

# Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>

**ЛЕВКИН Ю.М.**

Доктор техн. наук,  
профессор,  
член Союза маркшейдеров России,  
105064, г. Москва, Россия,  
e-mail: lev5353@bk.ru

*В представленной статье предложен метод анализа аварийных горных выработок на предмет их восстановления. В основе данного метода лежит использование подземных беспилотных летательных аппаратов, оснащенных инновационными технологиями лазерного сканирования или зондирования, позволяющими осуществлять дистанционный мониторинг областей смещений горных пород в кровле на аварийных участках горных выработок. Использование данного дистанционно управляемого маркшейдерского оборудования позволяет установить местоположение и размеры опасных областей смещения пород в кровле. На основе этого, с помощью предложенной математической модели, устанавливаются значения нормальных компонентов напряжений в исследуемых областях смещения. В результате, если в данных областях смещений значения нормальных компонентов напряжений не превышают пределы прочности на растяжение горных пород, то горная выработка подлежит восстановлению.*

**Ключевые слова:** опасные для жизни человека подземные горные выработки, нарушенный породный массив, трещины отрыва, коэффициент интенсивности напряжений, беспилотные летательные аппараты, дистанционное зондирование.

**Для цитирования:** Левкин Ю.М. Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // Уголь. 2022. № 6. С. 32-34. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.

## ВВЕДЕНИЕ

На горнодобывающих предприятиях периодически возникает необходимость восстановления горных выработок, ранее находившихся в эксплуатации и прекративших работу в результате возникновения в них чрезвычайной ситуации, связанной с наличием большого объема метана, последствий пожара, возникновения горного удара. Как правило, это недоступные и опасные для жизни человека подземные горные выработки. Поэтому для диагностики степени нарушенности горных пород и конструктивных элементов крепи горных выработок могут быть использованы подземные беспилотные летательные аппараты (БЛА) различной модификации, а также передвижные по почве горной выработки транспортные средства (автоскан). БЛА и автосканы оснащены камерами видеонаблюдения, 3D-лазерного сканирования или лидарами. Они позволяют обеспечить создание 3D-моделей окружающей среды и планов горных вы-

работок, а также проводить объемную съемку недоступного пространства без присутствия человека. Для качественной съемки подземных объектов БЛА и автосканы оснащены системой предотвращения столкновений в подземном пространстве. Приведенные инновационные маркшейдерские приборы и оборудование, осуществляющее дистанционное зондирование или сканирование, были разработаны и внедрены в производство горнодобывающей канадской компанией «Clicktox Solutions» [1, 2, 3, 4, 5]. Их активное внедрение в производство затруднено из-за отсутствия критериев оценки полученной информации, по которой можно было бы судить о возможности восстановления этих выработок.

### АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Критерии оценки восстановления горных выработок после ликвидации чрезвычайной ситуации непосредственно связаны с размерами области нарушенного породного массива, который был вовлечен в процесс деформирования при протекании обрушения пород кровли. Поэтому для обоснованного определения условий, при которых возможно восстановление горной выработки после обрушения пород кровли, требуется анализ напряженно-деформированного состояния породного массива на основании полученной информации с использованием технологии дистанционного зондирования или сканирования.

Обычно при анализе напряженно-деформированного состояния породного массива в каждом конкретном случае выявляют наиболее слабое звено, устойчивое состояние которого предопределяет состояние всех остальных звеньев, и исходя из этого выносят решение о восстановлении или невозможности восстановления горной выработки после чрезвычайной ситуации.

При разработке месторождений полезных ископаемых слабым звеном часто является кровля выработок, так как именно в ней, в первую очередь, возможно образование областей растягивающих напряжений, которые ответственны за образование трещин.

Анализ состояния горных пород в подземных выработках, не эксплуатируемых длительное время после чрезвычайной ситуации, на основании снимков, полученных путем удаленной съемки, 3D-лазерного сканирования, показал, что с достаточной точностью можно определить лишь смещение горных пород кровли. Причем характерный размер области, в которой произошло смещение горных пород, равен длине / образовавшейся трещины. Она, в свою очередь, должна быть соизмерима с характерными размерами полученного объема нарушенных горных пород, который определен относительно их деформационных свойств и напряжений в работах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Предполагая, что горные породы в области смещения будут хрупкими, а также будут иметь в наличии трещины отрыва, мы получим следующую математическую модель дистанционно зондированного участка относительно нормальных напряжений, разработанную методом аналогий с работой [14]:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right), \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right), \quad (2)$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0. \quad (3)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  – нормальные напряжения;  $K_I = \sigma \sqrt{\pi l}$  – коэффициент интенсивности напряжений;  $r$  – радиус-вектор;  $\theta$  – угол, отсчитываемый от продолжения трещины,  $-\pi < \theta < \pi$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения нормальных напряжений, полученные с помощью выражений (1), (2) и (3), позволяют определить поле напряжений в области смещения горных пород в кровле выработки, обнаруженных путем использования технологии дистанционного зондирования. Если полученные значения нормальных компонентов напряжений не превосходят пределы прочности на растяжение горных пород в области смещения, то горная выработка подлежит восстановлению. В противном случае горная выработка не восстанавливается из-за больших затрат.

### Список литературы

- LiDAR mapping of ground damage in a heading re-orientation case study / N. Evaneck, B. Slaker, A. Iannacchione et al. // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. Is. 1. P. 67-74.
- Slaker B.A., Murphy M.M., Miller T. Analysis of extensometer, photogrammetry and laser scanning monitoring techniques for measuring floor heave in an underground limestone mine // Transactions of Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 2018. Vol. 344. No. 1. P. 31-37.
- Chen S., Walske M.L., Davies I.J. Rapid mapping and analysing rock mass discontinuities with 3D terrestrial laser scanning in the underground excavation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 110. P. 28-35.
- An in situ monitoring campaign of a hard rock pillar at great depth within a Canadian mine / B. Forbes, N. Vlachopoulos, M.S. Diederichs et al. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 12. Is. 3. P. 427-448.
- Левкин Ю.М. Маркшейдерское обеспечение подземных горных выработок подлежащих восстановлению // Маркшейдерский вестник. 2022. № 1. С. 30-32.
- Федунец Н.И., Левкина С.Ю. Создание модели мониторинга устойчивости горных выработок по средним напряжениям и деформациям // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 55. С. 150-155.
- Халкчев Р.К., Халкчев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // Горный журнал. 2016. № 3. С. 200-205.
- Халкчев Р.К., Халкчев К.В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измельчении геоматериалов на основе методов подобия и размерности в динамике трещин // Горный журнал. 2016. № 6. С. 64-66.
- Халкчев К.В. Системный подход к разработке математического обеспечения ГИС лавинного районирования по напряженно-деформированному состоянию снега на склонах горных терри-

- торий // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 1. С. 88-93.
10. Халкечев К.В. Нелинейная математическая модель динамической системы трещиноватости в минералах углевмещающих горных пород // Уголь. 2019. № 10. С. 92-94. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-92-94.
  11. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. С. 97-105.
  12. Кузин Е.А., Халкечев К.В. Математическая модель определения формы устойчивого целика поликристаллической структуры в углевмещающих породах // Уголь. 2020. № 2. С. 22-25. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-22-25.
  13. Кузин Е.А., Халкечев К.В. Определение управляющих пространственно-геометрических параметров устойчивых горных выработок // Уголь. 2020. № 9. С. 67-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-65-67.
  14. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М: Наука, 1974. 640 с.

TECHNICAL NEWS

Original Paper

UDC 622.001.5:658.012.122:51.001.57 © Yu.M. Levkin, 2022  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 6, pp. 32-34  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>

**Title**  
**THE USAGE OF REMOTE SENSING TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING FOR THE ANALYSIS OF EMERGENCY MINE WORKINGS**

**Author**

Levkin Yu.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Member of the Russian Union of Surveyors, Moscow, 105064, Russian Federation

**Authors Information**

**Levkin Yu.M.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
 e-mail: lev5353@bk.ru

**Abstract**

In the presented article, a method of analyzing emergency mine workings for their restoration is proposed. This method is based on the use of underground unmanned aerial vehicles equipped with innovative laser scanning or sensing technologies that allow remote monitoring of areas of rock displacements in the roof at emergency mining sites. The use of this remotely controlled surveying equipment allows you to determine the location and size of dangerous areas of displacement of rocks in the roof. Based on this, with the help of the proposed mathematical model, the values of the normal stress components in the studied displacement regions are established. As a result, if the values of the normal stress components in these displacement areas do not exceed the tensile strength of rocks, then the mining is subject to restoration.

**Keywords**

Underground mining excavations hazardous to human life, Disturbed rock mass, Cleavage crack, Stress intensity factor, Unmanned aerial vehicles, Remote sensing.

**References**

1. Evaneck N., Slaker B., Iannacchione A. & Miller T. LiDAR mapping of ground damage in a heading re-orientation case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, Vol. 31, (1), pp. 67-74.
2. Slaker B.A., Murphy M.M. & Miller T. Analysis of extensometer, photogrammetry and laser scanning monitoring techniques for measuring floor heave in an underground limestone mine. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc*, 2018, Vol. 344, (1), pp. 31-37.
3. Chen S., Walske M.L. & Davies I.J. Rapid mapping and analysing rock mass discontinuities with 3D terrestrial laser scanning in the underground excavation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, (110), pp. 28-35.
4. Forbes B., Vlachopoulos N., Diederichs M.S., Hyett A.J. & Punkkinen A. An in situ monitoring campaign of a hard rock pillar at great depth within a Canadian mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, Vol. 12, (3), pp. 427-448.
5. Levkin Y.M. Surveying support of underground mine workings subject to restoration. *Markshejderskij vestnik*, 2022, (1), pp. 30-32.

6. Fedunets N.I. & Levkina S.Yu. Creation of stability monitoring model for mine workings based on average stresses and strains. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2010, (55), pp. 150-155. (In Russ.).
7. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Mathematical modeling of non-uniform elastic stress field of a rock mass with crystalline block structure. *Gornyj zhurnal*, 2016, (3), pp. 200-205. (In Russ.).
8. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Management of fracture selectivity in crushing and milling of geomaterials based on similarity and dimensional methods in fracture dynamics. *Gornyj zhurnal*, 2016, (6), pp. 64-66. (In Russ.).
9. Khalkechev K.V. A system approach to development of mathematical support for GIS avalanche zoning based on the stress-and-strain state of snow on the slopes of mountainous areas. *Ustojchivoe razvitie gornyh territorij*, 2020, Vol. 12, (1), pp. 88-93. (In Russ.).
10. Khalkechev K.V. Nonlinear mathematical model of the fracturing dynamic system in minerals of coal-bearing rocks. *Ugol'*, 2019, (10), pp. 92-94. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-92-94.
11. Khalkechev R.K. Fuzzy mathematical model of fracture concentration changes in a mineral under external load. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2019, (6), pp. 97-105. (In Russ.).
12. Kuzin E.A. & Khalkechev K.V. Mathematical model for determining the shape of a stable pillar of a polycrystalline structure in carbon-bearing rocks. *Ugol'*, 2020, (2), pp. 22-25. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-22-25.
13. Kuzin E.A. & Khalkechev K.V. Determination of control spatial and geometric parameters of stable mine workings. *Ugol'*, 2020, (9), pp. 65-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-65-67.
14. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. Moscow, Nauka Publ., 1974, 640 p. (In Russ.).

**For citation**

Levkin Yu.M. The usage of remote sensing technology and mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.

**Paper info**

Received April 14, 2022

Reviewed April 28, 2022

Accepted May 23, 2022