

УДК 622.837:528.482

Харисова Ольга Дмитриевна
младший научный сотрудник
лаборатории сдвижения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: olgazheltysheva@gmail.com

МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация:

Рассмотрено современное состояние развития методов мониторинга подрабатываемых объектов, выполнен краткий обзор действующих нормативных документов. Отмечено, что существующий в настоящее время подход к оценке и прогнозу состояния подрабатываемых сооружений основан на вычислении и сопоставлении с допустимыми значениями линейных деформаций. Однако деформирование сооружений при подработке может иметь сложный пространственный характер, при котором традиционные инструментальные методы не всегда позволяют достоверно выявить и оценить параметры деформаций. Представлены результаты инструментальных наблюдений из практики автора, выполненные в г. Нижний Тагил на сооружении, попавшем в прямую подработку от подземных горных работ шахты Магнетитовая. Полученные значения относительных вертикальных деформаций оказались в несколько раз меньше допустимых, но при этом фактическое состояние изучаемого подрабатываемого сооружения свидетельствовало о высоком уровне протекающих в нем деформационных процессов. Представлена методика исследования подрабатываемого сооружения методом наземного лазерного сканирования, описан процесс обработки данных, выполнен анализ полученных результатов. По данным лазерного сканирования построена трехмерная модель сооружения, по которой выполнен ряд измерений. При сравнении полученного фактического контура горизонтального разреза сооружения с проектным выявлены неравномерные горизонтальные перемещения крупных частей здания, послужившие основной причиной образования трещин в его конструкции. В результате вычисления отклонений точек облака от эталонных плоскостей также выявлена кривизна несущих стен сооружения. Подчеркиваются преимущества выполнения мониторинга объемных деформационных процессов. Отмечена необходимость обновления или дополнения действующей в России нормативной документации.

Ключевые слова: подработанные территории, подработка зданий и сооружений, деформации зданий и сооружений, пространственные деформации, мониторинг, инструментальные наблюдения, лазерное сканирование

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.081

Kharisova Olga D.
Junior Research Worker,
Institute of Mining UB RAS,
620075, Ekaterinburg,
Mamina-Sibiryaka str., 58,
e-mail: olgazheltysheva@gmail.com

MONITORING OF THE SPATIAL DEFORMATION PROCESSES OF UNDERMINED STRUCTURES

Abstract:

In the article the modern state of development of methods for monitoring the undermined objects is considered, the brief review of the acting regulations is made. It is noted that the current approach to assessing and forecasting the state of undermined constructions bases on the calculation of linear deformations and comparison of them with the critical values. However, the deformation of constructions under the influence of mining can have a complex spatial character, when traditional instrumental methods not always allow reliable identification and evaluation of deformation parameters. The paper presents the author's practice results of instrumental observations of the building in the city of Nizhny Tagil experiencing impact of underground mining of the Magnetitovaya mine. Obtained values of relative vertical deformations were several times lower than the critical ones, but the actual state of the undermined construction under study indicated a high level of acting deformation processes. The technique of the study of undermined structure by the method of terrestrial laser scanning is presented, data processing methods are described, and analysis of the received results has been made. Based on the laser scanning data the three-dimensional model of the building was created for which a number of measurements were made. When comparing the obtained actual contour of horizontal cross-section of the construction with the project, irregular horizontal movements of large parts of the building were revealed, which were the main cause of cracking in its construction. As a result of the deviations cloud points calculation from the reference planes the curvature of the bearing walls of the structure was also revealed. The advantages of performing monitoring of volumetric deformation processes are underlined. The necessity of updating or addition of the acting national regulations is noted.

Key words: undermined territories, undermining of buildings and structures, deformations of buildings and structures, spatial deformations, monitoring, instrumental observations, laser scanning

Введение

При ведении горных работ процесс сдвижения горных пород может распространяться на большие расстояния от выработки и охватывать значительные по площади территории. Здания и сооружения, попавшие в зону вредного влияния горных работ, получают повреждения различной степени опасности. Увеличение объемов добычи полезных ископаемых, рост темпов строительства, усложнение систем разработки и конструкций зданий и сооружений усугубили воздействие процесса сдвижения земной поверхности на расположенные на ней объекты. Особенно актуальна данная проблема для горнопромышленных регионов, когда в зоне негативного влияния горных работ оказываются целые районы и даже отдельные населенные пункты. Вопросами эксплуатации зданий и сооружений на подработанных территориях занимаются исследователи России [1 – 4], ближнего [5, 6] и дальнего зарубежья [7 – 9].

Для обеспечения безопасной эксплуатации подрабатываемых объектов необходимо выполнять комплекс мер охраны, одной из которых являются инструментальные наблюдения за состоянием сооружений [10]. В настоящее время порядок выполнения наблюдений за процессом сдвижения земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями регламентируется четырьмя нормативными документами, перечень которых представлен в табл. 1.

Указанные Инструкции предполагают организацию мониторинга сооружений по традиционному принципу. Оборудование наблюдательной станции производится путем закладки стенных реперов (рис. 1) по периметру здания, как правило, на уровне фундамента, а также грунтовых реперов, располагаемых напротив стенных. Величина расстояния между реперами зависит от конструкции сооружения, а также его расположения в мульде сдвижения. Например, в зоне сосредоточенных деформаций (уступов) реперы располагаются на расстоянии 4 – 5 м друг от друга, что при большом количестве сооружений приводит к значительным затратам на оборудование наблюдательной станции.

Таблица 1

Перечень действующих инструкций по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми объектами

№№ п/п	Наименование документов	Год утверждения
1	Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и за подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях	1987
2	Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке на рудных месторождениях	1986
3	Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми зданиями и сооружениями на калийных рудниках Верхнекамского месторождения	2014
4	Инструкция по созданию наблюдательных станций и производству инструментальных наблюдений за процессами сдвижения земной поверхности при разработке нефтяных месторождений в регионе Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей	2014

Кроме того, как показывает практика маркшейдерских наблюдений, обеспечить сохранность реперов на весь срок продолжительности процесса сдвижения (особенно при многократной подработке) зачастую бывает затруднительно.

Согласно действующим нормативным документам, указанным в табл. 1, состав наблюдений включает в себя определение высотных отметок стенных реперов методом нивелирования, а также линейные измерения расстояний между ними. По данным этих измерений вычисляются деформации, допустимые величины которых для различных типов сооружений приводятся в Правилах или Указаниях по охране сооружений, разработанных для ряда бассейнов и отдельных месторождений России. Таких нормативных документов существует порядка трех десятков, их перечень содержится, например, в «Инструкции о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов...» [11].



Рис. 1 – Стенной репер

Как правило, все они в качестве критериев оценки состояния подрабатываемых объектов предполагают вычисление

- относительных горизонтальных деформаций, определяемых как отношение изменения длины интервала между реперами к его длине:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}; \quad (1)$$

- наклонов, определяемых как отношение разности оседаний смежных реперов к расстоянию между ними:

$$i = \frac{\Delta \eta}{L}; \quad (2)$$

- и (иногда) кривизны земной поверхности, значение которой вычисляется как разность наклонов смежных интервалов, отнесенная к полусумме их горизонтальных длин:

$$k = \frac{\Delta i}{L_{cp}}. \quad (3)$$

Определение деформаций подобным методом производится только в двух направлениях – в вертикальном и в направлении профильной линии (интервала между реперами). Таким образом, существующий в настоящее время подход к оценке и прогнозу состояния подрабатываемых объектов основан на вычислении и сопоставлении с допустимыми значениями линейных деформаций. Данный подход является в большой

степени упрощенным и обусловлен распространенными (и регламентированными нормативными документами) методами мониторинга деформационных процессов.

Однако, как показывает практика, деформации подрабатываемых объектов зачастую имеют сложный пространственный характер и не могут быть достоверно оценены по результатам вычисления указанных линейных деформаций. Кроме того, традиционные методы наблюдений являются дискретными, то есть позволяют изучать смещения лишь отдельных точек сооружения. Расположение реперов наблюдательных станций позволяет определять деформации только оснований и фундаментов, но не всей несущей конструкции сооружения.

Недостаточный учет пространственных деформаций сооружения, которые зачастую невозможно выявить в полном объеме в ходе традиционной геодезической съемки [5, 12], приводит к недостоверной оценке деформационного состояния его конструкции, что, в свою очередь, может привести к аварийным последствиям [13].

Методы исследования

На современном уровне развития маркшейдерско-геодезические методы позволяют определять трехмерные деформации подрабатываемых объектов. Одним из наиболее прогрессивных существующих методов натуральных наблюдений является наземное лазерное сканирование. Несмотря на относительно недавнее появление, данная технология все шире применяется для решения различных маркшейдерских, геодезических, горно-технических и других задач, в том числе и для мониторинга различных сооружений [14, 15].

Специалистами Института горного дела УрО РАН данный метод внедряется в практику маркшейдерских наблюдений за деформациями подрабатываемых объектов. В качестве одного из экспериментальных объектов было выбрано здание в г. Нижний Тагил Свердловской области – одного из старейших горнодобывающих регионов России. Добыча руды на территории г. Нижний Тагил была начата еще в 18 в. и производится до сих пор. В зону влияния процесса сдвижения от ведения горных работ оказались вовлечены значительные по площади территории, на которых расположены различные промышленные и гражданские объекты.

Для мониторинга деформационных процессов на территории г. Нижний Тагил была оборудована многоуровневая наблюдательная станция, на которой сотрудниками ИГД в течение длительного периода времени выполнялись инструментальные наблюдения. Станция состояла из традиционных профильных линий, стенных реперов в сооружениях, а также площадного геодинамического полигона [16].

Для выполнения сканирования было выбрано здание больницы, построенное в середине 50-х годов XX века, и в настоящее время испытывающее на себе влияние подземных горных работ. Кроме того, сооружение расположено в зоне влияния одного из главных тектонических нарушений Высокогорского месторождения – взбросо-сдвига «Средний», который проявляет постоянную геодинамическую активность как в подземных выработках, так и на поверхности.

Здание имеет вытянутую в плане форму и достигает 75 м в длину; центральная его часть двухэтажная, крылья – одноэтажные. При организации наблюдательной станции здание было оборудовано тремя стенными реперами (рис. 2), по которым в течение 6 лет проводились инструментальные наблюдения методом геометрического нивелирования, причем в последней серии наблюдались лишь 2 репера, так как один из них оказался утрачен. В табл. 2 представлены величины вертикальных смещений реперов между сериями наблюдений, а также вычисленные по формуле (2) значения относительных вертикальных деформаций – наклонов. Максимальное зафиксированное значение наклона ($0,5 \cdot 10^{-3}$) значительно меньше предельно допустимого значения для объектов I категории охраны ($4 \cdot 10^{-3}$). Несмотря на это, здание претерпевает активное трещинообразование, которое продолжает развиваться (рис. 3).

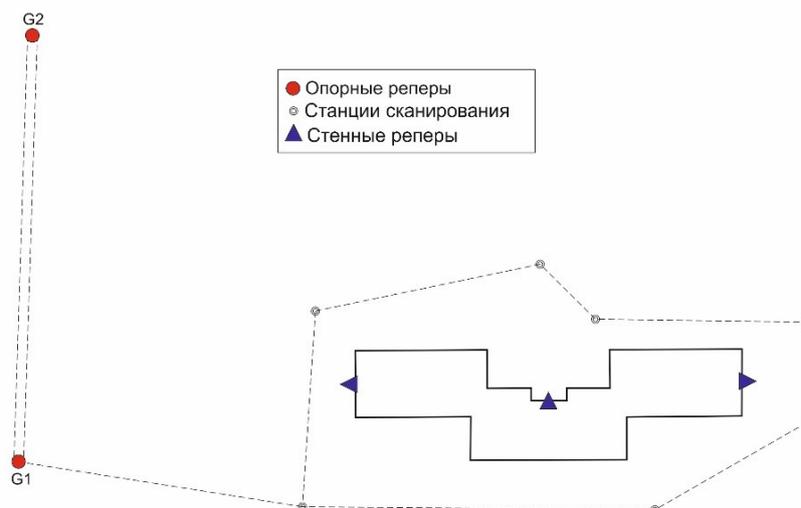


Рис. 2 – Схема сооружения и наблюдательной станции

Таблица 2

Вертикальные смещения ственных реперов и относительные вертикальные деформации (наклоны)

Rp	S между реперами, м	Вертикальные смещения реперов между сериями наблюдений, мм						Наклон интервала, *0.001					
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	6-1	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	6-1
1	39.4	-41	-5	-70	-16		-132*						
								0.2	0.1	0.2	-0.1		0.5
2	36.3	-34	-3	-64	-18	5	-114						
										0.0	0.0	-0.1	-0.2
3				-65	-18	3	-120						

*для Rp1 приведено значение оседания между сериями 5-1



Рис. 3 – Трещины в подрабатываемом сооружении

Лазерное сканирование было выполнено с 7 станций, положение которых было привязано тахеометром к опорным реперам G1 и G2, входящим в геодинимический полигон г. Нижний Тагил (см. рис. 2). Так как данные реперы также находятся в мульде сдвижения, их положение постоянно переопределяется GPS-методом в каждой серии наблюдений.

Последующая обработка данных сканирования включала в себя объединение сканов, полученных с различных точек стояния, фильтрацию лишних шумовых точек, а также моделирование.

Объединение производилось с помощью специальных сферических марок, расположенных в зонах перекрытия облаков точек в количестве не менее трех. Средняя ошибка совмещения каждой пары связующих марок составила 8 мм. Суммарная погрешность определения положения точек сканирования, включающая в себя также инструментальную погрешность лазерного сканера и ошибки взаимного ориентирования, составила в среднем 15 мм. В результате было получено единое облако точек здания.

Моделирование производилось путем аппроксимации наружных стен сооружения вертикальными плоскостями в специализированном программном обеспечении в автоматическом режиме по методу наименьших квадратов. Значение среднеквадратического отклонения точек от полученной плоскости, использованных для ее построения, составило в среднем 10 мм. При этом, что касается точности определения положения самой плоскости, то она намного выше точности единичного измерения точки сканером за счет большого количества измеренных точек, и, как правило, достигает первых миллиметров [15, 17].

Результаты исследования

Для оценки деформаций изучаемого сооружения было выполнено проецирование облаков точек стен на построенные плоскости – для каждой точки облака, соответствующего определенной плоскости, вычислялось кратчайшее расстояние до нее, в зависимости от величины которого точка «кодировалась» определенным цветом. Таким образом, строится цветовая карта отклонений облака точек от плоскости, позволяющая оценить дефекты поверхности.

В результате было установлено, что крылья здания обладают собственной кривизной, амплитуда которой достигает нескольких сантиметров, причем левое крыло имеет выпуклый вид, а правое – вогнутый.

Кроме того, был построен горизонтальный разрез здания (рис. 4), позволивший выполнить сравнение проектного и фактического контуров стен сооружения. Видно, что части сооружения имеют значительные смещения друг относительно друга. Максимальное смещение наблюдается у крыльев здания и достигает около 10 см.

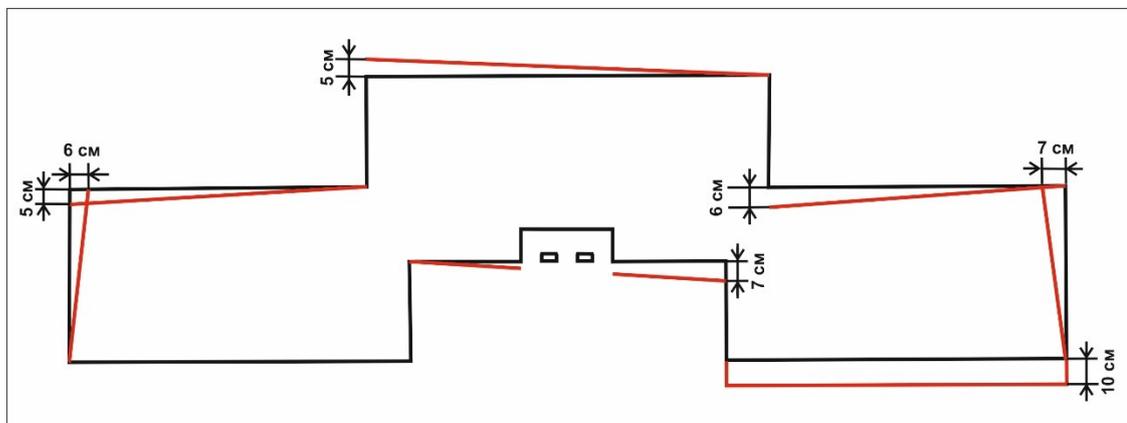


Рис. 4 – Схема деформирования здания в плане

Таким образом, причиной образования трещин в конструкции здания послужило неравномерное горизонтальное перемещение его крупных частей. Искривление стен также свидетельствует о том, что конструкция подрабатываемого сооружения испытывает сложный механизм деформирования, недоступный для контроля традиционными методами, но выявляемый по результатам трехмерного мониторинга.

Заключение

При определенных условиях деформирования подрабатываемых объектов применение традиционных методов мониторинга не всегда позволяет выявить наличие деформационных процессов и определить природу их появления и механизм развития.

Современные методы позволяют определять трехмерные деформации подрабатываемых объектов. Изучение пространственных деформаций сооружений дает возможность более полно оценить состояние их конструкций, способствуя повышению эффективности применения защитных мероприятий.

Необходимо также отметить несоответствие большинства действующих нормативных документов современному уровню развития маркшейдерско-геодезических технологий и необходимость их частичного или полного обновления или дополнения.

Литература

1. Воробьев А.В. Численное моделирование усиления грунтового основания храма, расположенного на подработанной территории / А.В. Воробьев, И.Н. Фаизов, Г.Г. Кашеварова // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – Т. 10. № 4. – С. 89 - 95.
2. Воробьев А.В. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульде сдвижения / А.В. Воробьев, Г.Г. Кашеварова // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 9. – С. 10 - 22. DOI: 10.5862/MCE.44.2
3. Нестерова В.Ю. Оценка влияния подземных горных работ на состояние зданий и сооружений на земной поверхности на угольных месторождениях / В.Ю. Нестерова, И.В. Барсуков, Ю.Н. Стрюков // Уголь. – 2014. – № 10. – С. 29-34.
4. Иофис М.А. Развитие методов оценки влияния горных работ на подрабатываемые здания и сооружения / М.А. Иофис, А.В. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – Отдельный выпуск № 1. – С. 90 - 96.
5. Гавриленко Ю.Н. Скашивание и скручивание земной поверхности при обработке пологих угольных пластов лавами неправильной формы и при подработке разрывов / Ю.Н. Гавриленко, А.Г. Петрушин, Е.О. Маланчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірнично-геологічна. – 2007. – № 6. – С. 30 - 43.
6. Лобов М.И. Воздействие подработки на здания и сооружения / М.И. Лобов, Т.В. Морозова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – № 6. – С. 110 - 114.
7. Gabriela Locality: Starting Geodetic Observations to Detect the Surface Manifestations from Undermining / Kajzar V., Doležalová H., Souček K., Staš L. // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2012. – Vol. 9, No. 3. – P. 401 - 407.
8. Example Building Damage Caused by Mining Exploitation in Disturbed Rock Mass / Florkowska L. // Studia Geotechnica et Mechanica. – 2013. – Vol. XXXV, No. 2. – P. 19-37. DOI: 10.2478/sgem-2013-0021
9. Comparison of Building Damage Assessment Methods for Risk Analysis in Mining Subsidence Regions / Saeidi A., Deck O., Verdel T. // Geotechnical and Geological Engineering. – 2013. – Vol. 31, Issue 4. – P. 1073-1088. DOI: 10.1007/s10706-013-9633-7.

10. Желтышева О.Д. Меры охраны зданий и сооружений от подземных горных работ в карстующемся массиве / О.Д. Желтышева, В.П. Драсков, С.В. Усанов // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2. – С. 71-76. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.071
11. Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок: Утв. Госгортехнадзором России, 07.09.96. – 26 с.
12. Кобыща О.Е. Особенности эксплуатации, обследования и обслуживания зданий на закарстованных территориях / О.Е. Кобыща, В.И. Клевко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 18 - 33.
13. Желтышева О.Д. Технология мониторинга нелинейных деформаций зданий и сооружений / О.Д. Желтышева, В.И. Ручкин, С.В. Усанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 6. – С. 53 - 60.
14. Овчаренко А.В. Методика оперативного определения степени деформированности сооружений на основе 3D-сканирования / А.В. Овчаренко, О.А. Медведев // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, №2. – С. 54 - 59.
15. Яшнов А.Н. Методика определения перемещений пролетного строения моста в процессе его надвигки с применением наземного лазерного сканера в г. Новосибирске / А.Н. Яшнов, В.А. Середович, А.В. Иванов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: IX Междунар. науч. конгр., 15 - 26 апр. 2013 г., Новосибирск; Междунар. науч. конф. "Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия": сб. материалов в 3 т. – Новосибирск: СГГА, 2013. – Т. 1, № 3. – С. 144-150.
16. Панжин А.А. Об особенностях проведения геодинамического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии / А.А. Панжин, Н.А. Панжина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 6. – С. 46 - 55.
17. Ермаков В.А. Усовершенствование методики мониторинга пространственных деформаций стержневых конструкций сооружений с помощью лазерного сканирования / В.А. Ермаков // Вестник МГСУ. – 2011. – № 12. – С. 206 - 211.