

ПРОВЕДЕНИЕ МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГЛЯ ШАХТНЫМ СПОСОБОМ

И. М. Величко✉

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ ivan.velichko98@gmail.com

Аннотация: Подземная разработка угольных месторождений сопровождается большим количеством рисков, одним из которых является самовозгорание угля, приводящее ко многим негативным последствиям. Поэтому с целью предотвращения отрицательного влияния возникающих рисков проводятся маркшейдерские наблюдения за деформациями земной поверхности, которые являются следствием очагов подземных пожаров. В работе освещены вопросы внедрения метода радарной интерферометрии в комплекс маркшейдерских работ по проведению мониторинга деформаций земной поверхности в зоне разработки угольных месторождений. В статье рассмотрены характеристики и принцип действия радарной интерферометрии. Представлен пример исследования взаимосвязи подземных пожаров и возникающих из-за них деформаций земной поверхности. Показана схема применения радарной интерферометрии в маркшейдерском мониторинге вертикальных оседаний земной поверхности. Предложен алгоритм выполнения маркшейдерских работ с применением радарной интерферометрии с целью обнаружения очагов самовозгорания угля. Данная статья будет являться материалом для развития дальнейших исследований характеристик радарной интерферометрии и ее применения в маркшейдерской деятельности.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, подземный пожар, маркшейдерский мониторинг, земная поверхность, деформации, самовозгорание угля

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

Для цитирования: Величко ИМ. Проведение маркшейдерских работ с использованием радарной интерферометрии для выявления подземных пожаров при разработке угля шахтным способом. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):83-87. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-83-87>.

CONDUCTING MINE SURVEYING USING RADAR INTERFEROMETRY TO DETECT UNDERGROUND FIRES DURING COAL 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: Underground mining of coal deposits is accompanied by many risks, one of which is spontaneous combustion of coal, leading to many negative consequences. Therefore, in order to prevent the negative impact of emerging risks, surveying observations of deformations of the Earth's surface, which are the result of underground fires, are carried out. The paper highlights the issues of introducing the radar interferometry method into a complex of surveying operations to monitor deformations of the Earth's surface in the coal mining area. The article discusses the characteristics and operating principle of radar interferometry. An example of a study of the relationship between underground fires and resulting deformations of the Earth's surface is presented. The scheme of application of radar interferometry in the surveying monitoring of vertical subsidence of the Earth's surface is shown. An algorithm for performing surveying operations using radar interferometry is proposed in order to detect spontaneous combustion of coal. This article will be a material for the development of further research on the characteristics of radar interferometry and its application in surveying activities.

Keywords: radar interferometry, underground fire, surveying, earth surface, deformations, spontaneous combustion of coal

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 his help in preparing the text of the article and valuable recommendations.

For citation: Velichko IM. Conducting mine surveying using radar interferometry to detect underground fires during coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):83-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-83-87>.

Введение

При подземной разработке угольных месторождений велика вероятность возникновения самовозгорания угля, что является причиной появления подземных пожаров. Воспламенение угля приводит к взрыву газоземной смеси, разрушению горных выработок, травмированию и гибели рабочих и другим катастрофическим последствиям [1]. Подземные пожары также приводят к существенным экономическим потерям [2].

Повышение температуры из-за горения угля может приводить к снижению прочностных характеристик и разрушению горных пород, слагающих почву, кровлю и бока горных выработок. Такие процессы являются причиной возникновения деформаций земной поверхности, которые приводят к негативным последствиям. Поэтому проведение мониторинга оседаний земной поверхности является одной из главных задач, стоящих перед маркшейдерской службой любого горного предприятия. Качественный маркшейдерский мониторинг оседаний земной поверхности – это важнейший аспект, обеспечивающий стабильное и надежное функционирование горнодобывающей отрасли [3].

Помимо традиционных маркшейдерских методов наблюдений за деформациями земной поверхности существует метод радарной интерферометрии. Радарная интерферометрия находит применение в маркшейдерской деятельности. Данный метод позволяет давать достаточно точные результаты измерений. Традиционный метод нивелирования не может предоставить необходимое количество данных об оседаниях земной поверхности на обширных территориях за короткий промежуток времени. В связи с этим радарная интерферометрия используется в качестве дополнительного инструмента к традиционным методам мониторинга земной поверхности.

Цель исследования: анализ возможности применения радарной интерферометрии в маркшейдерском мониторинге деформаций земной поверхности, возникающих на участках развития подземных пожаров при добыче угля шахтным способом.

Методика исследований

Характеристики и принцип радарной интерферометрии

Радиолокационные системы, функционирующие на основе метода интерферометрии с синтезированной апертурой (InSAR), работают в режиме удаленного доступа. Они обеспечивают возможность получения данных с земной поверхности с периодичностью в несколько дней, что позволяет осуществлять значительное количество измерений с еженедельным обновлением информации [4]. При этом качество съемки почти не зависит от погодных условий и времени суток [5].

Мониторинг деформаций земной поверхности с помощью радарной интерферометрии представляет собой регулярный процесс, направленный на отслеживание состояния изучаемых объектов. Для большей части территории Рос-

сийской Федерации это возможно благодаря данным, получаемым со спутников Sentinel-1A/B, которые используют радар С-диапазона с длиной волны 5,6 см. Дифференциальная радарная интерферометрия (ДРИ) – это метод, который используется для измерения разницы в расстоянии между двумя точками на земной поверхности. Эти точки находятся на разных орбитах и измеряются с помощью спутникового радара. Суть метода заключается в том, что радар измеряет расстояние от спутника до поверхности Земли в двух точках, которые расположены близко друг к другу. Измерения проводятся во время последовательных пролетов спутника над этими точками [6].

Для вычисления смещений используются исходные данные, полученные после первичной обработки. Эти данные представляют собой снимки, на которых зафиксирована амплитуда и фаза отраженного от поверхности Земли сигнала. В результате получается векторная точечная карта. Для каждой точки определен набор характеристик, к которым относятся: географические координаты, отклонение от цифровой модели рельефа на момент съемки, средняя скорость изменения вертикальных смещений (мм/год) и другие параметры. Размеры конечного разрешения составляют 20×20 м на точку. Таким образом, каждая точка является интегральным показателем смещения в пределах квадрата. Этот показатель представляет собой усредненное значение изменения поверхности [7].

Взаимосвязь самовозгорания угля и деформаций земной поверхности

В исследованиях отечественные и зарубежные ученые рассматривали тему воздействия самовозгорания угля на формирование деформаций земной поверхности. В их работах рассматривалась взаимосвязь между температурными показателями и вертикальными оседаниями земной поверхности.

Самовозгорание угля представляет собой сложный физико-химический процесс, обусловленный внутренними изменениями в структуре материала и внешними условиями окружающей среды. Возможность самопроизвольного горения угля определяется совокупностью его структурных характеристик и параметров внешней среды [8]. Причиной самовозгорания угля являются процессы окислительных реакций в самом его веществе. При этом повышается температура и выделяется тепловая энергия. Длительное развитие таких процессов приводит к повышению температуры до предельных значений и резкому выделению тепла. В результате возникает воспламенение угля.

Наличие трещиноватости, пористости, разрыхления угля является главной причиной поступления кислорода внутрь угольного пласта. При контакте кислорода с угольными частицами активизируются окислительные процессы. Также причинами самовозгорания угля могут быть высокая влажность воздуха и угля и присутствие примесей, которые принимают участие в окислительных реакциях [9].

Существует высокая корреляция между зонами смещений и зонами температурных аномалий. Это объясняется изменением скорости геомеханических процессов, вызванных развитием подземных пожаров, и связанными с ними тепловыми аномалиями [10].

Так, в рамках научного исследования [11] был проведен анализ комплексного применения радарных и мультиспектральных данных для изучения деформаций и температурных характеристик земной поверхности. В ходе исследования использовались интерферометрические снимки, полученные с помощью спутника Sentinel-1B, а также данные о температуре земной поверхности, собранные спутником Landsat-8.

На основании полученных данных было выполнено сопоставление карт вертикальных смещений и температурных аномалий поверхности. В результате анализа композитного изображения исследуемой территории были сделаны следующие выводы:

1. Были идентифицированы два участка, характеризующиеся повышенными температурами и значительными вертикальными оседаниями земной поверхности.

2. Оба выявленных участка расположены на склонах отвалов.

Таким образом, в указанных зонах существует потенциальная угроза возникновения подземных пожаров, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных маркшейдерских инструментальных наблюдений.

Причиной поверхностной ползучести, из-за которой возникают деформации земной поверхности, являются подземные термические воздействия. При этом изменение величин деформаций колеблется в пределах нескольких миллиметров в течение года. Для обнаружения таких небольших величин деформаций оптимально применение метода последовательной интерферометрии постоянных рассеивателей радарного сигнала (permanent scatterer – PS) [12].

Интерферометрия постоянных рассеивателей (PSI) – это инновационный подход к обработке данных, полученных с помощью радиолокационных методов. Он позволяет измерять и отслеживать изменения положения и формы точек на поверхности Земли, которые постоянно рассеивают радиосигнал. Обычно такими точками являются здания и другие искусственные объекты [13].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлен метод применения радарной интерферометрии для обнаружения очагов самовозгорания угля при подземной разработке.

С помощью спутников 1 и направленных от них в сторону исследуемого объекта радиоволн 2 определяется фаза отраженного от земной поверхности радиолокационного сигнала 3. Затем по разности фаз отраженного сигнала от земной поверхности соответственно при начальном 11 и конечном 10 ее положении определяется вертикальное смещение 4 земной поверхности. Вертикальное смещение возникает вследствие разрушения массива горных пород 5 из-за воздействия развивающегося подземного пожара 7 в призабойном пространстве при разработке очистного забоя 8. Для воплощения концепции, представленной на рисунке 1, требуется тщательное планирование и организация процесса маркшейдерских работ.

На рисунке 2 представлена методологическая последова-

тельность выполнения маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности с применением радарной интерферометрии, которая обеспечивает возможность предварительного проектирования и реализации мероприятий по обнаружению потенциальных очагов подземных пожаров.

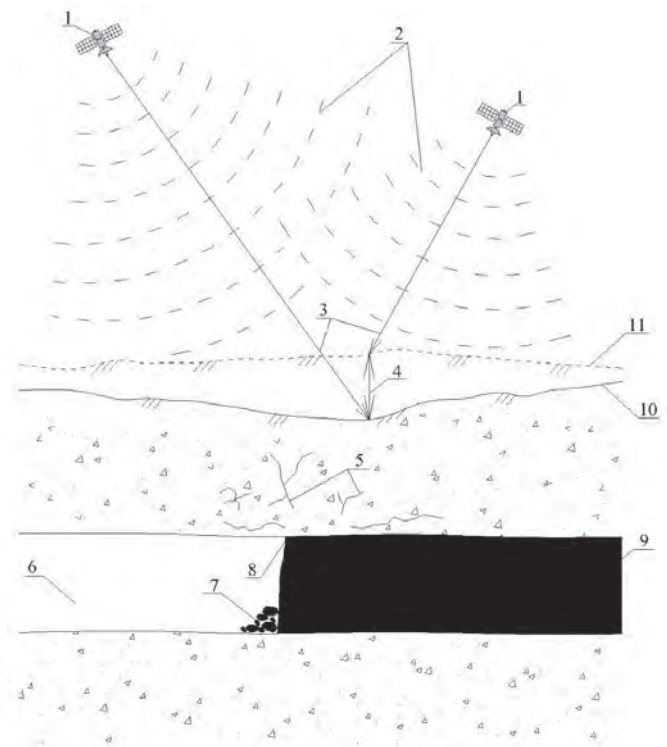


Рис. 1. Применение радарной интерферометрии при обнаружении очагов самовозгорания угля: 1 – спутники; 2 – радиоволны; 3 – направление радиолокационных сигналов; 4 – вертикальное смещение земной поверхности; 5 – участок разрушения массива горных пород из-за термических воздействий; 6 – выработанное пространство; 7 – очаг самовозгорания угля в призабойном пространстве; 8 – очистной забой; 9 – угольный пласт; 10 – конечное положение участка земной поверхности; 11 – начальное положение участка земной поверхности / Fig. 1. The use of radar interferometry in detecting spontaneous combustion of coal: 1 – satellites; 2 – radio waves; 3 – direction of radar signals; 4 – vertical displacement of the Earth's surface; 5 – site of destruction of the rock mass due to thermal effects; 6 – depleted space; 7 – spontaneous combustion of coal in the bottomhole space; 8 – sewage treatment plant; 9 – coal seam; 10 – the final position of a section of the earth's surface; 11 – the initial position of a section of the earth's surface

Схема алгоритма проведения маркшейдерских работ при обнаружении очагов подземных пожаров с помощью радарной интерферометрии следующая:

1. *Выполнение мониторинга оседаний земной поверхности на территории угольного предприятия.* Проводятся циклы мониторинга, в ходе которых с помощью радарной интерферометрии определяются значения вертикальных оседаний земной поверхности. Затем результаты измерений, полученные в ходе разных циклов мониторинга, подвергаются сравнительному анализу.

2. *Создание картографических материалов, отражающих области с максимальной степенью оседания земной поверхности.* По результатам проведенных измерений выявляются участки, где наблюдаются максимальные оседания земной поверхности относительно всей исследуемой территории. На основе полученных данных составляются карты деформаций.



Рис. 2. Схема алгоритма проведения маркшейдерских работ при обнаружении очагов подземных пожаров с помощью радарной интерферометрии /

Fig. 2. Scheme of the algorithm for conducting surveying operations when detecting underground fires using radar interferometry

3. Составление карт участков повышенных температур земной поверхности. Для целей мониторинга и ликви-

дации подземных пожаров необходимо точное определение аномалий температуры земной поверхности, обусловленных процессами подземного горения угля [14]. Поэтому осуществляется сбор мультиспектральных данных с применением спутниковых технологий. На основе этих данных выявляются участки с наиболее высокими температурами земной поверхности, которые затем наносятся на карты.

4. Сопоставление карт деформаций и температуры земной поверхности. Составляется карта, объединяющая сведения о деформациях и температуре земной поверхности. Затем на основе этой карты выявляются участки, где одновременно наблюдаются повышенные значения температуры и вертикальных оседаний.

После проведения всех вышеупомянутых действий производятся дополнительные наблюдения в горных выработках, находящихся непосредственно в зоне наибольших деформаций земной поверхности. Затем принимаются дополнительные предохранительные меры для предотвращения самовозгорания угля в шахте.

За последние три десятилетия методика InSAR продемонстрировала высокую эффективность в области оценки оседания грунта. Данный метод применяется в различных целях, на различных аналитических уровнях и в разнообразных условиях [15].

Закключение

1. Метод радарной интерферометрии представляет собой эффективный инструмент для исследования участков, потенциально подверженных возникновению подземных пожаров посредством анализа деформаций земной поверхности.

2. Оптимизация алгоритма, предложенного в статье для проведения маркшейдерских работ, позволит значительно усовершенствовать процесс выявления и предотвращения на ранних стадиях возникновения очагов подземных пожаров.

3. Дальнейшее применение радарной интерферометрии для решения маркшейдерских задач по определению оседаний земной поверхности существенно повысит качество получаемых результатов. К тому же активное развитие спутниковых технологий в настоящее время открывает больше возможностей для внедрения метода радарной интерферометрии в решение различных маркшейдерских задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Ворсин НА. Подземные пожары и способы их тушения. *Аллея науки*. 2023; 1(76): 345-349. [Vorsin NA. Underground fires and ways of extinguishing them. *Alley of Science*. 2023; 1: 345-349. (In Russ.).]
- Калайгорода ВВ, Никулин НЮ, Простов СМ. и др. Мониторинг зоны самовозгорания породугольного массива георадиолокационным методом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2022; 3: 95-103. [Kalaygoroda V.V., Nikulin N.Yu., Prostop S.M., et al. Monitoring of the spontaneous combustion zone of the carboniferous massif using the georadiolocation method. *News of higher educational institutions. Mining Magazine*. 2022; 3: 95-103. (In Russ.).] DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-95-103.
- Тютюкова ВА. Опыт применения дифференциальной радарной интерферометрии для мониторинга оседаний на рудном месторождении. *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых*. 2024; 1: 194-196. [Tyutyukova VA. Experience in the application of differential radar interferometry for monitoring sedimentation in an ore deposit. *Problems of development of hydrocarbon and ore deposits*. 2024; 1: 194-196. (In Russ.).]
- Macchiarulo V, Milillo P, DeJong JM, et al. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations. *Struct Control Health Monit*. 2021; 28(9): 1-26. DOI: 10.1002/stc.2781.
- Попов СЕ, Замараев РЮ, Миков ЛС. Обнаружение оползней и оползневых зон на бортах карьеров по данным радарной интерферометрии. *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: сб. ст. IX Международной научной конференции*. Красноярск, 2022: 130-134. [Popov SE, Zamaraev RYu, Mikov LS. Detection of landslides and landslide zones on the sides of quarries according to radar interferometry. *Regional problems of remote sensing of the Earth: collection of articles of the IX International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2022: 130-134. (In Russ.).]
- Бондур ВГ, Чимитдоржиев ТН, Дмитриев АВ и др. Методы радарной интерферометрии и обработки оптических спутниковых изображений для исследования негативных воздействий на окружающую среду (на примере байкальского ЦБК). *Исследование Земли из космоса*.

- 2021; 5: 3-14. [Bondur VG, Chimitdorzhiev TN Dmitriev A.V, et al. The method of radar interferometry and optical satellite image processing for the study of negative impacts on the environment (using the example of the Baikal CSC). *Exploring the Earth from space*. 2021; 5: 3-14. (In Russ.)].
7. Гиниятуллина ОЛ, Гречишкин ПВ, Трошков НЮ. Опыт мониторинга сдвижения поверхности подработанных территорий при ликвидации угольных шахт по данным дистанционного зондирования земли. *Горная промышленность*. 2024; 3: 44-47. [Giniyatullina OL, Grechishkin PV, Troshkov NYu. Experience in monitoring the displacement of the surface of mined areas during the liquidation of coal mines based on remote sensing data. *Mining industry*. 2024; 3: 44-47. (In Russ.)]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-44-47.
8. Cao N, Wang G, Liang Y. Study on the microscopic mechanism of spontaneous combustion and oxidation kinetics of Water-Leached Coal. *Journal of Chemistry*. 2021; 1: 1-15. DOI: 10.1155/2021/5564290.
9. Маадыр-оол ШО. Процесс самовозгорания угля и его особенности. *Научные труды Тувинского государственного университета: сб. ст. ежегодной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов Тувинского государственного университета, посвященной Году культурного наследия народов России*. Кызыл, 2023; 21: 184-187. [Maadyr-ool ShO. The process of spontaneous combustion of coal and its features // *Materials of the annual scientific and practical conference of teachers, staff and graduate students of Tuva State University dedicated to the Year of Cultural Heritage of the Peoples of Russia «Scientific Works of Tuva State University»*. Kyzyl, 2023; 21: 184-187. (In Russ.)].
10. Мамаш ЕА, Пестунов ИА, Потапов ВП. Мониторинг подземных пожаров на основе комплексных данных дистанционного зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): сб. ст. 20-й Международной конференции*. Москва, 2022; 104. [Mamash EA, Pestunov IA, Potapov VP. Monitoring of underground fires based on integrated remote sensing data. *Proceedings of the 20th International Conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space»*. Moscow, 2022; 104. (In Russ.)]. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
11. Миков ЛС, Потапов ВП. Применение радарной интерферометрии для комплексной оценки геомеханических и термодинамических процессов (на примере Кузбасса). *Вестник НЦ ВостНИИ*. 2024; 3: 34-43. [Mikov LS, Potapov VP. Application of radar interferometry for a comprehensive assessment of geomechanical and thermodynamic processes (using the example of Kuzbass). *Bulletin of the Scientific Research Center VostNI*. 2024; 3: 34-43. (In Russ.)]. DOI: 10.25558/VOSTNI.2024.87.44.004.
12. Kim J, Lin SY, Singh RP, et al. Underground burning of Jharia coal mine (India) and associated surface deformation using InSAR data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2021; 103: 1-12.
13. Муродов СД, Чермошенцев АЮ. Методика мониторинга смещений зданий и сооружений по данным космической радиолокационной съемки. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020; 6(2): 36-40. [Murodov SD, Chermoshentsev AYU. Methodology for monitoring displacement of buildings and structures based on space radar survey data. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020; 6; 2:36-40. (In Russ.)].
14. Yuan G, Wang Y, Zhao F, et al. Accuracy assessment and scale effect investigation of UAV thermography for underground coal fire surface temperature monitoring. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2021; 102: 1-17.
15. Raspini F, Caleca F, Soldato MD, et al. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews*. 2022; 235: 1-39. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.10423.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.06.2025.

Поступила после рецензирования: 19.07.2025.

Принята к публикации: 13.08.2025.

Article info

Received: 14.06.2025.

Revised: 19.07.2025.

Accepted: 13.08.2025.

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