

УДК 622.831:528.5

Винальева Екатерина Алексеевна
младший научный сотрудник,
лаборатория сдвижения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: winalewa@gmail.com

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

Аннотация:

Процесс сдвижения горных пород развивается по причине нарушения естественного напряженно-деформированного состояния массива вследствие образования горных выработок. Действующие в горном массиве напряжения, собственный вес пород и суффозионные процессы вызывают разрушение и перемещение подработанных пород в выработанное пространство. Этот процесс, развиваясь, достигает поверхности, где образуются провалы, террасы и трещины. Захватывающие толщу горных пород, а также и земную поверхность сдвижения и деформации могут оказаться опасными для расположенных на поверхности сооружений, природных и хозяйственных объектов, в том числе и проведенных в толще пород горных выработок. Актуальность данной проблемы заключается в том, что в последние годы в мире наблюдается увеличение числа процессов сдвижения и деформаций, и это вызывает необходимость мониторинга деформационных процессов на местности. Для этих задач используются как классические, так и спутниковые геодезические приборы. Однако выбор подходящего оборудования – задача не из легких, и она усложняется, когда речь идет о разных условиях работы. В статье рассмотрено геодезическое оборудование, особенности его выбора для мониторинга деформаций земной поверхности, также проведен сравнительный анализ его преимуществ и недостатков в различных условиях работы.

Объектом обзора являются классические и спутниковые геодезические приборы.

Целью работы является сравнительный анализ классического и спутникового оборудования при мониторинге сдвижения горных пород на подработанных территориях, а также составление рекомендаций по выбору приборов.

Ключевые слова: мониторинг, тахеометр, геодезические приборы, нивелир, земная поверхность, измерения, деформации, сдвижение, анализ, подработанные территории.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.057

Vinalyeva Ekaterina A.
Junior Researcher,
Laboratory of rock displacement,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: winalewa@gmail.com

OVERVIEW OF MODERN GEODETIC INSTRUMENTS FOR MONITORING THE DEFORMATION PROCESSES OF THE EARTH'S SURFACE

Abstract:

The process of displacement of rocks develops due to the violation of the natural stress-strain state of the massif due to the formation of mine workings. The stresses acting in the rock mass, the own weight of the rocks and suffusion processes cause the destruction and movement of the undermined rocks into the goaf. This process, when developing, reaches the surface, where dips, terraces and cracks are formed. The displacements and deformations that capture the rock mass, as well as the earth's surface, can be dangerous for structures located on the surface, natural and economic objects, including mine workings carried out in the rock mass. The relevance of this problem lies in the fact that in recent years there has been an increase in the number of displacement and deformation processes in the world, which makes it necessary to monitor deformation processes on the ground. For these tasks, both classical and satellite geodetic instruments are used. However, choosing the right equipment is not an easy task, and it gets more complicated when it comes to different working conditions. This article deals with the geodetic equipment and the features of its choice for monitoring deformations of the earth's surface, it also contains a comparative analysis of its advantages and disadvantages given in various operating conditions.

Key words: monitoring, tacheometer, geodetic instruments, leveling, earth's surface, measurements, deformations, displacement, analysis, undermined territories.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПП, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Введение

Выемка пластов угля и других залежей полезных ископаемых вызывает образование в недрах земли пустот значительных размеров. Породы, залегающие в кровле горных выработок, под действием силы тяжести и горного давления приходят в движение, обуславливая развитие процесса сдвижения всей толщи, включая земную поверхность. В результате данного процесса деформируется и нарушается целостность крепи горных выработок, попавших в зону сдвижения [1]. Объекты, расположенные на земной поверхности и также попавшие в зону сдвижения, деформируются, а при неблагоприятных условиях подработки даже разрушаются [2], в связи с чем возникает необходимость мониторинга земной поверхности. Для выполнения этой задачи используются различные геодезические приборы, которые позволяют получать данные о координатах и отметках высот точек на местности. Геодезические приборы – это инструменты, используемые для измерения различных параметров земной поверхности. Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, имеют некоторые ограничения в использовании для мониторинга деформационных процессов, в то время как спутниковые геодезические приборы, такие как системы глобального позиционирования (GPS), ГЛОНАСС и Galileo, предоставляют более точные и удобные данные о координатах и отметках высот точек на местности при соблюдении определенных условий. В данной статье были рассмотрены особенности работы и применения классических и спутниковых геодезических приборов, а также проведен сравнительный анализ их преимуществ и недостатков в мониторинге деформационных процессов на местности.

Классические геодезические приборы

Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, широко применяются для мониторинга деформационных процессов на местности. Рассмотрим их основные характеристики и применение в геодезии.

Нивелир – прибор, использующийся для определения разности высот между точками [3]. Он работает на основе принципа оптического выравнивания лучей, причем лучи света проходят через зрительную трубу нивелира, далее через призму и направляются на рефлектор. Рефлектор, который устанавливается на точке, на которую производится измерение, отражает лучи нивелира обратно в зрительную трубу, где они попадают на измерительную шкалу. После этого можно рассчитать высоту точки на основе нескольких измерений.

Теодолит – это оптический геодезический прибор, который используется для измерения углов между различными точками на местности. Теодолит также основан на принципе оптического выравнивания лучей. Он состоит из горизонтальной и вертикальной осей, которые позволяют измерять углы в данных плоскостях. Прибор также имеет измерительную шкалу и окуляр для наблюдения углов. С помощью теодолита можно измерять горизонтальные и вертикальные углы между точками на местности.

Тахеометр – это геодезический прибор, который используется для измерения расстояний, углов и высот на местности. Он обычно состоит из теодолита и дальномера, что позволяет получать информацию о расстоянии до измеряемых точек. Также он может быть оснащен устройством автоматической фокусировки, что позволяет быстро измерять расстояния и углы между точками на местности. Тахеометры по принципу действия делятся на оптические, электронные (цифровые) и роботизированные (автоматические) [3].

Ограничения использования классических геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов

Классические геодезические приборы (рис. 1), такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, широко применяются для мониторинга деформационных процессов на ме-

стности. Несмотря на то что они имеют ряд преимуществ, таких как точность, надежность и возможность измерения больших расстояний, есть также и некоторые ограничения во время использования.



Рис. 1. Классические геодезические приборы

Одним из главных ограничений является то, что классические геодезические приборы не обеспечивают возможность непрерывного мониторинга. Измерения должны производиться в определенный момент времени и, как правило, требуют значительной подготовки и времени на само измерение.

Другим ограничением является сложность обработки данных. Поскольку измерения производятся в различные моменты времени, необходимо выполнить ряд сложных расчетов, чтобы получить точные данные о деформационных процессах.

Кроме того, классические геодезические приборы могут быть ограничены в использовании для некоторых типов деформаций, таких как тектонические деформации, которые могут происходить на довольно больших расстояниях и требуют более точных инструментов. Наконец, классические геодезические приборы могут быть ограничены в использовании в отдаленных или труднодоступных местах, где доставка и установка оборудования может быть затруднена.

В свете этих ограничений становится понятным, почему спутниковые геодезические приборы стали так популярны для мониторинга деформационных процессов.

Спутниковые геодезические приборы

В отличие от классических геодезических приборов, спутниковые (рис. 2) позволяют быстро и точно определять координаты точек на земной поверхности. Они могут быть использованы для мониторинга как вертикальных, так и горизонтальных перемещений, и не требуют установки множества приборов.



Рис. 2. Спутниковые геодезические приборы

Основной принцип спутникового геодезического прибора заключается в определении местоположения путем определения моментов времени приема синхронизированного навигационного сигнала от группировки космических спутников и координатных поправок измерений от наземных референцстанций антенной потребителя [4].

Спутниковая геодезия представляет собой новую технологию, использующуюся для определения координат и скоростей точек на земной поверхности. Она основана на использовании систем навигации. Далее рассмотрим основные принципы работы GPS и GLONASS.

GPS (Global Positioning System) – это система спутниковой навигации, разработанная США. GPS состоит из 24 спутников, которые кружат вокруг Земли на высоте 20 192 км [5]. Каждый спутник передает сигналы на земную поверхность, которые принимаются GPS-приемником. Он измеряет время, необходимое для прохождения сигнала от спутника до приемника, и использует эту информацию для определения расстояния между ними. GPS-приемник использует информацию от нескольких спутников, чтобы определить свое местоположение.

ГЛОНАСС – российская спутниковая система навигации, предназначенная для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Это единственная система в мире, которая предоставляет доступ к гражданскому сигналу глобального позиционирования в двухчастотных диапазонах L1 и L2 потребителям по всему миру на безвозмездной основе. Основой системы являются 24 космических аппарата, которые находятся на высоте 19 100 км и движутся в трех орбитальных плоскостях по 8 аппаратов в каждой [6]. Как и в случае с GPS, каждый спутник передает сигналы на земную поверхность, которые принимаются ГЛОНАСС-приемником, далее идет обработка информации от нескольких спутников и определяется местоположение.

Несмотря на свои преимущества, они также имеют свои ограничения. Например, они могут быть подвержены воздействию электромагнитных помех, которые могут привести к ошибкам в измерениях и быть неэффективны при работе в густонаселенных городских районах или в условиях, когда спутники находятся за пределами обзора.

Преимущества спутниковых геодезических приборов в мониторинге деформационных процессов

Спутниковые геодезические приборы имеют ряд преимуществ в сравнении с классическими приборами при мониторинге деформационных процессов:

1. Высокая точность измерений

Спутниковые геодезические приборы обеспечивают высокую точность измерений благодаря использованию большого количества спутников, которые передают сигналы на землю.

2. Высокая скорость работы

Возможность быстро измерять расстояния и получать данные. Это позволяет оперативно реагировать на изменения деформаций, что особенно важно в случае мониторинга объектов, находящихся в опасных зонах.

3. Возможность измерения удаленных точек

С помощью спутниковых геодезических приборов можно измерять удаленные точки, которые недоступны для классических приборов. Это позволяет охватывать большие территории и следить за деформационными процессами на больших объектах (таких как горы и дамбы).

4. Возможность работы в плохих условиях погоды

Они работают независимо от погодных условий, таких как дождь, снег или туман. Это делает их особенно полезными при мониторинге объектов в труднодоступных и экстремальных условиях.

5. Автоматизация

Спутниковые геодезические приборы имеют возможность автоматической записи данных и их передачи в центральную систему мониторинга. Это упрощает и автоматизирует процесс сбора данных, что позволяет сократить время и снизить вероятность ошибок.

6. Измерения деформаций на больших территориях

Спутниковые системы позволяют производить измерения на территориях до нескольких тысяч километров в диаметре.

7. Возможность работы в режиме реального времени

Оборудование может использоваться для непрерывного мониторинга деформаций в режиме реального времени. Это позволяет своевременно обнаруживать и отслеживать деформационные процессы, что особенно важно в случае опасных геологических явлений, таких как землетрясения или вулканические извержения.

В целом спутниковые геодезические приборы представляют собой эффективный и мощный инструмент для мониторинга деформационных процессов, который обладает многими преимуществами перед классическими геодезическими приборами.

Сравнительный анализ классических и спутниковых геодезических приборов

1. Точность измерений

Одним из важнейших параметров геодезических приборов является точность измерений, которая имеет решающее значение для достижения целей мониторинга деформационных процессов.

Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, имеют высокую точность измерений, которая может быть достигнута благодаря использованию высококачественных оптических систем и механизмов. Однако они имеют свои ограничения, которые могут привести к снижению точности измерений. Например, наличие атмосферных условий, таких как туман, дождь, снег или сильный ветер, может негативно сказаться на точности измерений.

Спутниковые геодезические приборы, такие как GPS и ГЛОНАСС, обеспечивают более высокую точность измерений по сравнению с классическими геодезическими приборами. Это происходит благодаря тому, что спутниковые системы позволяют получать более точные данные о координатах из-за использования сигналов, передаваемых со спутников. Однако следует отметить, что точность может зависеть от различных факторов, например, от атмосферных условий или от наличия помех в сигналах. Также необходимо учитывать, что спутниковые геодезические приборы могут требовать дополнительных расходов на обслуживание и калибровку, что может повлиять на их экономическую эффективность.

2. Влияние погодных условий и тектонической активности

Влияние погодных условий и тектонической активности на измерения является значительным фактором при использовании как классических, так и спутниковых геодезических приборов в мониторинге деформационных процессов. Классические приборы могут быть более подвержены воздействию погодных условий, таких как ветер, дождь и туман, что может привести к ухудшению точности измерений. В то же время спутниковые приборы могут быть более устойчивы и тем самым обеспечивать более стабильные измерения. Однако тектоническая активность может существенно влиять на точность измерений как классических, так и спутниковых геодезических приборов. Деформации земной коры могут вызывать изменение расстояний между станциями, что может привести к ошибкам в измерениях. В таких случаях важно проводить регулярный мониторинг и учитывать возможное влияние тектонической активности при интерпретации полученных результатов.

3. Время выполнения измерений

Более продолжительного времени для выполнения измерений требуют классические геодезические приборы по сравнению со спутниковыми. Это связано с установ-

кой оборудования на каждой точке измерения и с необходимостью выполнения ряда предварительных операций, таких как установка опорных точек, настройка приборов и т.д. Кроме того, для выполнения точных измерений с помощью классических геодезических приборов часто требуется большое количество персонала, что может увеличить время выполнения работ. Спутниковые геодезические приборы могут произвести измерения на больших площадях за более короткий промежуток времени. Они не требуют установки на каждой точке, что ускоряет процесс. Кроме того, они могут осуществлять непрерывный мониторинг, что позволяет получать данные почти в режиме реального времени. Некоторые ограничения при использовании спутниковых геодезических приборов связаны с погодными условиями и облачностью, которые могут повлиять на качество сигнала. Однако с появлением новых систем спутников, таких как ГЛОНАСС и Galileo, которые работают в дополнение к GPS, возможности спутниковых геодезических приборов становятся все более широкими.

Обобщение результатов сравнительного анализа

Из проведенного сравнительного анализа классических и спутниковых геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов можно сделать следующие выводы:

Спутниковые геодезические приборы имеют более высокую точность измерений в сравнении с классическими геодезическими приборами.

Спутниковые геодезические приборы позволяют осуществлять наблюдение за объектами, удаленными на большом расстоянии, и мониторинг в режиме реального времени.

Влияние погодных условий и тектонической активности на точность измерений классических геодезических приборов выше, чем на точность измерений спутниковых геодезических приборов.

Применение классических геодезических приборов оправдано в случаях, когда необходимо провести точные измерения вблизи объекта мониторинга [7].

Время выполнения измерений с использованием спутниковых геодезических приборов значительно меньше, чем время выполнения измерений с использованием классических геодезических приборов [7 – 8].

Более простыми в транспортировке являются спутниковые геодезические приборы; малогабаритная аппаратура, легко устанавливаемая на контролируемом объекте [9].

Вывод

Таким образом, можно сделать вывод, что спутниковые геодезические приборы являются более эффективным и удобным инструментом для мониторинга деформационных процессов, особенно в случаях, когда необходимо осуществлять дистанционное наблюдение за объектами на больших расстояниях и в режиме реального времени. Однако использование классических геодезических приборов также может быть оправдано в некоторых случаях, когда необходимы более точные измерения вблизи объекта мониторинга.

На основании проведенного сравнительного анализа можно дать следующие рекомендации по выбору приборов для мониторинга деформационных процессов:

1. В случаях, когда требуется быстрый и точный мониторинг деформаций на небольших участках, рекомендуется использовать классические геодезические приборы.
2. На больших участках или в отдаленных районах, где доступность территории является проблемой, рекомендуется использовать спутниковые геодезические приборы.
3. При выборе спутниковых геодезических приборов необходимо учитывать возможные ограничения, связанные с погодными условиями и наличием препятствий на территории [10 – 11].

4. Для повышения точности измерений и уменьшения влияния различных факторов рекомендуется использовать комбинацию классических и спутниковых геодезических приборов [10].

5. При выборе приборов для мониторинга деформационных процессов необходимо учитывать специфику и цели конкретного исследования, а также наличие доступных ресурсов и квалифицированных специалистов для работы с выбранными приборами.

6. GNSS-системы целесообразнее применять на довольно протяженных объектах с хорошо открытым небом: дорогах, сетях коммуникаций на незастроенной или малозастроенной территории. Кроме того, точность спутниковых измерений ниже, чем у классических оптических приборов, на относительно небольших расстояниях [12].

Таким образом, рекомендуется использовать классические геодезические приборы для мониторинга деформационных процессов, требующих высокой точности измерений, при условии, что это возможно в рамках временных и финансовых ограничений. В случаях, когда требуется быстрый мониторинг на больших территориях, рекомендуется использовать спутниковые геодезические приборы. При выборе оборудования необходимо учитывать конкретные условия эксплуатации и требования к точности измерений.

Список литературы

1. Ожиганов Е. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием горных разработок. URL: <https://pandia.ru/text/80/163/59177.php> (дата обращения: 9.11.2023)
2. Бесимбаева О.Г., 2019. Мониторинг деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 1, № 1, С. 82 – 91.
3. Пшидаток С.К., Забара В.В., 2020. Тенденции развития современного геодезического оборудования. *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год*. Отв. за выпуск А. Г. Коцаев. Краснодар, С. 410 – 412.
4. Добрянский И.А., 2022. Маркшейдерско-геодезические приборы, используемые на открытых горных работах в настоящее время. *Сборник материалов XIII международной научно-практической конференции*. С. 139 – 145.
5. Синенко А.А., 2019. Сравнение эффективности применения навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. *Аллея науки*, Т. 1, № 11(38), С. 900 – 906.
6. Алексеев В.Е., 2012. Сравнение эффективности применения многоантенных навигационных систем GPS и совмещенной ГЛОНАСС/GPS. *Известия высших учебных заведений. Электроника*, № 2 (94), С. 71 – 76.
7. Mohammad Idris, 2019. Evaluation of GPS-RTK and Total Station for Topographic Survey and Strategic Decision in Private Companies. *KnE Engineering*, P. 323 – 332.
8. M. Nandhini Chella Kavitha, R. Viswanath, P. Kavibharathi, K. Aakash, M. Balajimanikandan, 2018. A Comparative Study of Conventional Surveying Techniques with Total Station and GPS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, V. 9(1), P. 440 – 446.
9. Васильева И.Е., 2019. Использование спутникового метода наблюдений для целей деформационного мониторинга. *Мировая наука*, № 1(22), С. 351 – 354.
10. Hussein S.K., & Abdulla, K.Y., 2021. Surveying with GNSS and Total Station- A Comparative Study. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, V. 7(1), P. 59 – 73.
11. Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин К.В., 2022. Относительная деформация материи на микро- и макроуровне в условиях изменяющейся космической погоды. *Литосфера*, Т. 22, № 2, С. 228 – 238.
12. Клабуков И.В., Корецкая Г.А., 2017. Проблема выбора между ГНСС и тахеометром. *Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая". Секция «Маркшейдер»*

ское дело и геодезия», С. 11005. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/sections.htm> (дата обращения 9.11.2023)

References

1. Ozhiganov E. Sdvizhenie gornyykh porod i zemnoi poverkhnosti pod vliyaniem gornyykh razrabotok [Displacement of rocks and the earth's surface under the influence of mining]. URL: <https://pandia.ru/text/80/163/59177.php> (data obrashcheniya: 9.11.2023).
2. Besimbaeva O.G., 2019. Monitoring deformatsii zemnoi poverkhnosti na podrabatyvaemykh territoriyakh [Monitoring of deformations of the earth's surface in undermined territories]. *Interespo Geo-Sibir'*, V. 1, № 1, P. 82 – 91.
3. Pshidatok S.K., Zabara V.V., 2020. Tendentsii razvitiya sovremennogo geodezicheskogo oborudovaniya [Trends in the development of modern geodetic equipment]. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sbornik statei po materialam 75-i nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov po itogam NIR za 2019 god. Otv. za vypusk A. G. Koshchayev. Krasnodar*, P. 410 – 412.
4. Dobryanskii I.A., 2022. Marksheidersko-geodezicheskie pribory, ispol'zuemye na otkrytykh gornyykh rabotakh v nastoyashchee vremya [Mine surveying and geodetic instruments currently used in open pit mining]. *Sbornik materialov XII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. P. 139 – 145.
5. Sinenko A.A., 2019. Sravnenie effektivnosti primeneniya navigatsionnykh sistem GPS i GLONASS [Comparison of the use effectiveness use of GPS and GLONASS navigation systems]. *Alleya nauki*, V. 1, № 11(38), P. 900 – 906.
6. Alekseev V.E., 2012. Sravnenie effektivnosti primeneniya mnogoantennykh navigatsionnykh sistem GPS i sovmeshchennoi GLONASS/GPS [Comparison of the use effectiveness of multi-antenna navigation systems GPS and combined GLONASS/GPS]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika*, № 2 (94), P. 71 – 76.
7. Mohammad Idris, 2019. Evaluation of GPS-RTK and Total Station for Topographic Survey and Strategic Decision in Private Companies. *KnE Engineering*, P. 323 – 332.
8. M. Nandhini Chella Kavitha, R. Viswanath, P. Kavibharathi, K. Aakash, M. Balajimanikandan, 2018. A Comparative Study of Conventional Surveying Techniques with Total Station and GPS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, V. 9(1), P. 440 – 446.
9. Vasil'eva I.E., 2019. Ispol'zovanie sputnikovogo metoda nablyudenii dlya tselei deformatsionnogo monitoring [Use of the satellite observation method for the purposes of deformation monitoring]. *Mirovaya nauka*, № 1(22), P. 351 – 354.
10. Hussein S.K., & Abdulla, K.Y., 2021. Surveying with GNSS and Total Station- A Comparative Study. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, V. 7(1), P. 59 – 73.
11. Zubkov A.V., Sentyabov S.V., Selin K.V., 2022. Otnositel'naya deformatsiya materii na mikro- i makrourovne v usloviyakh izmenyayushcheisya kosmicheskoi pogody [Relative deformation of matter at the micro and macro level under conditions of changing space weather]. *Litosfera*, V. 22, № 2, S. 228 – 238.
12. Klabukov I.V., Koretskaya G.A., 2017. Problema vybora mezhdru GNSS i takheometrom [On the problem of choosing between GNSS and tacheometer]. *Sbornik materialov IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Rossiya molodaya". Sektsiya "Marksheiderskoe delo i geodeziya'*, P. 11005. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/sections.htm> (data obrashcheniya 9.11.2023).