

*Г. А. Мусина<sup>1\*</sup>*

## **Сравнительный анализ современных методов деформационного мониторинга**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: storm2x@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены современные методы мониторинга деформационных процессов земной поверхности, на территориях с техногенной нагрузкой. Основными методами наблюдения за деформациями земной поверхности, при проведении открытых горных работ являются: геодезические методы, используемые для маркшейдерских наблюдений; наземное лазерное сканирование; технологии глобальных навигационных систем (ГНСС-технологии); наземные радарные системы; аэрофотосъемка, аэрофототопографическая съемка; космическое радиолокационное зондирование. Приведены общие сведения о параметрах, технических характеристиках и принципах работы. На основе проведенного анализа была проведена систематизация технических средств для проведения деформационного мониторинга. Также проведена качественная оценка характеристик дистанционных методов при определении деформаций.

**Ключевые слова:** геодезические методы, наземное лазерное сканирование, ГНСС – технологии, радарные системы, аэрофотосъемка и аэрофототопографическая съемка, космическое радиолокационное зондирование

*G. A. Mussina<sup>1\*</sup>*

## **Comparative analysis of modern methods of deformation monitoring**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\*e-mail: storm2x@mail.ru

**Abstract.** This article discusses modern methods of monitoring the deformation processes of the Earth's surface, in areas with man-made load. The main methods of observing deformations of the Earth's surface during open-pit mining are: geodetic methods used for surveying observations; ground-based laser scanning; global navigation system technologies (GNSS technologies); ground-based radar systems; aerial photography, aerial photography; space radar sensing. General information about the parameters, technical characteristics and principles of operation is provided. Based on the analysis carried out, the systematization of technical means for carrying out deformation monitoring was carried out. A qualitative assessment of the characteristics of remote methods for determining deformations was also carried out.

**Keywords:** geodetic methods, ground-based laser scanning, GNSS technologies, radar systems, aerial photography and aerial photography, space radar sensing

### ***Введение***

Разработка и эксплуатация месторождений оказывает непосредственное влияние на состояние окружающих объектов, экологии и целостности земного

покрова. Угольные месторождения, разрабатываемые открытым способом, являются сравнительно дешевым способом добычи, поэтому является наиболее распространенным. При разработке месторождений открытым способом устойчивость бортов карьеров является одной из основных проблем на всех стадиях развития разработки и эксплуатации месторождения. Для проведения анализа устойчивости бортов карьеров необходимы систематические наблюдения и детальное изучение, понимание геологического и структурного строения месторождения, а также подробное изучение факторов, влияющих на процесс сдвижения горных пород в карьере [1].

Неконтролируемое сдвижение горных пород – это огромный риск для жизни людей и дальнейшего развития горного предприятия. В связи с этим проведение систематических наблюдений за деформационными процессами на территории месторождения является неотъемлемой частью функционирования угольного карьера.

Для проведения мониторинга деформационных процессов применяются традиционные геодезическо – маркшейдерские методы, которые имеют свои достоинства и недостатки. Поэтому возникает необходимость в применении дополнительных методов деформационного мониторинга [2].

### ***Методы и материалы***

Выполнен обзор литературных источников о современных методах проведения мониторинга деформационных процессов при разработке и эксплуатации угольного месторождения, разрабатываемого открытым способом. Основными методами проведения наблюдения являются геодезическо – маркшейдерские методы. Но этих методов бывает недостаточно для получения актуальной информации в труднодоступных районах, опасных для жизни человека. Поэтому возникает необходимость проведения мониторинга дополнительными методами. К дополнительным методам относятся: наземное лазерное сканирование; наземные радиолокационные системы; ГНСС- системы; аэрофотосъемка; космическое радиолокационное зондирование земли. В данной работе выполнялось сравнение современных методов деформационного мониторинга.

### ***Результаты***

Геодезические методы, используемы для маркшейдерских наблюдений – это комплекс угловых и линейных измерений, с целью получения информации о нахождении местоположения точек с последующим переносом данных на планы и карты, имеющих промышленное значение. Полученные данные используются для решения разнообразных задач в процессе строительства и эксплуатации месторождения. Для съемки месторождения, разрабатываемого открытым способом, применяются: тахеометрическая съемка; ординатный способ; лазерная съемка.

Тахеометрическая съемка – это комбинированный метод съемки, в результате которого определяется плановое и высотные положения точек земной поверхности, позволяющие получать топографический план местности.

Ординатный метод заключается в определении положения отдельно расположенных точек. Местоположение отдельной точки находится по величине ординаты, опущенной из данной точки на стороны тахеометрического хода и по расстоянию от начала перпендикуляра до ближайшей точки с известными координатами. является наименее точным. Этот метод является наименее точным, поэтому практически не используется.

Лазерная съемка является наиболее распространенной за счет простоты работы и высокой продуктивности. Для определения абсолютных координат точек используется лидар, который устанавливается на опорной точке. Сканирование производится высокочастотным лазером, фиксирующим направление и отражение лазерного сигнала, угол разворота и относительные смещения между компонентами заданной для съемки местности. Точное расположение опорной точки фиксируется с помощью GPS – системы [3].

Основными инструментами для проведения наблюдений применяются электронные теодолиты, нивелиры и тахеометры, все это традиционные маркшейдерские методы. Основным инструментом является электронный тахеометр (Total Station). При использовании роботизированных тахеометров наблюдения производятся в ручном и автоматическом режиме (Robotic Total Stations (RTS)).

Наземное лазерное сканирование основано на использовании оптических лазерных лучей для сбора информации об объекте в прямых трехмерных измерениях. Главным принципом этого метода является измерение с высокой скоростью расстояний от сканера до точек объекта, и фиксирование горизонтальных и вертикальных углов. Данный способ позволяет проводить трехмерные измерения целевых объектов и поверхности под ними с помощью проникновения луча сквозь растительность.

В настоящее время технология трехмерного (3D) лазерного сканирования используется в таких отраслях, как геодезия, проектирование, исследование деформаций зданий и сооружений, археология, медицина и др. К преимуществам данной технологии относятся: высокая степень автоматизации получения и обработки метрической информации, точность, избыточность [4].

Результатом съемки путем лазерного сканирования является облако точек, которое включает в себя множество измерений.

Система для наземного лазерного сканирования состоит из НЛС и полевого персонального компьютера со специализированным программным обеспечением. Результатом съемки наземного лазерного сканера является трехмерная модель объекта, в виде совокупности точек, где каждой определены пространственные координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , интенсивность отраженного сигнала  $d$ . Наземные сканеры делятся по принципу действия на три группы: импульсные, фазовые, триангуляционные [5].

Наземные радарные системы - это способы определения характеристик и местоположения изучаемого объекта с помощью радарного лазера. Расположение радара напрямую влияет на размер пикселя изображения. Данный метод вы-

сокоточный с погрешностью, не составляющей больше 1 мм при больших расстояниях, при малых – до 0,1-0,3 мм. Проведение высокоточных измерений происходит путем сравнения фаз и интенсивности отраженных сигналов для двух последовательных сканирований, для этого применяют дифференциальные интерферометры [6].

Наземный интерферометрический радар является радиолокационным датчиком, работающем в диапазоне частот 16,6 – 16,9 ГГц. Применяет метод дифференциальной интерферометрии для определения незначительных деформаций, путем сравнения двух съемок различных периодов. Является высокоточным методом, эффективен для проведения непрерывного мониторинга крупных объектов [7].

Технологии глобальных навигационных систем (ГНСС- технологии) –это комплекс, состоящий из высокотехнологичных и сложных приборов. Основным предназначением является определение географических координат, по принципу линейных засечек. ГНСС – технологии являются основным методом для проведения топографических работ. Структура ГЛОНАСС имеет три основных сегмента: космический сегмент; сегмент управления и контроля; сегмент пользователя [8].

В последнее время широкое применение получили методы аэрофотосъемки. Одним из основных инструментов для проведения мониторингов являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Применение БПЛА позволяет снизить стоимость проведения аэрофотосъемки в 3,6 раза в сравнении с традиционными видами съемки с применением самолетов и вертолетов [9].

Аэрофотосъемка обладает высокой производительностью, позволяет получать объективную картину состояния поверхности и прилежащих объектов на больших территориях и для труднодоступных объектов.

Основными видами работ аэрофототопографической съемки являются: работы по геодезическому обеспечению; воздушное лазерное сканирование; камеральные работы и создание карт и планов, ортофотопланов, цифровых моделей местности и рельефа, а также определения контуров и границ объекта.

Применение аэрофототопографической съемки позволяет производить измерения по одиночным снимкам или по результатам измерений пар снимков, выполненных для одного и того же объекта с различных ракурсов.

Точность метрической информации зависит от параметров съемки, съемочной аппаратуры, правильности калибровки аппаратуры, учет различных деформаций наземных снимков, а также корректности обработки полученной информации [10].

Космическое радиолокационное зондирование получило широкое применение с развитием информационных технологий. Радиолокационная съемка позволяет получать достоверную информацию о труднодоступных и опасных, для жизни человека, районах Земли [11].

Принцип работы синтезированной апертуры основан на перемещении бортовой антенны радиолокационной системы (РЛС) для последовательного формирования виртуальной антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна, как правило, при этом имеет небольшие размеры и достаточно широкую диаграмму направленности. Ряд преимуществ радиолокационной съемки, в сравнении с рассмотренными методами, делает ее одной из наиболее перспективной для проведения деформационного мониторинга [12].

Для решения различного типа задач дистанционного зондирования земной поверхности применяются радиолокаторы X – C-, S-, L-, диапазонов.

Для определения смещений земной поверхности применяется метод спутниковой интерферометрии, использующий фазовую информацию нескольких циклов когерентных измерений определенного участка земной поверхности с изменением положения радара в пространстве. Данная технология является высокоточным методом для проведения деформационных мониторингов. Точность проведения деформационных мониторингов составляет 2 – 4 мм по высоте [13].

Построение качественной интерферограммы является основным условием для определения высот или смещений. Также построение качественно интерферограммы зависит от показателя пространственной базовой линии. Необходимо, чтобы пространственная базовая линия не была выше определенного критического значения, для этого относились: к одной относительной орбите; к одному виду движения спутника: восходящему или нисходящему; снимки не должны отстоять друг от друга на слишком большой промежуток времени (иначе произойдет временная декорреляция снимков).

Интерферограмма формируется путем перекрестного умножения эталонного изображения на комплексное сопряжение вторичного изображения. Амплитуда обоих изображений умножается, в то время как фаза представляет разность фаз между двумя изображениями [14].

*Таблица 1*

Качественная оценка характеристик дистанционных методов при определении деформаций

Технические средства	Достоинства	Недостатки
Геодезические методы, используемые в маркшейдерских наблюдениях	-высокая точность измерений.	- высокая стоимость выполнения работ и их трудоемкость выполнения; - сравнительно небольшая продолжительность работы электронных приборов; - метод является точечным; -зависимость от рельефа, глубины карьера; -зависимость от вибраций; -ограниченность в проведении работ при условии опасных участков; -не является всепогодным методом.

Технические средства	Достоинства	Недостатки
Наземное лазерное сканирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>- площадной метод;</li> <li>-получение информации дистанционно;</li> <li>-высокая скорость получения данных;</li> <li>-получение данных, без учета растительности;</li> <li>-создание актуальной высокого качества 3D-модели объекта;</li> <li>-высокая точность измерений (при наличии большого количества снимков, погрешность минимальная)</li> <li>-объективность полученных результатов за счет высокой степени автоматизации процесса;</li> <li>-доступность технологии (съёмку можно произвести с минимальным оснащением профессиональной техники);</li> <li>-получение координат заданных точек в полевых условиях;</li> <li>-возможность изучения движущихся объектов и процессов.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- получение большого объема информации, перегруженного деталями, затрудняющего обработку информации;</li> <li>-возникновение погрешностей, вызванных метеорологическими свойствами окружающей среды;</li> <li>-влияние вибрации, при смещении прибора вдоль измеряемой линии в горизонтальных и вертикальных плоскостях;</li> <li>- сравнительно высокая стоимость проведения работ;</li> <li>- невозможность привязаться к системе координат, без геодезических систем;</li> <li>-выполнение съёмки в прямой видимости, невозможность сканирования некоторых объектов;</li> <li>-влияние формы и текстуры объекта съёмки на точность получения данных сканирования существующими наземными лазерными сканерами (НЛС);</li> <li>-в процессе работы при постоянном нагреве и охлаждении НЛС происходит деформация измерительных и вращательных частей, что оказывает негативное влияние на получение актуальной информации;</li> <li>-необходимость выполнения полевых геодезических работ для контроля технологических процессов.</li> </ul>
ГНСС-технологии	<ul style="list-style-type: none"> <li>-отсутствует зависимость от погодных условий;</li> <li>-точность измерения оценивается как высокая;</li> <li>-гибкая система выбора точек съёмки;</li> <li>-недостаточно большой временной интервал для проведения наблюдений.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-является точечным методом получения информации;</li> <li>-невозможно проводить наблюдения без присутствия на объекте;</li> <li>-на низких горизонтах производительность метода низкая;</li> <li>-влияние ионосферы, тропосферы;</li> <li>-не обеспечивает миллиметровую точность;</li> <li>-невозможность получения информации в опасных зонах;</li> <li>необходимость выполнения полевых геодезических работ для контроля технологических процессов.</li> </ul>

*Продолжение табл. 1*

Технические средства	Достоинства	Недостатки
Наземные радарные системы	<ul style="list-style-type: none"> <li>- метод является площадным;</li> <li>- высокая точность и детализация данных;</li> <li>- производительность работ достаточно высокая;</li> <li>- выполнение съемки без учета погодных условий;</li> <li>- проведение мониторингов без наличия персонала.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- стоимость оборудования оценивается, как высокая;</li> <li>- угол обзора съемочной системы является ограниченным;</li> <li>- достаточная малая площадь измерений.</li> </ul>
Аэрофотосъемка, аэрофототопографическая съемка	<ul style="list-style-type: none"> <li>- площадной метод;</li> <li>- проведение съемки в отдалении от объекта;</li> <li>- построение ЦМР высокой точности.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зависимость от погодных условий и освещенности объекта;</li> <li>- высокая стоимость оборудования выполнения работ;</li> <li>- большая аварийность оборудования;</li> <li>- неустойчивость аппарата при полете.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- метод является дистанционным, обеспечивая, безопасность ведения работ, особенно актуально, если изучаемых объект находится на территории, опасной для жизни человека;</li> <li>- возможность исследования труднодоступных территорий;</li> <li>- получение актуальной информации на момент съемки;</li> <li>- получение снимков высокого разрешения.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- стоимость оборудования;</li> <li>- зависимость от погодных условий (порывы ветра, облачность, туман и тд)</li> <li>- аэрофотосъемка может быть более сложной с логистической точки зрения, чем обычная съемка, поскольку она требует координации с авиационными и городскими властями и может быть связана с получением разрешений на полеты над определенными территориями;</li> <li>- аэрофотосъемка требует более высокого уровня технических навыков и опыта, поскольку фотограф должен хорошо разбираться как в технике аэрофотосъемки, так и в используемом оборудовании.</li> </ul>
Космическое радиолокационное зондирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>- проведение съемки без учета погодных условий и сезона;</li> <li>- площадной метод;</li> <li>- точность измерения оценивается как высокая;</li> <li>- независимость от растительного и снежного покрова;</li> <li>- полностью дистанционный метод (получение и</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- используемый метод обработки данных влияет на точность результатов;</li> <li>- высокая стоимость программного обеспечения.</li> </ul>

	<p>обработка проводятся удаленно, без вреда здоровью работника);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- высокая точность определения смещений;</li> <li>- наличие бесплотного программного обеспечения и снимков;</li> <li>- оперативность и регулярность получения данных;</li> <li>- получение исторических данных позволяет проследить динамику изменений в прошлом;</li> <li>- большое количество спутников.</li> </ul>	
--	---	--

### ***Заключение***

Система мониторинга деформационных процессов должна быть эффективной и обеспечивать объективную оценку состояния территорий горного предприятия. Однако применение только одного из методов не всегда является достаточным условием для получения актуальной информации. В связи с этим возникает необходимость в правильном подборе имеющихся методов или же в комбинации этих методов, так как обеспечение безопасности ведения горных работ является приоритетной задачей при эксплуатации месторождения.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Мусина Г.А. Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Применение спутниковых данных для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах на территории Казахстана // Актуальные вопросы землеустройства, геодезии и природообустройства материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 15-летию института землеустройства, кадастров и мелиорации. ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени в. Р. Филиппова». Улан-удэ, 2020.с.154- 159
2. Харисова О.Д. Мониторинг пространственных деформационных процессов подрабатываемых сооружений // Проблемы недропользования. 2018. № 3. С. 81-88
3. Чугреев И.Г., Усова Н.В., Владимирова М.Р. Основы геодезии: учебно-методическое пособие. — М.: МИИГАиК, 2017, 146 с.
4. Инструкция о содержании, оформлении и порядке представления в Г КЗ СССР технико-экономических обоснований кондиций на минеральное сырье. М., 1984, 24 с.
5. Орлов Г.В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство МГГУ, 2010. – 199 с.: ил.
6. Комиссаров А.В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учеб.-метод. пособие [Текст] / А. В. Комиссаров. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 58 с. : ил. ISBN 978-5-907052-90-1
7. Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2009. – 261 с. – ISBN 978-5-87693-336-2.
8. А.О. Куприянов Глобальные навигационные спутниковые системы: Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2017. – 76 с.

9. Долгоносов В.Н., Ожигин Д.С., Казанцева В.В., Бурак Ю.С., Гроссул П.П. Применение беспилотных летательных аппаратов в области гидрографических исследований// вестник академии гражданской обороны. - 2022. №1. С. 8-12.

10. Измествьев А. Г. Дистанционные методы зондирования Земли: уч. пособие [Электронный ресурс] : для студентов направления подготовки 21.05.04. «Горное дело» Образовательная программа «Маркшейдерское дело» / А. Г. Измествьев. – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ, 2014 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв. ; цв. ; 12 см. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 500 Мб ; Windows 2000 ; (CD-ROM-дисковод) ; мышь. - Загл. с экрана.

Никольский, Д. Б. Области применения радиолокационных данных / Д. Б. Никольский // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 47-50.

11. Трубина Л.К., Мусина Г.А. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой, анализ возможностей их применения для мониторинга угольных карьеров//ГеоСибирь. Новосибирск. - 2021.№4. С.3-9

12. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дисс. канд.тех. Наук: 25.00.16. – Пермь, 2012.

13. Боргоякова, А. А. Методика создания цифровой модели местности по данным радиолокационной съемки со спутника Sentinel-1 / А. А. Боргоякова, А. Ю. Чермошенцев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 120-127.

© Г. А. Мусина, 2023