

Автоматизированная система мониторинга состояния транспортных берм на предмет оползневой опасности в виде проседания

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-50-52>

ХАЛКЕЧЕВА Л.К.

Научный сотрудник
Академии фундаментальных наук,
355007, г. Ставрополь, Россия,
e-mail: kyzu@bk.ru

ХАЛКЕЧЕВ Р.К.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры
инфокоммуникационных технологий
НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: syrus@list.ru

В представленной статье описана автоматизированная система, позволяющая в режиме реального времени осуществлять мониторинг состояния транспортной бермы на предмет реализации оползня проседания. Прогноз оползневой опасности в предложенной системе осуществляется на основе разработанной математической модели, рассматривающей транспортную берму как трехмерную перколяционную решетку. Такая решетка состоит из элементов, соответствующих текстурным неоднородностям участка транспортной бермы. В рамках компьютерного моделирования она исследуется на предмет реализации кластеров, соответствующих магистральным трещинам, формирующим оползневое тело. При этом перколяция осуществляется по критерию разрушения, учитывающему одновременно элементарный объем, неоднородное поле напряжений, прочностные свойства текстурных неоднородностей, деформационные свойства горных пород, а также динамическую нагрузку от движения транспортного средства по берме угольного разреза.

Ключевые слова: берма, поле напряжений, угольный разрез, математическая модель, перколяционная решетка, оползень проседания, кластер, элементарный объем.

Для цитирования: Халкечева Л.К., Халкечев Р.К. Автоматизированная система мониторинга состояния транспортных берм на предмет оползневой опасности в виде проседания // Уголь. 2022. № 4. С. 50-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация транспортных берм на угольных разрезах часто сопровождается возникновением динамических явлений в виде оползней проседания (просадок), которые приводят к травматизму людей и наносят существенный технико-экономический ущерб горным предприятиям. На данный момент существует большое количество методов прогнозирования состояния транспортных берм на предмет реализации оползней, которые можно разделить на два класса. В основе первого из них лежит экспериментальный подход [1, 2, 3], основанный на исследовании процессов смещения оползневого тела. Однако в процессе такого смещения оползень достаточно часто принимает новое устойчивое положение, что в существующих методах никак не учитывается.

Методы второго класса основаны на применении компьютерных моделей напряженно-деформированного состояния породных массивов, использующих метод конечных элементов и его вариации [4, 5, 6]. Установлено, что степень адекватности таких моделей зависит от размера выбранных элементов – чем они меньше, тем выше точность полученных результатов прогноза схода оползня. В то же время, как указано в

работах [7, 8, 9, 10, 11, 12], при моделировании процессов разрушения необходимо учитывать существование элементарного объема, то есть объема, начиная с которого проявляются механические свойства объекта. Таким образом, для достижения адекватных результатов моделирования необходимо, чтобы объем каждого конечного элемента был выше или равен величине элементарного объема породы, слагающей оползнеопасный участок. Так как для горных пород величина такого объема достаточно велика (может достигать 5 м³), то используемые в настоящее время модели обладают малой степенью точности.

Таким образом, существующие экспериментальные методы и модели не могут быть основой для решения проблемы оперативного прогнозирования оползней проседания на транспортных бермах угольных разрезов.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ БЕРМ

Для решения поставленной проблемы была разработана автоматизированная система, позволяющая осуществлять анализ состояния транспортных берм на угольных разрезах. Функционирование данной системы осуществляется согласно следующему алгоритму, выполняемому в режиме реального времени.

1. На основе геологических и геофизических данных осуществляется построение трехмерной перколяционной решетки для исследуемого участка транспортной бермы, представляющей собой трехмерную фигуру, разделенную на совокупность элементов объемом V (величина которого соответствует максимальному элементарному объему неоднородности на текстурном уровне в составе горных пород). Каждому такому элементу, соответствующему определенной текстурной неоднородности (углю или минералу) в составе исследуемого участка, сопоставляются

определенное значение тензора модуля упругости \mathbf{C} и предел прочности σ_p на растяжение.

2. Посредством математической модели неоднородного поля напряжений в минералах, разработанной в рамках метода аналогий с работой [7], для каждого элемента осуществляется расчет тензора напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma^{(nm)} = & \mathbf{C}^{(mv)} \left(\mathbf{I} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}^{(gp)} \right)^{-1} \cdot \left[\mathbf{I} + \frac{1}{r} \int \mathbf{K}^{(gp)}(x-x') \cdot \mathbf{\Phi}^{(gp)}(x-x') dx' \right]^{-1} \times \\ & \times \left(\mathbf{I} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}^{(pm)} \right)^{-1} \cdot \left[\mathbf{I} + \frac{1}{n} \int \mathbf{K}^{(pm)}(x-x') \cdot \mathbf{\Phi}^{(pm)}(x-x') dx' \right]^{-1} \times \\ & \times \left(\mathbf{C}^{(efpm)} \right)^{-1} \sigma^{(0pm)} + \sigma^{(dn)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{C}^{(1gp)} = \mathbf{C}^{(mv)} - \left\langle \mathbf{C}^{(efgp)} \right\rangle$; $\mathbf{C}^{(1pm)} = \mathbf{C}^{(gp)} - \left\langle \mathbf{C}^{(efpm)} \right\rangle$; \mathbf{C} – тензор модулей упругости горной породы с включениями в виде трещин, заполненных жидкостью; $\mathbf{C}^{(efgp)}$, $\mathbf{C}^{(efpm)}$ – эффективные тензоры модулей упругости горно-породной и массивной сред; r и n – соответственно концентрации неоднородностей в горной породе и массиве; \mathbf{I} – единичный четырехвалентный тензор; $\mathbf{\Phi}^{(gp)}(x-x')$ и $\mathbf{\Phi}^{(pm)}(x-x')$ – части средне-

го по ансамблю полей неоднородностей, связанные с попаданием точек в разные неоднородности (соответствующие горной породе и массиву); $\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_i}^{(gp)} \mathbf{K}^{(gp)}(Ak) dS$ и

$$\mathbf{H}^{(pm)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_i}^{(pm)} \mathbf{K}^{(pm)}(Ak) dS,$$

соответствующие средним значениям единичной поверхности в Фурье-пространстве; $\sigma^{(0pm)}$ – естественное поле напряжений в нетронутом массиве; $\sigma^{(dn)} = \frac{P}{2S}$ – поле напряжений, индуцированное динамической нагрузкой от движения самосвала по транспортной берме; P и S – вес и площадь контактной поверхности груженого транспортного средства.

3. С учетом полученных значений осуществляется процедура компьютерного моделирования, заключающаяся в следующем. Для каждого элемента из решетки осуществляется проверка значений нормальных компонентов тензора σ на предмет равенства или превышения величины σ_p . В случае истинности данного условия элемент закрашивается черным цветом, в противном случае – белым.

В результате этого в перколяционной решетке будут образовываться кластеры – группы закрасенных квадратов, связанных между собой по одной из своих сторон и соответствующих трещинам в транспортной берме. Если в полученной решетке будут образовываться кластеры, то в транспортной берме будут реализовываться оползни проседания. При этом размеры оползневого тела будут зависеть от вида и размеров кластеров, получаемых в трехмерной решетке в результате моделирования.

Процедура компьютерного моделирования, заключающаяся в следующем. Для каждого элемента из решетки осуществляется проверка значений нормальных компонентов тензора σ на предмет равенства или превышения величины σ_p . В случае истинности данного условия элемент закрашивается черным цветом, в противном случае – белым.

В результате этого в перколяционной решетке будут образовываться кластеры – группы закрасенных квадратов, связанных между собой по одной из своих сторон и соответствующих трещинам в транспортной берме. Если в полученной решетке будут образовываться кластеры, то в транспортной берме будут реализовываться оползни проседания. При этом размеры оползневого тела будут зависеть от вида и размеров кластеров, получаемых в трехмерной решетке в результате моделирования.

В результате этого в перколяционной решетке будут образовываться кластеры – группы закрасенных квадратов, связанных между собой по одной из своих сторон и соответствующих трещинам в транспортной берме. Если в полученной решетке будут образовываться кластеры, то в транспортной берме будут реализовываться оползни проседания. При этом размеры оползневого тела будут зависеть от вида и размеров кластеров, получаемых в трехмерной решетке в результате моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что имея значения размеров наблюдаемого участка транспортной бермы и получая в режиме реального времени входные данные в виде деформационных свойств и пределов прочности на растяжение углей, минералов и горных пород из анализируемого участка, а также величин естественного и индуцированного динамической нагрузкой полей напряжений, разработанная автоматизированная система, в отличие от своих аналогов, способна с учетом элементарного объема исследуемых объектов осуществлять прогноз состояния транспортной бермы на предмет реализации оползней проседания.

Список литературы

1. Quantitative assessment for the rockfall hazard in a post-earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning / Li H.-b., Li X.-w., Li W.-z. et al. // Engineering Geology. 2019. Vol. 248. P. 1-13.
2. Zhou X.-P., Liu L.-J., Xu C. A modified inverse-velocity method for predicting the failure time of landslides // Engineering Geology. 2020. Vol. 268. 105521.
3. Integration of ground-based radar and satellite In SAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine / T. Carlà, P. Farina, E. Intrieri et al. // Engineering Geology. 2018. Vol. 235. P. 39-52.

4. A three-dimensional mesoscale model for progressive time-dependent deformation and fracturing of brittle rock with application to slope stability / Y. Yuan, T. Xu, M.J. Heap et al. // *Computers and Geotechnics*. 2021. Vol. 135. 104160.
5. Fleurisson J.-A. Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 46. P. 27-38.
6. Feng J.L., Tao Z.G., Li D.J. Evaluation of Slope Stability by the In Situ Monitoring Data Combined with the Finite-Discrete Element Method // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. P. 568-574.
7. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // *Горный журнал*. 2016. № 3. С. 200-205.
8. Халкечев Р.К., Халкечев 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.
9. Халкечев К.В. Системный подход к разработке математического обеспечения ГИС лавинного районирования по напряженно-деформированному состоянию снега на склонах горных территорий // *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. 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.
12. Кузин Е.А., Халкечев К.В. Определение управляющих пространственно-геометрических параметров устойчивых горных выработок // *Уголь*. 2020. № 9. С. 65-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-65-67.

AUTOMATED SYSTEMS

Original Paper

UDC 681.5 © L.K. Khalkecheva, R.K. Khalkechev, 2022

ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 4, pp. 50-52

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-50-52>

Title

AUTOMATED MONITORING SYSTEM OF TRANSPORT BERMS CONDITION FOR LANDSLIDE DANGER IN THE FORM OF SUBSIDENCE

Authors

Khalkecheva L.K.¹, Khalkechev R.K.²

¹ Academy of Fundamental Sciences, Stavropol, 355007, Russian Federation

² National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

Authors Information

Khalkecheva L.K., Research Associate, e-mail: kyzy@bk.ru

Khalkechev R.K., Doctor Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of "Infocommunication technologies" department, e-mail: syrus@list.ru

Abstract

The presented article describes an automated system that allows real-time monitoring of the transport berm condition for landslide forecasting in the form of subsidence. The forecast of the landslide hazard in the proposed automated system is carried out on the basis of the developed mathematical model that presents the transport berm as a three-dimensional percolation lattice. That sort of lattice consists of elements corresponding to the textural inhomogeneities of the transport berm section. Within the framework of computer modeling, it is investigated for the clusters detection that corresponds to the main cracks forming the landslide body. In this case, percolation is carried out according to the fracture criterion that simultaneously takes into account: the elementary volume, inhomogeneous stress field, strength properties of textural inhomogeneities, deformation properties of rocks, as well as the dynamic load from the movement of the transport vehicle along the berm of coal pit.

Keywords

Berm, Stress field, Coal pit, Mathematical model, Percolation lattice, Subsidence, Cluster, Elementary volume.

References

1. Li H.-b., Li X.-w., Li W.-z., Zhang S.-l. & Zhou J.-w. Quantitative assessment for the rockfall hazard in a post-earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning. *Engineering Geology*, 2019, (248), pp. 1-13.
2. Zhou X.-P., Liu L.-J. & Xu C. A modified inverse-velocity method for predicting the failure time of landslides. *Engineering Geology*, 2020, (268), 105521.
3. Carlà T., Farina P., Intrieri E., Ketizmen H. & Casagli N. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology*, 2018, (235), pp. 39-52.
4. Yuan Y., Xu T., Heap M.J., Meredith P.G., Yang T. & Zhou G. A three-dimensional mesoscale model for progressive time-dependent deformation and

fracturing of brittle rock with application to slope stability. *Computers and Geotechnics*, 2021, (135), 104160.

5. Fleurisson J.-A. Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach. *Procedia Engineering*, 2012, (46), pp. 27-38.

6. Feng J.L., Tao Z.G. & Li D.J. Evaluation of Slope Stability by the In Situ Monitoring Data Combined with the Finite-Discrete Element Method. *Procedia Engineering*, 2017, (191), pp. 568-574.

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. *Ustoichivoe razvitie gornyx territoriy*, 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. 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.

12. 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.

For citation

Khalkecheva L.K. & Khalkechev R.K. Automated monitoring system of transport berms condition for landslide danger in the form of subsidence. *Ugol'*, 2022, (4), pp. 50-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

Paper info

Received January 17, 2022

Reviewed January 31, 2022

Accepted March 22, 2022