

СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА СДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

И. М. Величко✉

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ ivan.velichko98@gmail.com

Аннотация: Рассматриваются два метода наблюдений за деформациями земной поверхности: спутниковая радарная интерферометрия и воздушное лазерное сканирование. Данные методы наблюдения за деформациями бортов, откосов карьеров и разрезов непрерывно совершенствуются. Деформации бортов и откосов могут быть причиной появления аварий и несчастных случаев. Следовательно, возникает необходимость более подробного изучения вопроса применения радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования при наблюдении за деформациями земной поверхности. Актуальность сравнительного анализа указанных методик заключается в том, что улучшение их характеристик заметно ускоряет выполнение маркшейдерских работ, повышает точность результатов измерений и снижает риски появления негативных последствий из-за деформационных процессов. Вместе с тем в работе достаточно подробно описаны основные принципы выполнения маркшейдерских измерений с помощью этих методов. Рассмотрены факторы, влияющие на повышение эффективности спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования.

Ключевые слова: открытые горные работы, лазерное сканирование, радарная интерферометрия, деформации, карьер, разрез, точность измерений

Благодарности: Автор выражает благодарность научному руководителю канд. техн. наук, доценту кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСИС» Г. О. Абрамяну за ценные рекомендации и указания при подготовке статьи.

Для цитирования: Величко ИМ. Сравнение лазерного сканирования и радарной интерферометрии при наблюдении за сдвигами земной поверхности на открытых горных работах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):10-15. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-10-15>.

COMPARISON OF LASER SCANNING AND RADAR INTERFEROMETRY IN OBSERVING THE MOVEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE IN OPEN-PIT MINING

I. M. Velichko✉

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russian Federation
✉ ivan.velichko98@gmail.com

Abstract: The article discusses two methods of observing deformations of the Earth's surface – satellite radar interferometry and aerial laser scanning. These methods of monitoring deformations of sides, slopes of quarries and sections are continuously being improved. Deformations of the sides and slopes can cause accidents and accidents. Therefore, there is a need for a more detailed study of the use of radar interferometry and airborne laser scanning in observing deformations of the Earth's surface. The relevance of the comparative analysis of these techniques lies in the fact that improving their characteristics will significantly accelerate the performance of surveying work, increase the accuracy of measurement results and reduce the risks of negative consequences due to deformation processes. At the same time, the paper describes in sufficient detail the basic principles of performing surveying measurements using these methods. The factors influencing the increase in the efficiency of satellite radar interferometry and airborne laser scanning are considered.

Keywords: open-pit mining, laser scanning, radar interferometry, deformations, quarry, incision, measurement accuracy

Acknowledgments: The author expresses gratitude to his scientific supervisor, PhD, Associate Professor of the Department of Geology and Surveying at the NUST MISIS Mining Institute, G. O. Abramyan, for valuable recommendations and guidance in preparing the article.

For citation: Velichko IM. Comparison of laser scanning and radar interferometry in observing the movements of the earth's surface in open-pit mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):10-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-10-15>.

Введение

В настоящее время существует большое количество научных работ, в которых постоянно поднимаются вопросы определения величин деформаций земной поверхности, уступов, линейных инженерных объектов и других сооружений, находящихся в зоне влияния открытых горных работ. Решение маркшейдерских задач по определению этих деформаций проводится с помощью различных современных методов, где особое место занимают воздушное лазерное сканирование и спутниковая радарная интерферометрия.

Известно, что деформация земной поверхности при проведении открытых горных работ приводит к негативным последствиям, а порой и к катастрофическим явлениям. Поэтому выполнение маркшейдерских работ с помощью современных высокоточных методов позволит понять характер проявления и развития возникающих деформационных процессов.

В работе [1] установлено, что 3D-лазерное сканирование позволяет не только своевременно, эффективно и комплексно отслеживать деформации уступов, но и получать достоверные данные об их проявлении. Более того, оно может играть существенную роль в предотвращении оползней и раннем оповещении о них, обеспечивая безопасность людей и их имущества.

Радарная интерферометрия применяется на угледобывающих предприятиях. В последние годы благодаря таким характеристикам, как высокая точность, высокое разрешение, непрерывность, технология интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR) быстро развивалась и стала одним из наиболее часто используемых методов измерений в больших пространственных масштабах [2]. Кроме того, InSAR позволяет выявить ранее неизвестные области проседания грунта [3].

Согласно «Правилам обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», проведение маркшейдерских наблюдений в составе мониторинга устойчивости осуществляется в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ. При этом визуальные наблюдения производятся не реже одного раза в месяц. На карьерах инструментальные наблюдения за деформациями бортов, уступов, откосов проводятся перед началом работ по выемке полезного ископаемого. Порядок и цикличность наблюдений определяются проектом производства маркшейдерских работ и уточняются в зависимости от степени развития отработки месторождения. Наряду с этим периодичность наблюдений должна быть не реже одного раза в год.

Объекты исследования: спутниковая радарная интерферометрия и воздушное лазерное сканирование.

Цель исследования: сравнение характеристик спутниковой радарной интерферометрии с характеристиками воздушного лазерного сканирования.

Методы исследования

Анализ возможностей использования в маркшейдерской деятельности спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования при добыче полезных ископаемых открытым способом основывается на обзоре научно-технической информации отечественных и зарубежных авторов, который позволил оценить точности измерений, условия применения, преимущества и недостатки, и факторы, влияющие на эффективность применения этих методов.

Принцип действия метода спутниковой радарной интерферометрии и его характеристики

Комплекс измерений, проводимых с помощью спутниковой радарной интерферометрии, основывается на принципе интерференции электромагнитных волн. Информация о величинах высотных отметок земной поверхности образовывается и собирается благодаря концепции сопоставления фаз отраженного радиолокационного сигнала, а не координат точек, находящихся на двух изображениях объекта наблюдений [4].

Принцип радарной интерферометрии заключается в следующем: радиоволны с частотой 10–17 ГГц направляются в сторону исследуемого объекта. Одна часть поглощается, а другая отражается и регистрируется радаром. Сведения о смещениях и сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала получают благодаря сравнению информации, полученной в разные промежутки времени [5].

На рисунке 1 показана принципиальная схема спутниковой радарной интерферометрии на карьере.

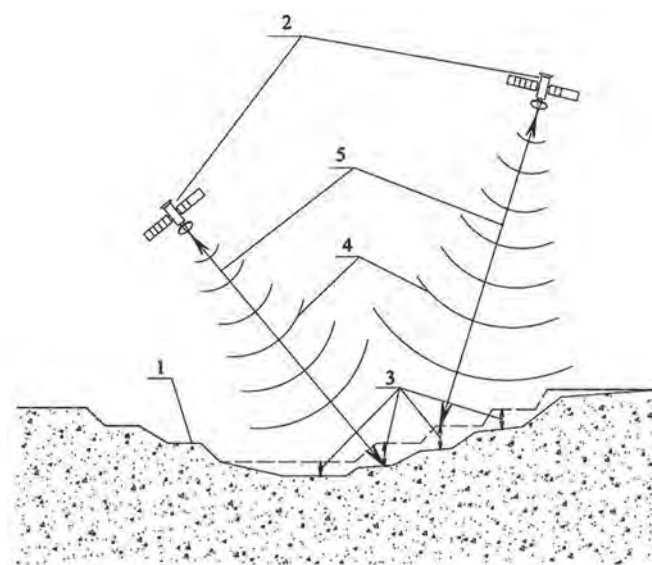


Рис. 1. Принцип спутниковой радарной интерферометрии: 1 – карьер;

2 – спутники; 3 – вертикальное смещение; 4 – радиоволны;

5 – направленный и отраженный сигналы /

Fig. 1. The principle of radar interferometry: 1 – quarry; 2 – satellites; 3 – vertical displacement; 4 – radio waves; 5 – directional and reflected signals

Для проведения работ с помощью спутниковой радарной интерферометрии необходимые исходные данные в виде радиолокационных снимков получают со спутников Sentinel-1. Снимки, полученные с этих спутников, предоставляет Европейское космическое агентство через Sentinel Scientific Data Hub (SSDH) [6].

С помощью данного метода можно определить отдельные районы, где проявление смещений наиболее существенно. Кроме того, его применение дает высокую точность определения скорости смещений от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров. Так, в работе [7] приведен пример применения спутниковой интерферометрии при оценке смещений в г. Пыть-Ях. Точность измерений составила 3 см, а скорость поднятия по результатам наблюдений – 25 мм/год.

К тому же существует опыт применения радарной интерферометрии при мониторинге деформаций на Верхнесилезском угольном бассейне в Польше [8].

В современных маркшейдерских работах спутниковая радарная интерферометрия применяется как дополнительный инструмент в составе комплексных наблюдений за деформациями объектов. Как итог совокупное применение радарной интерферометрии и традиционных методов мониторинга актуально при решении таких задач, которые требуют точности и достоверности информации [9].

Преимуществами спутниковой радарной интерферометрии в сравнении с традиционными методами являются:

- большая площадь охвата наблюдений;
- дистанционное определение смещений на всем исследуемом участке;
- использование спутниковых данных для определения смещений [10].
- отсутствие влияния погодных условий и времени суток на сбор интерферометрических снимков [11].

Однако данный метод предполагает использование поверхностей с высоким коэффициентом отражения, что является его недостатком [12].

Существуют причины, усложняющие использование радарной интерферометрии. Например, густая растительность негативно воздействует на полученные результаты и сопоставляемые изображения. Сильная раздробленность рельефа также может быть причиной появления невидимых участков местности на полученных изображениях поверхности [13].

Традиционная методика проведения радарной интерферометрии обеспечивает точность определения вертикальных смещений в диапазоне 20–30 мм на основе пары изображений, полученных в процессе съемки. Методика исследований на основе сети стационарных точек (InSAR) позволяет добиться точности в пределах 3–5 мм [14].

В спутниковой радарной интерферометрии на практике применяются длины волн, находящиеся в диапазоне от 1 мм до 1 м. Фаза колебаний определяется за счет расстояния до цели. Точность определения этого расстояния соответствует длине волны и зависит от нее. То есть чем меньше длина волны радиосигнала, тем выше точность определения расстояния до объекта [15].

Истинные значения вертикальных смещений определяются без учета горизонтальных смещений. При этом расположение спутника и его ориентировка относительно Земли оказывает влияние на точность наблюдений за вертикальными смещениями [16].

Принцип действия метода воздушного лазерного сканирования и его характеристики

Воздушное лазерное сканирование – очень результативный метод. Он позволяет получать необходимую информацию об объектах за счет высокой плотности измерений [17]. Данный вид сканирования производится с беспилотного летательного аппарата. Для сравнения при наземном лазерном сканировании окружающая среда сканируется из фиксированной точки [18].

Создание и определение базовых станций наземной геодезической основы воздушного лазерного сканирования производят согласно СП 317.1325800.2017. Данный нормативный документ содержит в себе требования, которыми нужно руководствоваться при закреплении на местности опорных знаков и определении их координат.

Лазерное сканирование – это метод, при котором происходит высокоскоростное проведение тахеометрической съемки. Отличие от съемки обычным тахеометром заключается в том, что сканер позволяет выполнить съемку объекта за короткий промежуток времени, в то время как тахеометр способен определить расположение лишь нескольких отдельных точек [19].

На рисунке 2 показан принцип воздушного лазерного сканирования.

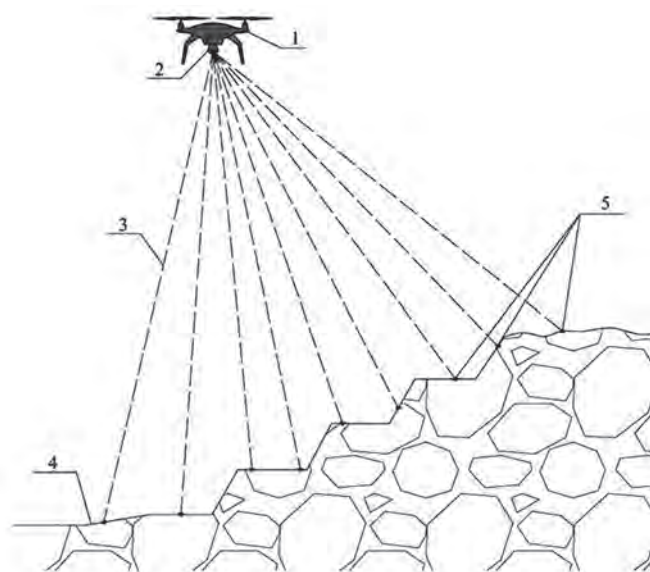


Рис. 2. Принцип воздушного лазерного сканирования:

- 1 – беспилотный летательный аппарат; 2 – лазерный сканер;
3 – направление лазерного пучка; 4 – карьер;
5 – образующееся облако точек /

Fig. 2. The principle of aerial laser scanning: 1 – unmanned aerial vehicle;
2 – a laser scanner; 3 – the direction of the laser beam; 4 – a quarry;
5 – a cloud of dots forming

Для выполнения лазерного сканирования создается геодезическое обоснование, состоящее из сети опорных пунктов, установленных вблизи объекта исследования. Координаты пунктов заранее определяются за счет спутниковых измерений [20].

Скорость измерений при использовании данного метода может достигать нескольких сотен тысяч и миллионов точек в секунду. Такие высокие значения скорости достигаются за счет лазерного дальномера, установленного в сканере. При проведении сканирования точек объекта определяются пла-

новые координаты X и Y , высотная Z и интенсивность сигнала, который отражается от поверхности. В результате создается «облако точек». При камеральной обработке «облако точек» с помощью специальных программных обеспечений преобразовывается в трехмерную модель объекта наблюдений [21]. Эти модели позволяют отслеживать изменения формы объектов в зависимости от времени, что, в свою очередь, дает представление о характере и интенсивности возникающих вертикальных и горизонтальных смещений, а также других деформаций.

К основным преимуществам лазерного сканирования относятся:

- выполнение съемок объектов, доступ к которым затруднен;
- возможность проведения работ в местах, где пребывание людей запрещено или нецелесообразно;
- исключение ситуаций, при которых различные внешние факторы оказывают негативное влияние на результаты измерений, что достигается благодаря автоматизации большинства процессов сканирования;
- доведение до минимума полевых работ [22].

Также к плюсам этого метода можно отнести большую концентрацию измеряемых точек, дистанционное измерение, высокую точность и скорость [23]. Большим преимуществом метода является возможность проводить работы в темное время суток [24].

Недостатком воздушного лазерного сканирования является снижение детальности съемки вертикальных поверхностей [25]. Природные факторы, такие как сезонность, погодные условия, снежный покров, ограничивают применение этого метода [26].

Лазерное сканирование также может применяться для определения значений деформаций, возникающих на бортах карьеров [27]. Так, например, на карьере «Кентобе» (Казахстан) определялись смещения карьера. Измерения производились с помощью лазерного сканера. В результате было выяснено, что на точность измерений оказывают угол откоса уступов, их форма и строение.

В работе [12] говорится о том, что лазерное сканирование применяется на территориях, размеры которых могут превышать 30 км. Точность воздушного лазерного сканирования составляет 80–100 мм.

Результаты и их обсуждение

Обзор и анализ научных исследований позволил систематизировать характеристики рассмотренных выше методов. На основании преимуществ, недостатков и других характеристик были выявлены факторы, которые влияют на эффективность радарной интерферометрии и лазерного сканирования. Эти факторы представлены в таблице.

Размеры исследуемой территории и темное время суток не влияют на эффективность радарной интерферометрии и лазерного сканирования.

Погодные условия и сезонность отрицательно влияют на качество полученных результатов с помощью лазерного сканирования, но не снижают эффективность радарной интерферометрии.

Качество спутниковых данных может как снижать, так и увеличивать точность результатов радарной интерферометрии. Это зависит от выбора исходных спутниковых снимков.

Спутниковые радарные снимки никак не влияют на эф-

фективность лазерного сканирования, так как попросту не применяются при использовании данного метода.

Применение дистанционных технологий при выполнении наблюдений за смещениями земной поверхности снижает длительность выполнения работ с помощью радарной интерферометрии и лазерного сканирования и в целом положительно влияет на качество полученных результатов.

Таблица / Table

Факторы, влияющие на эффективность спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования / Factors affecting the effectiveness of satellite radar interferometry and airborne laser scanning

Фактор / Factor	Зависимость повышения эффективности применения методов от различных факторов / The dependence of increasing the effectiveness of the methods on various factors	
	Спутниковая радарная интерферометрия / Satellite radar interferometry	Воздушное лазерное сканирование / Aerial laser scanning
Величина исследуемой территории	Не зависит	Не зависит
Темное время суток	Не зависит	Не зависит
Погодные условия	Не зависит	Зависит
Использование спутниковых данных	Зависит	Не зависит
Густая растительность	Зависит	Зависит
Дистанционное проведение работ	Зависит	Зависит
Отражаемость поверхности	Зависит	Зависит
Сезонность	Не зависит	Зависит
Раздробленность рельефа	Зависит	Зависит

Густая растительность, раздробленность рельефа и отражаемость поверхности объекта наблюдений являются причиной появления участков, из которых невозможно получить полные данные о смещениях земной поверхности и деформациях инженерных сооружений в зоне ведения горных работ. Следовательно, данные факторы негативно влияют на эффективность применения радарной интерферометрии и лазерного сканирования.

Воздушное лазерное сканирование менее точно, чем радарная интерферометрия. Поэтому данный метод может применяться для выполнения топографической съемки карьера и близлежащих территорий, где не требуется миллиметровая точность измерений. С помощью лазерного сканирования также имеется возможность определять значения деформаций карьерных бортов, земной поверхности, различных инженерных сооружений.

Согласно СП 11-104-97, максимально предельная погрешность определения превышений на станции при построении геодезической основы не должна превышать 5 мм. Значения точности метода InSAR спутниковой радарной интерферометрии не превышают указанных в нормативном документе значений. Следовательно, метод InSAR может применяться для создания геодезической разбивочной основы в качестве дополнения к наземным инструментальным.

Оба метода имеют общие преимущества – возможность выполнения съемки обширных территорий и автоматизация выполнения работ. Общим недостатком рассматриваемых методов является то, что положение спутника или сканера относительно наблюдаемого объекта в некоторых случаях может быть причиной появления пустых зон.

У обоих методов существуют как общие характеристики, так и некоторые различия. Поэтому там, где воздушное лазерное сканирование не дает достаточного количества точной информации, применение радарной интерферометрии может с необходимой и достаточной полнотой восполнить пробелы, имеющиеся у лазерного сканирования. В зависимости от различных факторов воздушное лазерное сканирование может дополнять спутниковую радарную интерферометрию.

Заключение

1. В статье приведены основные факторы, которые влияют на результативность применения радарной интерферометрии и лазерного сканирования. Также представлено подробное описание характеристик и принципов действия данных методов.

2. Определены ситуации и условия, при которых наиболее эффективно применение радарной интерферометрии или лазерного сканирования. Ситуации, при которых данные методы взаимодополняют друг друга, будут определяться непосредственно на практике.

3. Выявлены общие преимущества и недостатки рассматриваемых методов наблюдений за сдвигами земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Guo Y, Li X, Ju S, et al. Utilization of 3D Laser Scanning for Stability Evaluation and Deformation Monitoring of Landslides. *Journal of Environmental and Public Health*. 2022;2:1-14. DOI: 10.1155/2022/8225322.
- Yao J, Yao X, Wu Z, et al. Research on Surface Deformation of Ordos Coal Mining Area by Integrating Multitemporal D-InSAR and Offset Tracking Technology. *Journal of Sensors*. 2021;4:1-14. DOI: 10.1155/2021/6660922.
- Wang Z, Zhang J, Yu Y, et al. Monitoring, Analyzing, and Modeling for Single Subsidence Basin in Coal Mining Areas Based on SAR Interferometry with L-Band Data. *Scientific Programming*. 2021;6:1-10. DOI: 10.1155/2021/6662097.
- Дудников ВЮ. Мониторинг земной поверхности в районах интенсивного недропользования ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» на основе метода спутниковой радарной интерферометрии. Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых тяжёлых нефтей: мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. Ухта, 2022: 192-5. [Dudnikov VYu. Monitoring of the Earth's surface in areas of intensive subsoil use by LUKOIL-Komi LLC based on the method of satellite radar interferometry. *Problems of geology, field development and operation, transport and processing of hard-to-recover heavy oils, Materials of the All-Russian scientific and technical conference*. Ukhta, 2022: 192-5 (In Russ.).]
- Шаворин ВА, Кулешов АЕ. Современные методы наземной интерферометрии при мониторинге прибортовых массивов на открытых горных работах. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2021;1:111-8. [Shavorin VA, Kuleshov AE. Modern methods of ground-based interferometry for monitoring instrument arrays in open-pit mining. *Interekspo GEO-Sibir*. 2021;1:111-8. (In Russ.).] DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-111-118.
- Чурсин ИН. Спутниковый мониторинг сдвижения подработанной земной поверхности в Кузбассе с использованием радарной интерферометрии. *Маркшейдерский вестник*. 2021;4:56-60 [Chursin IN. Satellite monitoring of the displacement of the damaged Earth's surface in Kuzbass using radar interferometry. *Mine surveyors bulletin*. 2021;4:56-60 (In Russ.).]
- Мисюрёв ДА, Васильев ЮВ, Иноземцев ДП. Анализ результатов маркшейдерско-геодезических наблюдений на Пыть-Яхском геодинамическом полигоне. *Нефть и газ*. 2020; 1:30-41. [Misyurev DA, Vasiliev YV, Inozemtsev DP. Analysis of the results of surveying and geodetic observations at the Pyt-Yakh geodynamic polygon. *Oil end Gaz*. 2020;1:30-41 (In Russ.).]
- Pawłuszek-Filipiak K, Borkowski A. Mining-induced tremors in the light of deformations estimated by satellite SAR interferometry in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Procedia Computer Science*. 2021;181:685-92.
- Дудников ВЮ, Власов АС, Ланина ТД. Мониторинг земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе метода спутниковой радарной интерферометрии. *Успехи современного естествознания*. 2022;2:54-9. [Dudnikov VY, Vlasov AS, Lanina TD. Monitoring of the Earth's surface in areas of intensive subsurface use based on the method of satellite radar interferometry. *The success of modern natural science*. 2022;2:54-9 (In Russ.).]
- Акматов ДЖ, Николайчук ВВ, Тихонов АА, Шевчук РВ. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;1:144-7. [Akmatov DJ, Nikolaichuk VV, Tikhonov AA, Shevchuk RV. Radar interferometry as an addition to the classical methods of observing the movement of the Earth's surface. *Mining*. 2020;1:144-7 (In Russ.).] DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.
- Нафиева ЕН, Грецишев АВ. Космические радиолокационные системы мониторинга земли. *Экология. Экономика. Информатика*. 2020;2(5):89-95. [Nafieva EN, Grechishchev AV. Space radar earth monitoring systems. *Ecology. Economy. Computer science*. 2020;2(5):89-95 (In Russ.).] DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-89-95.
- Шевчук РВ, Маневич АИ, Акматов ДЖ и др. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022;5:99-104. [Shevchuk RV, Manevich AI, Akmatov DJ, et al. Modern methods, techniques and technical means of monitoring the movements of the Earth's crust. *Mining*. 2022;5:99-104. (In Russ.).]
- Энтин АЛ, Михайлюкова ПГ, Кедич АИ и др. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши. *Геоморфология*. 2022;53(2):27-42. [Entin AL, Mikhailyukova PG, Kedich AI, et al. Modern experience of using radar interferometry to record changes in elevation of the land surface. *Geomorphology*. 2022;53(2):27-42. (In Russ.).]
- Арсеньев-Образцов СС, Поздняков АП. Применение метода радарной спутниковой интерферометрии InSAR для решения задач промысловой геологии и разработки нефтегазовых месторождений. *Горная промышленность*. 2020;3:38-44. [Arsenyev-Obraztsov SS, Pozdnyakov AP. Application of the InSAR radar satellite interferometry method for solving problems of field geology and development of oil and gas fields. *Mining*. 2020;3:38-44 (In Russ.).]
- Илюхин ДА, Новоженин СЮ, Выстрчил МГ, и др. Оценка возможности применения интерферометрии устойчивых отражателей для контроля сдвижений бортов карьера. *Маркшейдерский вестник*. 2022;2:41-6. [Ilyukhin DA, Novozhenin SYu, Vystrechil MG, et al. Evaluation of the possibility of using stable reflector interferometry to control the movement of the sides of the quarry. *Mine surveyors bulletin*. 2022;2:41-6 (In Russ.).]

16. Кузьмин ДК. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем PCA (на примере мониторинга месторождений нефти и газа). *Проблемы недропользования*. 2021;2:94-104. [Kuzmin DK. Modeling of the Earth's surface displacements obtained by various satellites with the built-in PCA module (using the example of monitoring oil and gas fields). *Problems of subsoil use*. 2021;2:94-104. (In Russ.)]. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.094.
17. Васанов АЕ, Шляхова ММ. Метод воздушного лазерного сканирования. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;4(1):162-6. [Vasanov AE, Shlyakhova MM. Method of aerial laser scanning. *Interexpo GEO-Sibir*. 2023;4(1):162-6. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-162-166.
18. Sarvesh Kumar Singh, Bikram Pratap Banerjee, Simit Raval. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023;33:133-54.
19. Шереметинский АВ, Бударова ВА, Мартынова НГ и др. Применение наземного лазерного сканирования в государственном кадастре недвижимости. *Московский экономический журнал*. 2021;4:53-8. [Sheremetinsky AV, Budarova VA, Martynova NG, et al. The use of ground-based laser scanning in the state real estate cadaster. *Moscow Economic Journal*. 2021;4:53-8. (In Russ.)]. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10240.
20. Ханнанов РР. Лазерное сканирование для определения насыпных дамб. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;1:149-53. [Hannanov RR. Laser scanning for the determination of bulk dams. *Interexpo GEO-Sibir*. 2023;1:149-53. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
21. Аникаева АД, Мусихин ВВ, Столбов ИА, и др. Современные геодезические и маркшейдерские технологии, применяемые при разработке нефтяных и газовых месторождений. *Master's journal*. 2022;2:68-87. [Anikaeva AD, Musikhin VV, Stolbov IA, et al. Modern geodetic and surveying technologies used in the development of oil and gas fields. *Master's journal*. 2022;2:68-87. (In Russ.)].
22. Кулеш АА. Возможности и преимущества лазерного сканирования при 3D-проектировании промышленных объектов. *Инновации и инвестиции*. 2023;2:265-7. [Kulesh AA. Possibilities and advantages of laser scanning in 3D design of industrial facilities. *Innovation and investment*. 2023;2:265-7. (In Russ.)].
23. Мусина ГА. Сравнительный анализ современных методов деформационного мониторинга. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;4(2):82-90. [Musina GA. Comparative analysis of modern methods of deformation monitoring. *Interexpo GEO-Sibir*. 2023;4(2):82-90. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-2-82-90.
24. Гура ДА, Дубенко ЮВ, Марковский ИГ. Мониторинг объектов транспортной инфраструктуры с применением сканирующих технологий. *Технологии техносферной безопасности*. 2020;2:74-86. [Gura DA, Dubenko YuV, Markovsky IG. Monitoring of transport infrastructure facilities using scanning technologies. *Technologies technosphere safety*. 2020;2:74-86. (In Russ.)]. DOI: 10.25257/TTS.2020.2.88.74-86.
25. Каминская ТА. Лазерные сканирующие системы. *Инновации. Наука. Образование*. 2021;45:125-7. [Kaminskaya TA. Laser scanning systems. *Innovation. Science. Education*. 2021;45:125-7. (In Russ.)].
26. Долгополов ДВ, Бабарыкин МЮ, Жидиляева ЕВ, и др. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте. *Мониторинг. Наука и технологии*. 2022;2:25-34. [Dolgopolov DV, Babarykin MYu, Zhilyaeva EV, et al. Application of airborne laser scanning technology during geotechnical monitoring in pipeline transport. *Monitoring. Science and Technology*. 2022;2:25-34. (In Russ.)]. DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003.
27. Бесимбаева ОГ, Низаметдинов ФК, Олейникова ЕА. Использование технологий лазерного сканирования в наблюдениях за деформациями бортов карьеров. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020;1(1):152-60. [Besimbayeva OG, Nizametdinov FK, Oleinikova EA. The use of laser scanning technologies in observations of deformations of quarry sides. *Interexpo GEO-Sibir*. 2020;1(1):152-60. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-1-1-152-160.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Иван Михайлович Величко –
аспирант, Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «На-
циональный исследовательский технологический универси-
тет «МИСИС», 119049, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

ABOUT THE AUTHOR

Ivan M. Velichko –
Graduate Student, Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Education «National Research
Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russian
Federation, e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.03.2025.

Поступила после рецензирования: 15.05.2025.

Принята к публикации: 19.05.2025.

Article info

Received: 12.03.2025.

Revised: 15.05.2025.

Accepted: 19.05.2025.