

Э. Н. Кучменко¹✉

Маркшейдерский контроль деформаций при закладке выработанного пространства

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kuchmenko.elya@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены вопросы маркшейдерского контроля деформаций при закладке выработанного пространства. Показано, что применение закладочных технологий снижает интенсивность сдвижений массива горных пород, но не исключает развитие остаточных деформаций, обусловленных перераспределением напряжений, деформируемостью закладочного массива и оседанием поверхности. Целью работы является разработка расчетно-методического подхода к предварительному обоснованию параметров маркшейдерского мониторинга. В основу положена упрощенная функция влияния, позволяющая построить прогнозный профиль оседания для условного горнотехнического объекта. Для оценки применимости методов измерений использован критерий обнаружимости смещений. На расчетном примере определены максимальная осадка, параметр зоны влияния, рекомендуемый шаг наблюдательной сети и периодичность контрольных циклов. Показана целесообразность использования нивелирования как основного метода, а наземного лазерного сканирования — как вспомогательного средства пространственного анализа деформаций.

Ключевые слова: маркшейдерский контроль, деформации, закладка, оседание, мониторинг, сдвижение

*E. N. Kuchmenko*¹✉

Mine surveying control of deformations during backfilling of mined-out space

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kuchmenko.elya@gmail.com

Abstract. The paper deals with mine surveying control of deformations during backfilling of mined-out space. Backfilling reduces the intensity of rock mass movements, but does not eliminate residual deformations caused by stress redistribution, deformability of the backfill mass and surface subsidence. The purpose of the study is to develop a calculation-based methodological approach to the preliminary substantiation of mine surveying monitoring parameters. A simplified influence function is used to build a predicted subsidence profile for a conditional mining object. A displacement detectability criterion is applied to assess the suitability of measurement methods. The calculation example determines the maximum subsidence, the influence-zone parameter, the recommended spacing of observation points and the frequency of control cycles. The results confirm the expediency of geometric leveling as the main method and terrestrial laser scanning as an auxiliary tool for spatial deformation analysis.

Keywords: mine surveying control, deformation, backfilling, subsidence, monitoring, displacement

Введение

Закладка выработанного пространства является одним из основных способов управления напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при подземной разработке месторождений. Ее применение позволяет повысить устойчивость вмещающих пород, снизить вероятность развития опасных сдвижений и ограничить воздействие горных работ на земную поверхность [1, 2, 3].

В современных условиях закладка рассматривается не только как средство повышения безопасности, но и как элемент рационального освоения недр и снижения экологических последствий подземной добычи [4, 5]. Вместе с тем она не исключает развитие остаточных деформаций, обусловленных перераспределением напряжений и деформируемостью закладочного массива [6, 7, 8].

Нормативно-методические документы указывают на необходимость систематического наблюдения за сдвижением горных пород, деформациями земной поверхности и подрабатываемых объектов [9]. В практике маркшейдерского контроля применяются геометрическое нивелирование, тахеометрические измерения, спутниковые методы, лазерное сканирование и дистанционный мониторинг [10, 11, 12, 13, 19].

Целью работы является разработка расчетно-методического подхода к обоснованию параметров маркшейдерского контроля деформаций при закладке выработанного пространства на основе прогнозной оценки оседания и критерия обнаружимости смещений. Научная новизна работы заключается в формализации выбора параметров маркшейдерского контроля через связь прогнозной величины оседания, точности измерений, шага наблюдательной сети и периодичности наблюдений.

Методы и материалы

Исследование выполнено как расчетно-методическое. Его результатом является не натурная оценка конкретного рудника, а подход, применимый при предварительном проектировании системы наблюдений. Для демонстрации методики принят условный горнотехнический объект с параметрами, характерными для подземной разработки с закладкой выработанного пространства. Принятые величины не относятся к конкретному месторождению и используются только для расчетной апробации подхода.

Для предварительной оценки распределения оседания использована упрощенная функция влияния. Такой подход соответствует общему принципу методов прогноза сдвижений, в которых итоговое оседание поверхности рассматривается как функция расстояния от зоны подземной выемки [14, 15, 16, 20]. В данной работе функция применяется не для детального промышленного прогноза, а для получения расчетного профиля, необходимого при выборе параметров наблюдений.

Таблица 1 – Исходные параметры расчетной модели

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Глубина разработки	H	300 м	условно принятое значение
Мощность вынимаемого тела	m	2,5 м	условно принятое значение
Тип закладки	-	твердеющая	расчетное допущение
Коэффициент остаточного оседания	q	0,10	принят для демонстрации методики
Коэффициент распространения влияния	a	0,25	принят расчетно
Погрешность нивелирования	σ_H	2 мм	для оценки обнаружимости
Погрешность тахеометрии	σ_T	5 мм	для оценки обнаружимости
Погрешность GNSS	σ_{GNSS}	≥ 10 мм	зависит от режима наблюдений

Расчет распределения оседания по профильной линии задан выражением:

$$s(x) = S_{max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}, \quad (1)$$

где $s(x)$ – оседание в точке профиля, м; S_{max} – максимальная осадка, м;
 x – расстояние от центра зоны влияния, м; i – параметр распространения влияния, м.

Максимальная осадка определена по выражению:

$$S_{max} = q \cdot m, \quad (2)$$

где q – коэффициент остаточного оседания; m – мощность вынимаемого тела, м.

Параметр распространения влияния задан в виде:

$$i = a \cdot H, \quad (3)$$

где a – коэффициент распространения влияния; H – глубина разработки, м.

При принятых исходных данных получаем:

$$S_{\max} = 0,10 \cdot 2,5 = 0,25 \text{ м}, \quad (4)$$

$$i = 0,25 \cdot 300 = 75 \text{ м}.$$

Таким образом, для принятой расчетной модели максимальная прогнозная осадка составляет 0,25 м, а параметр зоны влияния - 75 м.

Для оценки возможности надежного выявления деформаций введен инженерный критерий обнаружимости:

$$K_d = \frac{\Delta s}{\sigma}, \quad (5)$$

где K_d – коэффициент обнаружимости; Δs – ожидаемое смещение между циклами наблюдений, мм; σ – средняя квадратическая погрешность метода, мм.

В работе принято условие надежного обнаружения:

$$K_d \geq 3.$$

Такое условие означает, что ожидаемое смещение должно как минимум в три раза превышать погрешность измерений.

Для обоснования периодичности наблюдений использована зависимость между приростом оседания и скоростью деформационного процесса:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где v – скорость оседания, мм/сутки; Δt – интервал между циклами наблюдений, сутки.

Из условия $K_d \geq 3$ следует:

$$\Delta t \geq \frac{3\sigma}{v}. \quad (7)$$

Данное выражение позволяет назначать периодичность не произвольно, а с учетом того, какое смещение успевает накопиться за интервал между измерениями.

Результаты

По расчетной функции влияния построен прогнозный профиль оседания для принятого условного объекта. Максимальное значение осадки получено в центре зоны влияния и составляет 250 мм. По мере удаления от центра значение $s(x)$ уменьшается по экспоненциальной зависимости (рис. 1).

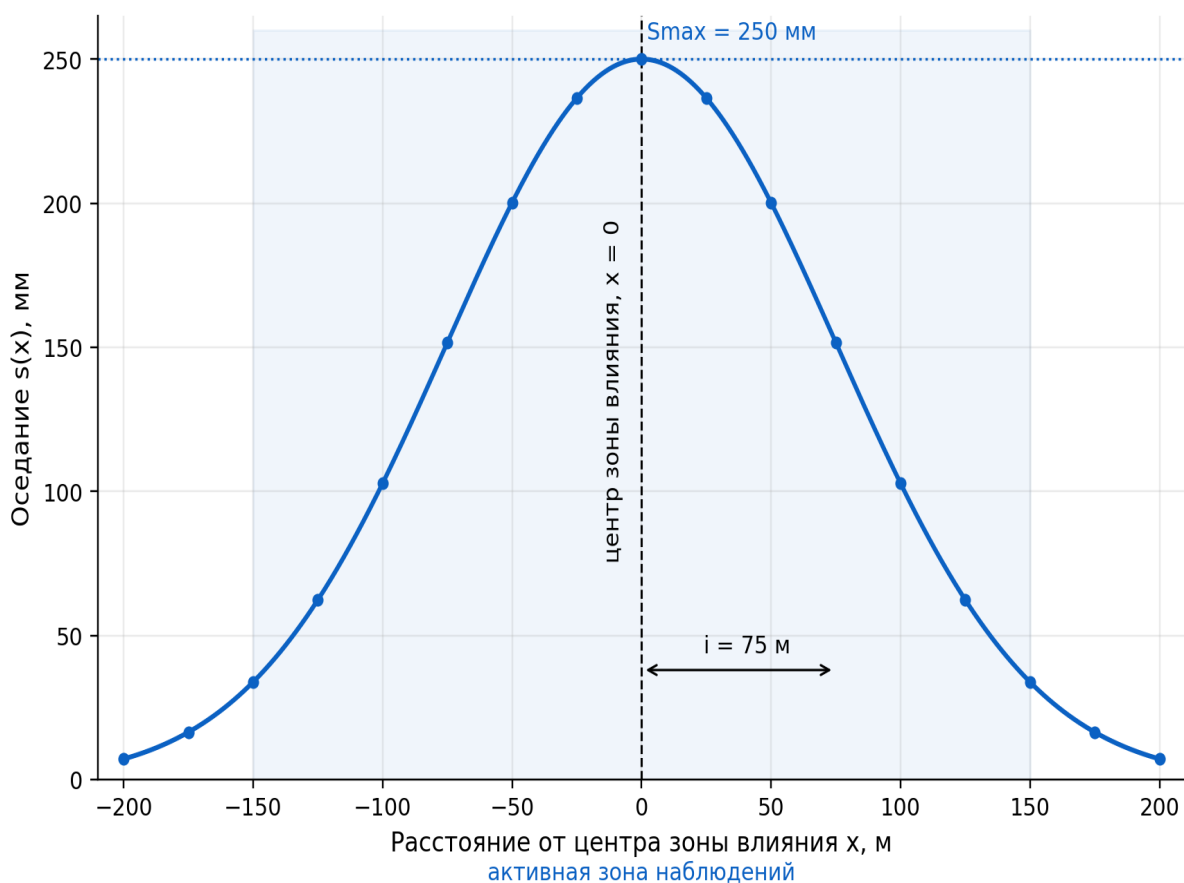


Рис. 1. Расчётный профиль оседания поверхности

Для оценки распределения деформаций рассчитаны значения оседания в характерных точках профильной линии (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения оседания по профильной линии

Расстояние от центра x , м	Оседание $s(x)$, м	Оседание, мм
0	0,250	250
25	0,237	237
50	0,200	200
75	0,152	152
100	0,103	103
125	0,062	62
150	0,034	34
175	0,016	16
200	0,007	7

Анализ расчетного профиля показывает, что в пределах примерно 75-150 м от центра зоны влияния изменение оседания остается достаточно выраженным, поэтому именно эта область является наиболее информативной для размещения профильных наблюдательных пунктов.

Для выбора методов наблюдений выполнено сопоставление ожидаемых смещений с ориентировочной точностью измерений. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Оценка применимости методов контроля по критерию обнаружимости

Метод	Ориентировочная погрешность σ , мм	Минимально обнаруживаемое смещение при $Kd = 3$, мм	Основная область применения
Геометрическое нивелирование	2	6	вертикальные осадки
Тахеометрические измерения	5	15	пространственные смещения
GNSS	10 и более	30 и более	опорные пункты, крупные смещения

Из табл. 3 следует, что при необходимости фиксации малых вертикальных осадок основным методом должно являться геометрическое нивелирование. Тахеометрические измерения целесообразно применять для определения пространственного положения пунктов и контроля горизонтальной составляющей смещений. GNSS может использоваться для контроля стабильности исходной опорной сети и крупных поверхностных смещений, однако для малых вертикальных деформаций его применение ограничено точностью и условиями приема спутникового сигнала [17, 18].

Для активной стадии деформационного процесса принято расчетное значение скорости оседания $v = 2$ мм/сутки. При использовании нивелирования с $\sigma = 2$ мм минимальный интервал между наблюдениями по условию обнаружимости составит:

$$\Delta t \geq \frac{3 \times 2}{2} = 3 \text{ суток.}$$

Следовательно, при активном развитии деформаций рационально назначать контрольные циклы с интервалом 3-7 суток. После снижения скорости оседания периодичность может быть увеличена до 10-30 суток.

На основании расчетного профиля и критерия обнаружимости предложены следующие параметры наблюдательной сети:

- в центральной и краевой частях зоны влияния шаг профильных пунктов 10-20 м;
- за пределами активной зоны влияния шаг 25-50 м;
- исходные реперы должны размещаться вне предполагаемой зоны сдвига;

- контрольные циклы на активной стадии следует выполнять чаще, чем на стадии затухания деформаций;
- схема наблюдений должна корректироваться по результатам первых циклов измерений.

Предлагаемая последовательность маркшейдерского обеспечения контроля деформаций включает: сбор исходных горнотехнических данных; расчет прогнозной осадки; построение профиля $s(x)$; выбор методов измерений по критерию обнаружимости; назначение шага наблюдательной сети; назначение периодичности контрольных циклов; корректировку сети по фактическим данным наблюдений.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что при закладке выработанного пространства маркшейдерский контроль должен проектироваться с учетом не только общих рекомендаций, но и расчетной величины ожидаемых деформаций. Если предполагаемое смещение меньше погрешности метода, результаты наблюдений не позволяют уверенно отделить реальное перемещение точки от случайной ошибки измерения.

Предложенный подход не заменяет детальное геомеханическое моделирование и натурные наблюдения, но может применяться на предварительной стадии проектирования маркшейдерской наблюдательной станции. Его преимущество состоит в простоте исходных данных и возможности быстро оценить чувствительность выбранной схемы наблюдений.

Перспективным направлением развития маркшейдерского контроля является применение наземного лазерного сканирования. Данный метод позволяет получать детализированную трехмерную информацию о состоянии деформируемых участков и может использоваться как дополнение к традиционным наблюдениям при мониторинге горных объектов [12]. Для условий рассматриваемой работы наземное лазерное сканирование целесообразно рассматривать как вспомогательный метод уточнения формы мульды сдвижения и пространственного анализа деформаций, тогда как нивелирование сохраняет значение основного метода контроля вертикальных осадок.

Сравнение с опубликованными исследованиями показывает, что закладка действительно является эффективным средством снижения оседаний, однако остаточные деформации сохраняются и требуют контроля [4, 5, 6]. Современные работы также подтверждают целесообразность комплексного применения геодезических методов при мониторинге горных объектов [10, 11, 13, 17].

Заключение

Выполненное исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Закладка выработанного пространства уменьшает интенсивность деформаций массива горных пород, но не исключает необходимость систематического маркшейдерского контроля.

2. Для предварительной оценки оседания может быть использована упрощенная функция влияния, позволяющая построить расчетный профиль сдвижения поверхности.

3. В работе предложен критерий обнаружимости смещений $K_d = \Delta s / \sigma$, позволяющий оценивать пригодность методов наблюдений с учетом ожидаемой величины деформаций и точности измерений.

4. На расчетном примере при $H = 300$ м, $m = 2,5$ м и $q = 0,10$ максимальная прогнозная осадка составила 0,25 м, а параметр зоны влияния - 75 м.

5. Геометрическое нивелирование целесообразно использовать как основной метод контроля вертикальных осадок; тахеометрические измерения - для пространственного контроля; GNSS и наземное лазерное сканирование - как вспомогательные методы для опорной сети, крупных смещений и уточнения пространственной формы деформаций.

6. Для принятой модели рекомендован шаг наблюдательных пунктов 10-20 м в активной зоне и 25-50 м за ее пределами. На активной стадии деформирования периодичность наблюдений может составлять 3-7 суток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кологривко А. А. Маркшейдерское дело. Подземные горные работы : учеб. пособие. - Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2012. - 412 с.
2. Ковалевский В. В. Маркшейдерские работы при подземной разработке месторождений. - М. : Недра, 1985. - 368 с.
3. Справочник маркшейдера / под ред. В. В. Ржевского. - М. : Недра, 1986. - 495 с.
4. Huo W., Zhu J., Zhang P., Li M. Surface Subsidence Prediction Method for Backfill Mining with Super-High-Water Material // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, No. 22. - 15791. - DOI: 10.3390/su152215791.
5. Li M., Yan Y., Dai H., Zhang Z. Study on Rock and Surface Subsidence Laws of Super-High Water Material Backfilling and Mining Technology: A Case Study in Hengjian Coal Mine // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, No. 11. - 8713. - DOI: 10.3390/su15118713.
6. Li G., Hu Z., Wu S., Wang X. A Case Study on Ground Subsidence and Backfill Deformation in a Mining Area Using Monitoring and Numerical Simulation // Remote Sensing. - 2022. - Vol. 14, No. 18. - 4555. - DOI: 10.3390/rs14184555.
7. Cao W., Wang X., Li P., Zhang D., Sun C., Qin D. Wide Strip Backfill Mining for Surface Subsidence Control and Its Application in Critical Mining Conditions // Sustainability. - 2018. - Vol. 10, No. 3. - 700. - DOI: 10.3390/su10030700.
8. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. - 3rd ed. - Dordrecht : Springer, 2004. - 628 p.
9. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. - М. : Недра, 1988. - 112 с.
10. Kaltchev I., Tzenkov T., Stoyanov A. Geodetic monitoring of displacements and deformations in mining regions // Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring. - Athens, 2019. - P. 1-8.
11. Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowski A. Deformation monitoring surveys - old problems and new solutions // Reports on Geodesy. - 2009. - No. 2(87). - P. 45-52.
12. Gikas V. Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation // Sensors. - 2012. - Vol. 12, No. 8. - P. 11249-11270. - DOI: 10.3390/s120811249.

13. Zhu M., Zhang H., Liu Y., Chen X. High-precision monitoring and prediction of mining area subsidence using SBAS-InSAR and deep learning // *Scientific Reports*. - 2024. - Vol. 14. - 28987.
14. Whittaker B. N., Reddish D. J. *Subsidence: Occurrence, Prediction and Control*. - Amsterdam : Elsevier, 1989. - 528 p.
15. Peng S. S. *Surface Subsidence Engineering*. - Littleton : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1992. - 161 p.
16. Luo Y. An influence function method based subsidence prediction program for longwall mining operations in inclined coal seams // *Mining Science and Technology*. - 2009. - Vol. 19, No. 5. - P. 592-598. - DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60110-1.
17. Nguyen H. V., Pham K. C., Nguyen D. B., Nguyen L. Q. Application of the GNSS Method in the Monitoring of Mine Surface Displacement: A Systematic Review // *Inzynieria Mineralna*. - 2024. - Vol. 2, No. 1. - P. 96-104.
18. Ding X. L., Chen Y. Q., Zhu J. J. Monitoring of ground deformation using GPS // *Engineering Geology*. - 2001. - Vol. 61, No. 2-3. - P. 119-129.
19. Setan H., Singh R. Deformation Analysis of a Geodetic Monitoring Network // *Geomatica*. - 2001. - Vol. 55, No. 3. - P. 333-346.
20. Saeidi A., Deck O., Verdel T. An improved methodology for applying the influence function for subsidence hazard prediction // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. - 2021. - Vol. 138. - 104623.

© Э. Н. Кучменко, 2026