УДК 622.83

В.Н.ГУСЕВ, *д-р техн. наук, профессор, kmd@spmi.ru*
М.Г.ВЫСТРЧИЛ, *аспирант, ratven@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.N.GUSEV, *Dr. in eng. sc., professor, kmd@spmi.ru*
M.G.VYSTRCHIL, *post-graduate student, ratven@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Изложена методика определения деформационных параметров процесса сдвижения горных пород на основе данных мониторинга лазерно-сканирующими системами, согласно которой оседания и деформации получают из сравнения соответствующих профилей, проведенных в любом направлении по цифровым моделям участка мониторинга и отражающих разные стадии процесса сдвижения.

Ключевые слова: лазерно-сканирующие системы, мониторинг, оседания, деформации наклонов и кривизны.

METHOD FOR DETERMINING THE VERTICAL AND STRAIN DISPLACEMENT USING LASER-SCANNING SYSTEMS

The technique of determination of deformation parameters of process of displacement of rocks on the basis of data of monitoring is stated by laser scanning systems according to which subsidence and deformation receive from comparison of the corresponding profiles which have been carried out in any direction on digital models of a site of monitoring, reflecting different stages of process of displacement.

Key words: laser-scanning systems, monitoring, subsidence, slope, curvature, earth surfaces deformation.

При применении лазерно-сканирующих систем (ЛСС) представляется нецелесообразным использование классической схемы наблюдения за деформациями, предполагающей закладку ряда реперов непосредственно в области сдвижений и последующие регулярные наблюдения за изменением их положений*. Излагаемый метод основан на определении сдвижений и деформаций путем сравнения формы профилей, построенных путем рассечения сканов (системы точек лазерных отражений), полученных в результате периодических лазерно-сканирующих съемок, вертикальной плоскостью в одном и том же месте. Направление и местоположение вертикальных плоскостей может быть выбрано любое, соответственно, сдвижения и деформации могут быть получены для любой точки периодически снимаемого лазерным сканером участка. При таком подходе становится необходимым решить ряд задач, обусловленных как сложностью самого процесса сдвижений, так и специфичностью получаемых данных.

* Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / ВНИМИ. СПб, 1998. 291 с.

Rules of protection of constructions and natural objects from harmful influence of underground mountain workings out on coal deposits / VNIMI. Saint Petersburg, 1998. 291 p.

Результаты съемки ЛСС представляют собой совокупность многих тысяч точек лазерных отражений от поверхностей снимаемых объектов, определенных в условной системе координат, начало которой совпадает с центром лазерного сканера. Пересчет точек лазерных отражений в истинную систему координат осуществляется за счет применения элементов внешнего ориентирования*. При неблагоприятных условиях погрешности такой процедуры значительны. Полностью исключить эти ошибки при переходе в истинную систему координат невозможно, а свести к минимуму – проблематично, поэтому представляется целесообразным проводить все определения без перевода результатов съемки в истинную систему координат, т.е. непосредственно в условной системе.

При такой постановке задачи возникает необходимость однозначного определения положения рассекающей плоскости на сканах, отражающих разные стадии процесса сдвижения одного и того же участка мониторинга. Наиболее простым способом решения поставленной задачи представляется ориентирование рассекающей плоскости относительно нескольких контрольных точек, однозначно определяемых на каждом скане (рис.1). Следует оговориться, что на всем протяжении работ не требуется каких-либо мероприятий по координированию контрольных точек, требуется только их однозначное определение на каждом скане. В качестве контрольных точек могут выступать различные объекты: пункты геодезических сетей, углы зданий, характерные точки рельефа или точки, заложенные непосредственно для проведения работ по мониторингу. Основное свойство этих точек – неизменность положения в пространстве на весь период проведения мониторинга лазерно-сканирующими системами.

Задачу по определению положения рассекающей плоскости относительно контрольных точек можно решить как аналитическим, так и графическим способами. В частности, аналитический вариант может быть решен на основе формул пространственной линейной засечки. Минимальное количество точек, необходимое для решения данного алгоритма, – три, а большее их количество добавляет избыточность данных, повышая точность определения положения плоскости, и гарантирует возможность решения задачи в случае утери из-за повреждения какого-либо из пунктов.

Непосредственный алгоритм расчета сдвижений и деформаций представляет ряд последовательных вычислений, где на основе полученных абсолютных значений оседаний профиля местности находят значения наклонов и кривизны соответственно как первую и вторую производную от оседаний.

Для вычисления оседаний необходимо разбить полученные ранее профили на интервалы. Размер интервала или частота разбивки выбирается, исходя из сложности рельефа и требуемой детальности распределения деформаций. Увеличенная плотность разбивки повышает степень соответствия и достоверности модели реальному изменению профиля за счет его деформирования, но при этом возрастает трудоемкость вычислений. Следует отметить, что необходимым условием для однозначного определения расчетных сдвижений и деформаций является разбивка на одинаковое количество интервалов так, чтобы концы каждого интервала совпадали в пространстве с концами тех же интервалов изучаемых профилей.

После проведенной разбивки производится вычисление превышений как разности между высотными отметками смежной пары точек каждого интервала изучаемой профильной линии (рис.2):

$$\Delta H_{do_n} = Y_{do_{n+1}} - Y_{do_n};$$

$$\Delta H_{ps_n} = Y_{ps_{n+1}} - Y_{ps_n}.$$

Далее вычисляются превышения каждой точки относительно начальной точки как сумма превышений на участках от начальной до *n*-й точки:

---

* Основы наземной лазерно-сканирующей съемки: Учеб. пособие / В.Н.Гусев, А.И.Науменко, Е.М.Волохов, В.А.Голованов; Санкт-Петерб. гос. горный ун-т. СПб, 2011. 80 с.

Earth surfaces laser-scanning foundation: Tutorial / V.N.Gusev, A.I.Naumenko, E.M.Volohov, V.A.Golovanov; Saint Petersburg state mining university. Saint Petersburg, 2011. 80 p.

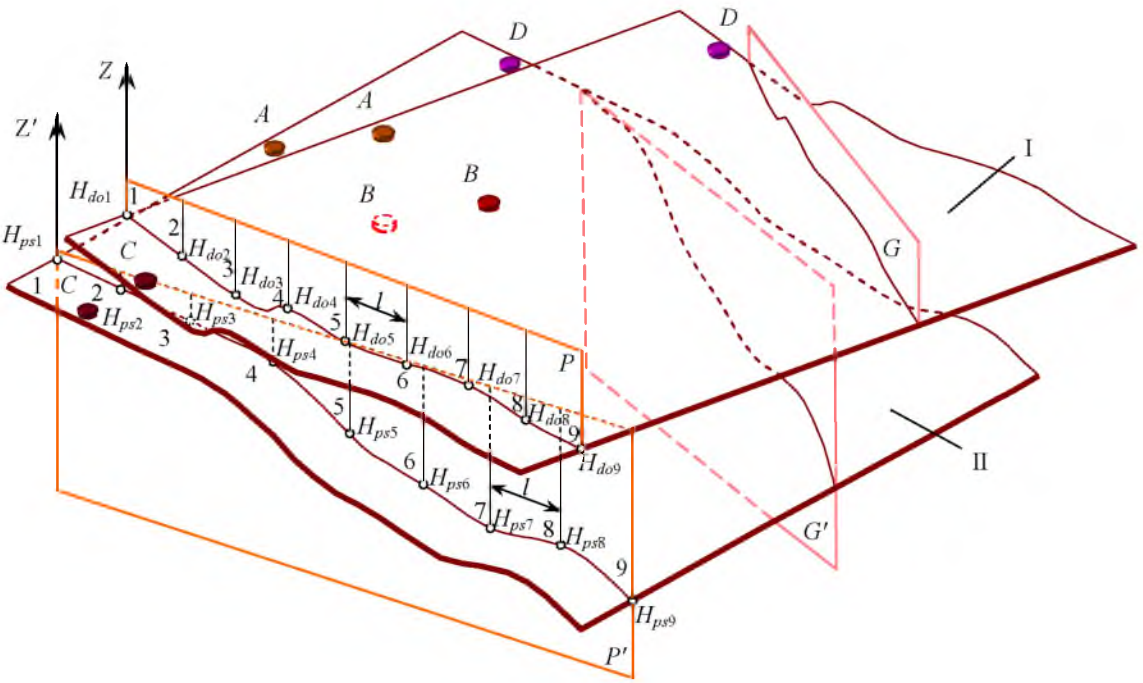


Рис.1. Погрешность регистрации сканов и ориентирование рассекающих плоскостей относительно контрольных точек

I – поверхность до деформаций; II – поверхность после деформаций; *A*, *B*, *C*, *D* – контрольные точки; *P*, *P′*, *G*, *G′* – рассекающие плоскости

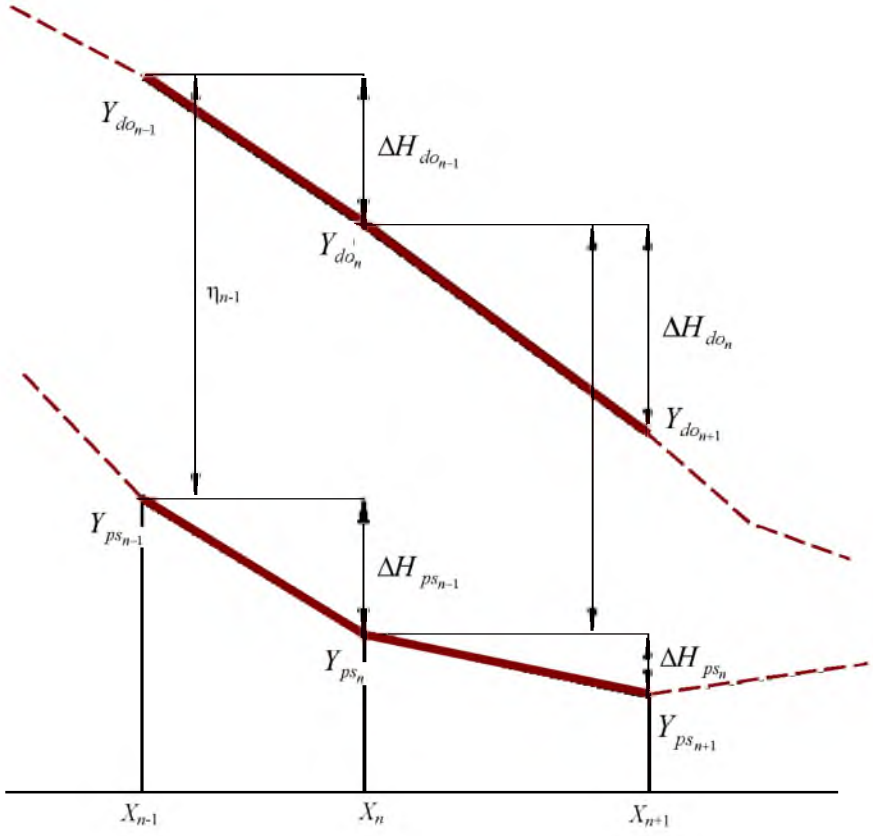


Рис.2. Вычисление оседаний точек через относительные превышения в среде AutoCad

$$H_{do_n} = \sum_{n=0}^{n} \Delta H_{do_n}; \quad (1)$$

$$H_{ps_n} = \sum_{n=0}^{n} \Delta H_{ps_n}. \quad (2)$$

Разности между соответствующими величинами, полученными по формулам (1) и (2), будут являться оседаниями точек профиля, по величинам которых можно судить о произошедших в рассматриваемом профиле изменениях:

$$\eta_n = H_{ps_n} - H_{do_n}.$$

Используя вычисленные значения оседаний, рассчитывают значения наклонов на каждом интервале профиля как первую производную от оседаний:

$$i_n = \frac{\eta_{n+1} - \eta_n}{X_{n+1} - X_n}. \quad (3)$$

В свою очередь, рассчитанные по формуле (3) наклоны позволяют вычислить кривизну для каждой точки профиля:

$$k_n = \frac{i_{n+1} - i_n}{(X_{n+2} - X_n)/2}.$$

На основе полученных распределений деформаций наклонов и кривизны по различным профилям участка мониторинга можно выделять зоны с максимальными сжимающими и растягивающими силами, осуществлять прогнозные расчеты устойчивости исследуемой поверхности, выявлять закономерности протекания деформационных процессов.

Преимуществами изложенной методики наблюдений за сдвижением и деформациями относительно классической схемы наблюдений являются:

- сведение к минимуму полевых работ по закладке реперов;
- возможность получения сдвижений и деформаций в любой точке участка, систематически снимаемого лазерно-сканирующей системой;
- безопасность ведения деформационного мониторинга в зонах провалов вследствие ведения горных работ;
- ведение мониторинга объектов с недоступными участками (откосы уступов карьеров и отвалов, здания и сооружения);
- возможность проведения деформационного мониторинга исторических памятников архитектуры без ущерба для них от закладки системы рабочих реперов наблюдательных станций.