. СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2016. 448 с.
3. Гусев В. Н., Волохов Е. М. Маркшейдерское обеспечение безопасности ведения горных работ вблизи опасных зон. СПб. : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. 60 с.
4. Роут Г. Н., Рогова Т. Б., Михайлова Т. В. Маркшейдерия. Кемерово : КузГТУ, 2019. 144 с.
5. Авдотьев А. Б. Отчет по результатам геологоразведочных работ по рудному телу «Глубокое» с оперативным подсчетом запасов. Улан-Удэ : Зун-Холбинское золоторудное месторождение, 2022. 156 с.

6. Батурин В. В. Геологическое строение и рудоносность Еравнинского золотоносного района : монография. Труды Института геологии и геофизики СО РАН, 74, 145-168. «Золотые просторы», 2023. 256 с.
7. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. Российская академия наук. Государственный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. СПб. : Межотраслевой научный центр ВНИМИ, 1998. 134 с.
8. Алтынцев М. А., Карпик А. П. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 121–139.
9. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск : СГГА, 2009. 261 с.
10. Бесимбаева О. Г., Рахатова А. Б. Мониторинг состояния объектов с помощью лазерного сканирования. Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXXVII Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 февраля 2024 г. Пенза : Наука и Просвещение, 2024. С. 19–21.
11. Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В. Использование лазерного сканирования для исследования геомеханического состояния бортов карьеров. Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 5-2 (5). С. 76–77.
12. Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г., Капасова А. З. Использование метода лазерного сканирования для выполнения маркшейдерских работ в шахтном стволе. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. С. 204–209.
13. Dong Z., Liang F., Yang B., Xu Y., Zang Y., Li J., Wang Y., Dai W., Fan H., Hyypä J., Stilla U. Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. V. 163. P. 327–342. DOI 10.1016/j.
14. Fuad N. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. International Archives of ISPRS. 2018 V. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
15. Gao Y., Huang X., Zhang F., Fu Z., Yang C. Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images. International Archives of ISPRS. 2015. V. XL-1/W4. P. 41–46. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.
16. Hussnain Z., Oude Elbernk S., Vosselman G. An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. International Archives of ISPRS. 2018. V. XLII-1. P. 203–209. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-1-203-2018.
17. Ким Е. В. Мобильное лазерное сканирование: новые горизонты в управлении очистными работами.
18. Богданова К. А. Применение алгоритмов Slam при построении трехмерной модели подземных горных выработок. Известия ТулГУ. 2021. Вып. 2. С. 134–140.
19. Kohlbrecher S. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation. 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Kyoto, Japan: IEEE, 2011. P. 155–160.
20. Арно В. В., Колесниченко Е. П., Гарифулина И. Ю., Миккельсен Е. А. Сканирующая тахеометрия в решении маркшейдерских задач при подземной отработке месторождения «Перевальное». Горная Промышленность. 2025. № 3. С. 40–44.
21. Hess W. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden: IEEE, 2016. P. 1271–1278.
22. Чибуничев А. Г., Велижев А. Б. Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 3. С. 112–119.

23. Самойлов Г. И., Петров А. С. Маркшейдерское обеспечение горных работ на Зун-Холбинском золоторудном месторождении: особенности и методы. Горный вестник Забайкалья, Чита : Горно-геологические исследования, 2021. Т. 21, № 3. 95 с.
24. Князев А. И., Лончаков С. Н., Пазий О. О., Соловицкий А. Н. Особенности топографо-геодезических работ для геологического обеспечения изучения участков недр на россыпное золото. Сб. материалов XIV Всероссийской 67 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ» 010202.1 19–22 апреля 2022 г. Кемерово : КузГТУ, 2022. С. 1–5.
25. Дорожкина Л. А. Систематика, структура и запасы золоторудных месторождений. М. : Астрей-Центр, 2009. 240 с.
26. Технология разработки золоторудных месторождений / Под ред. В. П. Неганова. М. : Недра, 1995. 336 с.
27. Касенов Р. К., Петров С. И. Интегрированные системы лазерного сканирования для динамического мониторинга очистных выработок: анализ алгоритмов и точностных характеристик. М. : Горная наука, 2013. 155 с.

REFERENCES

1. Okhotin A. L. (2009) Application of laser scanning in surveying *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]* V. 1, No. 1. P. 296–305 [in Russian].
2. *Marksheyderskoye delo [Surveying]*. (2016) Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University, 448 [in Russian].
3. Gusev, V. N., Volokhov E. M. (2013) *Marksheyderskoye obespecheniye bezopasnosti vedeniya gornykh rabot vblizi opasnykh zon [Surveying safety of mining operations near hazardous areas]* Saint Petersburg: National Mineral Resources University "Gorny", 60 [in Russian].
4. Routh G. N., Rogova T. B., Mikhailova T. V. (2019) *Marksheideria [Surveying]* Kemerovo: KuzSTU, 144 [in Russian].
5. Avdotyev, A. B. (2022) *Otchet po rezul'tatam geologorazvedochnykh rabot po rudnomu telu "Glubokoye" s operativnym podschetom zapasov [Report on the results of geological exploration of the Glubokoe ore body with an operational calculation of reserves]*. – Ulan-Ude: Zun-Kholbinskoye gold deposit, 156 [in Russian].
6. Baturin, V. V. (2023) Geological structure and ore content of the Yeravninsky gold-bearing region. The monograph *Trudy Instituta geologii i geofiziki SO RAN [Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics]* SB RAS, 74, 145-168. "Golden Expanses", 256 [in Russian].
7. Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits (1998) Rossiyskaya *Akademiya Nauk Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy institut gornoy geomekhaniki i marksheyderskogo dela [Russian Academy of Sciences State Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying]* St. Petersburg: VNIMI Interdisciplinary Research Center, 134 [in Russian].
8. Altyntsev, M. A., Karpik A. P. (2020) Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities of oil and gas production complexes using ground-based laser scanning *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 25(2), 121-139 [in Russian].
9. Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov D. V., Shirokova T. A. (2009) *Nazemnoye lazernoye skanirvaniye [Ground-based laser scanning]*. Novosibirsk: SGGGA Publ., 261 [in Russian].
10. Besimbayeva O. G., Rakhatova A. B. (2024) Monitoring the condition of objects using laser scanning *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey XXXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 20 fevralya 2024 goda [Modern scientific research: current issues, achievements and innovations: collection of articles of the XXXVII International Scientific and Practical Conference, Penza, February 20, 2024]*. Penza: Science and Education, 19-21 [in Russian].

11. Zarovnyaev, B. N., Shubin G. V., Vasiliev I. V. (2012) The use of laser scanning to study the geomechanical condition of the sides of quarries *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. [International Scientific Research Journal]*, № 5-2(5), 76-77 [in Russian].

12. Luft S. K., Besimbayeva O. G., Besimbaev N. G., Kapasova A. Z. (2015) Using the laser scanning method to perform mine surveying operations *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]* 204-209 [in Russian].

13. Dong Z., Liang F., Yang B., Xu Y., Zang Y., Li J., Wang Y., Dai W., Fan H., Hyypä J., Stilla U. (2020) Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, V. 163, 327–342. DOI 10.1016/j.

14. Fuad N. (2018) Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *International Archives of ISPRS*. 2018 V. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.

15. Gao Y., Huang X., Zhang F., Fu Z., Yang C. (2015) Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images. *International Archives of ISPRS*, V. XL-1/W4. P. 41–46. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.

16. Hussnain Z., Oude Elbernk S., Vosselman G. (2018) An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. *International Archives of ISPRS*, V. XLII-1. P. 203-209. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-1-203-2018.

17. Kim, E. V. Mobile laser scanning: new horizons in the management of cleaning operations [in Russian].

18. Bogdanova K. A. (2021) Application of Slam algorithms in constructing a three-dimensional model of underground mining operations, *Izvestiya TulsU [News of Tula State University]*, v. 2. P. 134-140 [in Russian].

19. Kohlbrecher S. (2011) A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Kyoto, Japan: IEEE* P. 155–160.

20. Arno V. V., Kolesnichenko E. P., Garifulina I. Yu., Mikkelsen E. A. (2025) *Skanirovaniye takheometriya v reshenii marksheyderskikh zadach pri podzemnoy otrabotke mestorozhdeniya «Pereval'noye», «Gornaya Promyshlennost'» [Scanning tacheometry in solving surveying tasks during underground mining of the Perevalnoye deposit, Mining Industry]* No. 3. Pp. 40–44 [in Russian].

21. Hess W. (2016) Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden: IEEE*, 2016. P. 1271–1278.

22. Chibunichev A. G., Velizhev A. B. (2008) Automatic comparison of point clouds obtained as a result of ground-based laser scanning *Geodeziya i aerofotos'yemka [Geodesy and aerial photography]*, No. 3. Pp. 112–119.

23. Samoilov, G. I., Petrov A. S. (2021) Surveying support for mining operations at the Zun-Kholbinsky gold deposit: features and methods. *Gornyy vestnik Zabaykal'ya, Chita : "Gorno-geologicheskiye issledovaniya" [Mining Bulletin of Transbaikalia, 21(3). Chita : Mining and Geological Research]*, 95 [in Russian].

24. Knyazev, A. I., Lonchakov S. N., Pazyi O. O., Solovitsky A. N. (2022) Features of topographic and geodetic works for geological support of the study of subsurface areas for placer gold *Sb. materialov XIV Vserossiyskoy 67 nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh «ROSSIYA MOLODAYA» 010202.1 19-22 aprelya 2022 g. – Kemerovo: KuzGT [Collection of materials of the XIV All-Russian 67th scientific and practical conference of young scientists "YOUNG RUSSIA" 010202. April 1, 19-22, 2022. Kemerovo: KuzSTU]*, 1-5 [in Russian].

25. Dorozhkina L. A. (2009) *Sistematika, struktura i zapasy zolotorudnykh mestorozhdeniy [Systematics, structure and reserves of gold deposits]* Moscow: Astrea-Center, 240 [in Russian].

26. *Tekhnologiya razrabotki zolotorudnykh mestorozhdeniy [Technology for the development of gold deposits]* (1995) Edited by V. P. Neganov, Moscow: Nedra Publ., 336 [in Russian].

27. Kasenov, R. K., Petrov S. I. (2013) *Integrirrovannyye sistemy lazernogo skanirovaniya dlya dinamicheskogo monitoringa ochistnykh vyrobotok: analiz algoritmov i tochnostnykh kharakteristik [Integrated laser scanning systems for dynamic monitoring of sewage treatment plants: analysis of algorithms and accuracy characteristics]*. Moscow: Gornaya Nauka Publ., 155 [in Russian].

Об авторах

Виктор Семенович Писарев – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Кирилл Константинович Ершов – маркшейдер, кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Author details

Viktor S. Pisarev – Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Kirill K. Yershov – Surveyor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Получено / Received 24.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.11.2025

Принята к публикации / Accepted 01.12.2025