

УДК 622.837

**ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА НЕЛИНЕЙНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

С. В. Усанов, В. И. Ручкин, О. Д. Желтышева

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: usv@igduran.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620219, г. Екатеринбург, Россия*

Описаны особые случаи деформирования зданий, когда при низких значениях деформаций, полученных по результатам инструментального контроля, происходили сильные визуальные повреждения конструкции. Проведен эксперимент по определению деформаций таких объектов методом лазерного сканирования, в результате которого установлено, что здания в горизонтальной плоскости испытывают сложные деформации. Для установления причин нелинейных деформаций зданий и предотвращения аварий предложена комплексная технология мониторинга территорий и объектов, базирующаяся на учете напряженно-деформированного состояния и блочного строения подстилающего горного массива.

Деформации зданий, инструментальные наблюдения, лазерное сканирование, напряженно-деформированное состояние, горный массив

Безопасность эксплуатации объектов, испытывающих влияние геомеханических процессов, определяется величиной фактических деформаций конструкции и подстилающего горного массива. Здания в зависимости от сложности конструкции и социально-экономической значимости разделяются на три категории, которым соответствуют свои допустимые деформации. Превышение деформациями допустимого значения сигнализирует об опасности дальнейшей эксплуатации объекта и о необходимости принятия мер по обеспечению надежности конструкции.

Для контроля деформаций оборудуется специальная наблюдательная станция [1], которая представляет собой совокупность точек, закрепленных в конструкции сооружения и на прилегающей территории специальными знаками — реперами и марками. Периодическое переопределение высотной отметки реперов и расстояния между ними составляет основу традиционного метода наблюдения. Основным слабым местом традиционной методики является дискретность и разреженность фиксируемых точек. Кроме этого, вычисленная деформация распределяется на весь контролируемый интервал. Происходит сглаживание истинных значений, в то время как деформации проявляются сконцентрировано и реализуются в виде трещин. Это препятствует объективной оценке фактического деформационного состояния объекта в целом, а при сложных условиях деформирования традиционные инструментальные наблюдения часто показывают отсутствие деформаций.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00324).

В практике охраны зданий и сооружений от вредного влияния процесса сдвижения и других геомеханических процессов [2–4] нередко возникают ситуации, когда измеренные значения деформаций в несколько раз меньше допустимых, но при этом визуальная оценка состояния объекта указывает на его предаварийное состояние. В конструктивных элементах сооружения образуются трещины раскрытием в несколько сантиметров, происходят локальные обрушения обделки и присутствуют другие признаки высоких деформаций. Особую опасность такие ситуации представляют для сложных инженерных сооружений и ответственных объектов, когда недооценка имеющихся деформаций может повлечь аварии и катастрофы.

Например, в зоне влияния подземной разработки Сарановского хромитового месторождения находится двухэтажное каменное здание школы [5]. Согласно результатам наблюдений, выполняемым по традиционной методике [6], школа за 19 лет испытала равномерное небольшое оседание в пределах 8–20 мм (таблица). При этом наклон интервалов не превышает 10 % от допустимого значения $4.00 \cdot 10^{-3}$. При таких низких деформациях состояние здания следует считать удовлетворительным и безопасным. Однако внутри школы развиваются трещины и зафиксированы несколько случаев обрушения штукатурки с причинением вреда здоровью людей.

Приращение вертикальных деформаций здания школы за 19 лет [5]

Номер репера	Средний интервал, м	Отметки реперов линии, м по сериям наблюдений				Оседания реперов, мм			Наклоны линий, $i \cdot 0.001$		
		06.93(00)	08.10(09)	08.11(10)	07.12(11)	00–11	09–11	10–11	00–11	09–11	10–11
Rp_1368		451.652	451.659	451.663	451.672	–20	–13	–9			
Rp_1208	38.0	451.800	451.809	451.812	451.822	–22	–13	–10	0.05	0.00	0.03
Rp_0958	28.0	451.414	451.411	451.414	451.425	–11	–14	–11	–0.39	0.04	0.04
Rp_0808	38.0	451.759	451.759	451.758	451.767	–8	–8	–9	–0.08	–0.16	–0.05
Rp_1368	28.0	451.652	451.659	451.663	451.672	–20	–13	–9	0.43	0.18	0.00

Другой пример разрушительных повреждений при малых измеренных деформациях — двухэтажное каменное здание больницы в г. Нижний Тагил, которое находится в зоне сдвижения от подземной разработки. Традиционные инструментальные наблюдения фиксируют очень низкие значения деформаций [7]. При этом в здании неоднократно происходили случаи обрушения штукатурки. Сложилась парадоксальная ситуация, когда инструментальные наблюдения свидетельствуют о низком уровне деформаций, а визуальные — о высоком (рис. 1). Кроме случаев повреждения объектов под воздействием вредного влияния горных работ, существуют несколько примеров разрушительных деформаций зданий, в районе расположения которых отсутствуют какие-либо горнодобывающие предприятия [8–10].

Причина такого несоответствия кроется в деформировании зданий по плоскостям, недоступным для традиционного контроля. Эта задача может быть решена методом наземного лазерного сканирования [1, 7], который позволяет с высокой плотностью измерений (несколько точек на 1 см^2 поверхности) получить фактическую 3D-модель всего объекта (рис. 2). Путем сопоставления отсканированной модели здания с проектными и/или эталонными плоскостями можно получить отклонения каждой внешней стены или здания в целом от исходной формы [7].



Рис. 1. Повреждения конструкции здания с лицевой стороны (фото С. В. Усанова): 1 — трещины на первом этаже в левом крыле; 2 — повреждения на втором этаже в центральной части



Рис. 2. Облако точек отсканированного здания

Для оценки деформаций рассматриваемого двухэтажного здания, которое по классификации объектов, подлежащих охране от вредного влияния подземных горных работ, относится ко II категории, оптимальным является метод проекций стен на вертикальные плоскости. С помощью компьютерного моделирования в левое крыло здания была вписана эталонная плоскость, по которой можно определить отклонение левого и правого крыла в горизонтальной плоскости. Горизонтальный срез стены и эталонной плоскости наглядно демонстрирует (рис. 3) два вида фактических деформаций: 1) смещение крыльев здания относительно друг друга; 2) каждое крыло обладает собственной кривизной. При построении среза стены здания рассмотрено 1212 точек отсканированного облака, которые аппроксимированы полиномом шестого порядка:

$$y = -12x^6 - 9x^5 - 7x^4 - 5x^3 + 0.001x^2 - 0.009x + 0.0153,$$

где y — смещение стены в плане от эталонной плоскости, м; x — протяженность здания, м.

Сдвиг правого крыла относительно левого составляет 0.9–0.11 м. Левое крыло здания имеет выпуклый вид, а правое — вогнутый. Таким образом, элементы здания деформировались волнообразно, при этом амплитуда каждого крыла от собственной средней линии составляет 0.02 м. Проведя подобный анализ для каждой стены здания, удалось составить схему усредненных смещений стен в плане от заданной исходной плоскости (рис. 4). Установлено, что при длине здания 75 м смещения стен составляют от 50 до 100 мм.

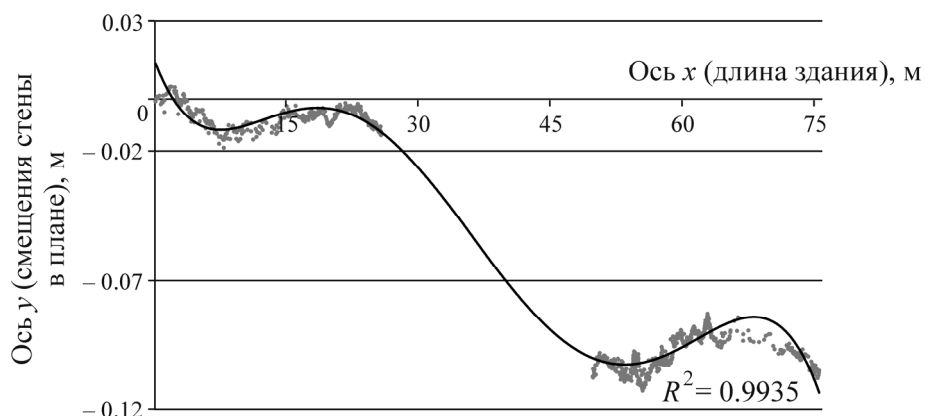


Рис. 3. Смещение длинной стены здания в плане относительно заданной вертикальной плоскости

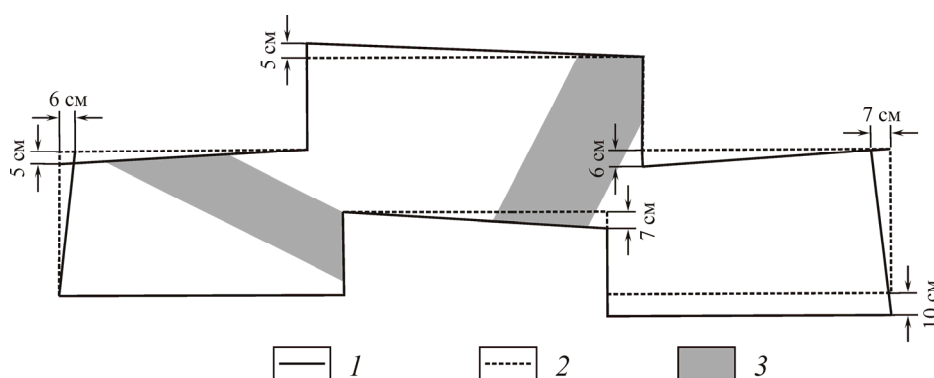


Рис. 4. Схема смещения здания в плане относительно проектного контура: 1 — фактический контур здания; 2 — проектный контур здания; 3 — наиболее трещиноватые участки здания

Таким образом, причиной образования трещин в конструкции здания (см. рис. 1) послужило неравномерное смещение крупных частей в горизонтальной плоскости. Искривление стен характеризует сложный механизм деформирования здания, которому присущ нелинейный характер. Кроме того, сквозные трещины раскрытием до 0.03 м пересекают здание в двух местах, проходят перпендикулярно друг к другу и делят здание на блоки.

Для выяснения причин такого непростого механизма деформирования здания проведен анализ факторов, определяющих подвижность подстилающего горного массива, и составлена информационная модель его структурно-деформационных характеристик [11]. Выяснено, что здание расположено длинной осью вдоль простирания рудных тел, а короткой — вкрест. Центральную часть пересекает одно из трех главных тектонических нарушений Высокогорского месторождения — взбросо-сдвиг “Средний”, который проявляет постоянную геодинамическую активность как в подземных выработках, так и на поверхности [4]. Соразмерно с горизонтальным смещением правого крыла здания относительно левого (90–110 мм) сместились и грунтовые реперы наблюдательной станции на 150 мм за 6 лет наблюдений (рис. 5). Следовательно, здание испытывает влияние неравномерных движений крыльев взбросо-сдвига, которые реализуются в форме сдвига одной части здания относительно другой в горизонтальной плоскости. Это свидетельствует о влиянии на здание не только прямых техногенных факторов (подземных горных работ), но и природных, таких как самоорганизация иерархически блочной среды [12], геодинамические движения [3, 4, 13] и напряженное состояние горного массива [14, 15].

Определение напряженно-деформированного состояния горного массива, являющегося основанием для рассматриваемого здания, выполнено по результатам наблюдений за сдвижением горных пород на этом участке с 2005 по 2011 г. Для оценки использовались приращения координат реперов, расположенных вокруг объекта на расстоянии 70–300 м. Выбранные реперы образуют в совокупности локальный геодинамический полигон площадью порядка 8 га, в центре которого находится исследуемое здание (рис. 6).



Рис. 5. Фрагмент участка г. Нижний Тагил и его структурно-деформационная характеристика: 1 — здание; 2 — сбросо-сдвиг “Средний”; 3 — изолинии оседаний поверхности; 4 — направление действий главных деформаций; 5 — номер и расположение деформационных марок в здании; 6 — векторы сдвижения горных пород в районе исследуемого здания

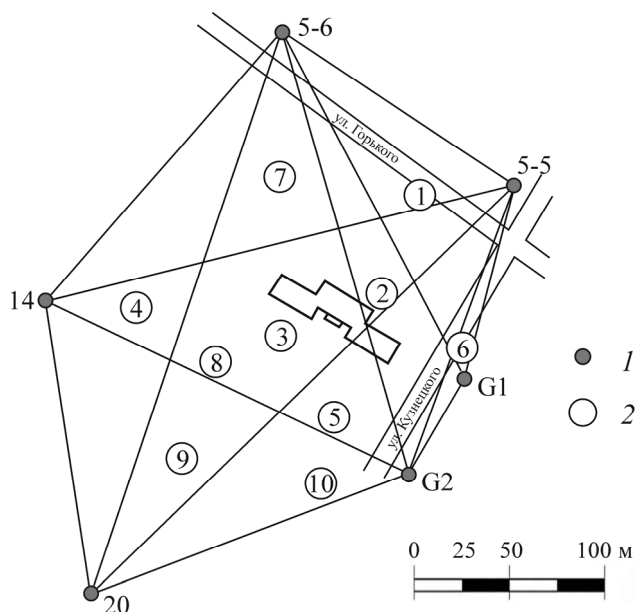


Рис. 6. Схема геодинамического полигона для определения напряжений горного массива вокруг рассматриваемого здания: 1 — пункт геодинамического полигона; 2 — центр треугольника и его номер

Полигон разбит на десять замкнутых треугольников. По приращению координат вершин треугольников определены горизонтальные деформации каждой стороны всех треугольников полигона. По найденным деформациям рассчитаны главные напряжения и направления их действия [15, 16].

Центр каждого треугольника является точкой определения напряженно-деформированного состояния массива. Совокупность напряжений в центре треугольников характеризует его напряженно-деформированное состояние. С помощью программного обеспечения Surfer по значению первого инварианта построено поле напряжений. Значение первого инварианта определено как сумма главных σ_1 и σ_2 горизонтальных напряжений.

За период наблюдений с 2005 по 2011 г. на данном локальном участке горного массива сформировались две зоны с противоположным знаком напряжений (рис. 7). Рассматриваемое здание располагается на участке, где происходит переход от сжимающих напряжений к растягивающим. При этом изолиния нулевых деформаций дважды пересекает здание, что аналогично смещению крыльев здания (см. рис. 3), полученному по результатам лазерного сканирования. Следовательно, величина и характер деформаций здания определяются параметрами поля напряжений горного массива, обусловленного влиянием техногенных и природных факторов.

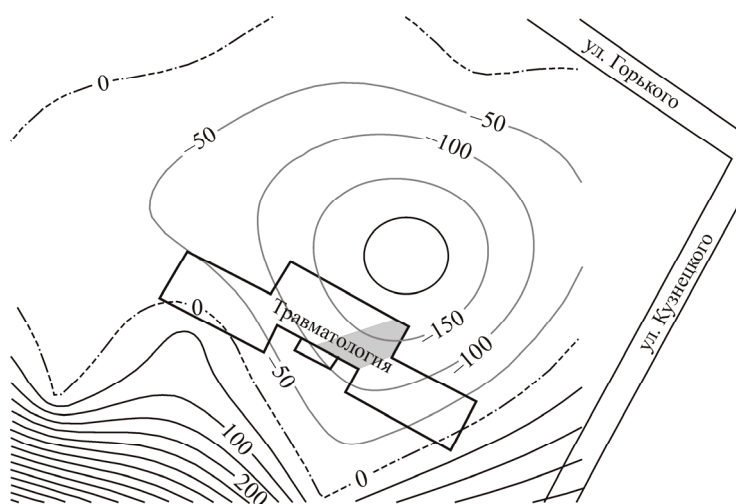


Рис. 7. Приращения напряжений горного массива в районе рассматриваемого здания с 2005 по 2011 г.

ВЫВОДЫ

Подрабатываемые здания и сооружения подвергаются сложным деформационным процессам, которые необходимо контролировать в пространственной системе координат. Существуют ситуации, когда нелинейные деформации намного превышают значения линейных деформаций, получаемых традиционными методами контроля.

Нелинейное деформирование подрабатываемых объектов определяется деформированием подстилающего горного массива, которое обусловлено его структурно-деформационными характеристиками: 1) величиной и ориентировкой направления главных напряжений; 2) наличием, активностью, мощностью и направлением тектонических нарушений.

Для предотвращения развития нелинейных деформаций необходимо не только избегать расположения зданий на подвижных тектонических нарушениях, но и ориентировать их в плане таким образом, чтобы направление главных осей объекта совпадало с направлением дейст-

вия главных напряжений в горном массиве. Решение поставленных задач возможно в результате проведения комплексных исследований, которые обобщенно можно назвать технологией мониторинга нелинейных деформаций зданий и сооружений. Технология основана на проведении последовательных экспериментальных и аналитических исследований и включает:

- исследование движений горных пород геодезическими методами на базах, превышающих размеры промплощадки предприятия или целого жилого квартала;
- ранжирование территории на блоки по уровню подвижности;
- определение наиболее уязвимых зданий и сооружений по расположению их на границах блоков;
- создание объемной модели зданий с помощью наземного лазерного сканирования и оценка текущего деформационного состояния путем сопоставления конструктивных элементов с проектными параметрами.

Комплексный подход позволяет оценить состояние объекта, что повышает безопасность эксплуатации зданий и сооружений, выявить и прогнозировать участки концентрации деформаций, принимать меры охраны, направленные на конкретные конструктивные элементы, что особенно важно для сложных и ответственных сооружений, где аварии могут повлечь катастрофические последствия. Следует также отметить, что при указанных достоинствах сканирование обладает высокой трудоемкостью по сравнению с традиционными методами контроля деформаций, и это препятствует его повсеместному применению для мониторинга большого количества зданий и сооружений, например в городах на подработанных территориях.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории сдвижения горных пород ИГД УрО РАН за помощь в проведении полевых экспериментальных работ, В. П. Драскова за предоставленный материал по деформациям здания школы в п. Сараны, Ю. П. Коновалову за методическую помощь, А. А. Панжина за камеральную обработку наблюдений за сдвижением горных пород в районе исследованного здания и А. Д. Сашурина за обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов С. В., Коновалова Ю. П., Желтышева О. Д. Современные технологии мониторинга процесса сдвижения // Горн. журн. — 2012. — № 1.
2. Усанов С. В., Коновалова Ю. П. Деформационные процессы при строительстве тоннелей метрополитена в Екатеринбурге // ГИАБ. — 2011. — № S11.
3. Коновалова Ю. П. Исследование циклических короткопериодных геодинамических деформаций территорий при выборе площадки под строительство атомных станций // ГИАБ. — 2010. — № 7.
4. Усанов С. В. Геодинамические движения горного массива при техногенном воздействии крупного горно-обогатительного комбината // ГИАБ. — 2011. — № S11.
5. Драсков В. П. Обеспечение безопасности эксплуатации сооружений шахты на Сарановском месторождении хромитов // ГИАБ. — 2010. — № 6.
6. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / МЦМ СССР. — М.: Недра, 1988.
7. Усанов С. В., Желтышева О. Д. Исследование деформаций здания в зоне влияния подземных горных работ методом лазерного сканирования // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: 2-я рос.-кит. науч. конф. 02–05 июля 2012 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

8. **Гуляев А. Н., Осипова А. Ю., Шапов В. А.** Результаты геофизических исследований на площадке аварийного отселенного девятиэтажного жилого дома // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-практ. конф. 12–14 октября 2011 г. / ред. А. Д. Сашурин. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012.
9. **Мельник В. В., Замятин А. Л., Пустуев А. Л.** Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для прогноза и снижения риска аварий и катастроф при недропользовании // Горн. журн. — 2012. — № 1.
10. **Тагильцев С. Н., Хаустова А. Ю., Лукьянов А. Е., Далатказин Т. Ш.** Влияние активной тектоники на деформации зданий в Екатеринбурге // Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии: тр. Междунар. науч. конф. 25–26 мая 2010 г. — М.: МГУ, 2010.
11. **Усанов С. В., Мельник В. В., Замятин А. Л.** Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
12. **Балек А. Е., Замятин А. Л.** Процессы самоорганизации в иерархически блочной геомеханической среде при техногенном воздействии // ГИАБ. — 2006. — № 7.
13. **Далатказин Т. Ш.** Создание геодинамического полигона на территории г. Екатеринбурга // ГИАБ. — 2008. — № 1.
14. **Ручкин В. И.** Мониторинг за изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород на больших базах // ГИАБ. — 2008. — № 4.
15. **Сашурин А. Д.** Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999.
16. **Панжин А. А.** Исследование сдвижений земной поверхности при разработке месторождений с применением площадных инструментальных методов // Изв. вузов. Горн. журн. — 2009. — № 2.

Поступила в редакцию 20/III 2014