

Математическое обеспечение автоматизированной системы определения внешнего растягивающего напряжения в потенциальном блочном оползневом теле скольжения

Mathematical support of the automated system for determining the external tensile stress in a potential block-sliding landslide body

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-3-108-110>

ДЖУРТУБАЕВА Ф.Х.

Заместитель директора
по производственной практике,
Карачаево-Черкесская республиканская
государственная бюджетная
профессиональная образовательная
организация «Политехнический колледж»,
369200, г. Карачаевск,
Карачаево-Черкесская Республика, Россия,
e-mail: fatimadzurtubaeva@gmail.com

Обеспечение устойчивости бортов угольных разрезов – одна из важнейших задач горного дела. Среди существующих динамических явлений на угольных разрезах, нарушающих устойчивость бортов карьеров, особое место занимают оползни блочного скольжения. На данный момент существует большое количество моделей в области прогнозирования оползней такого вида. Однако данные модели не в состоянии определить величины растягивающих напряжений, действие которых привело к формированию магистральных трещин в потенциальных блочных оползневых телах. Именно критические значения растягивающих напряжений являются основой прогнозирования блочных оползней. В результате проведенного исследования предложена математическая модель, позволяющая решить данную задачу. Полученная модель является основой математического обеспечения автоматизированной системы определения внешнего растягивающего напряжения в потенциальном блочном оползневом теле скольжения.

Ключевые слова: оползень, магистральная трещина, прогнозирование оползней, угольный разрез, деформационные свойства, растягивающие напряжения, математическая модель, автоматизированная система.

Для цитирования: Джуртубаева Ф.Х. Математическое обеспечение автоматизированной системы определения внешнего растягивающего напряжения в потенциальном блочном оползневом теле скольжения // Уголь. 2026;(3):108-110. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-3-108-110.

Abstract

Ensuring the stability of the slopes of coal open-pit mines is one of the most important tasks in mining engineering. Among the existing dynamic phenomena at coal open pits that disrupt slope stability, block-sliding landslides occupy a special place. Currently, there are a large number of models in the field of predicting landslides of this type. However, these models are unable to determine the magnitudes of tensile stresses, the action of which leads to the formation of main (master) cracks in potential block landslide bodies. It is precisely the critical values of tensile stresses that

form the basis for predicting block landslides. As a result of the conducted research, a mathematical model has been proposed that allows solving this problem. The obtained model serves as the foundation for the mathematical support of an automated system for determining the external tensile stress in a potential block-sliding landslide body.

Keywords

Landslide, main crack, landslide prediction, coal mine, deformation properties, tensile stresses, mathematical model, automated system.

For citation

Dzhurtubaeva F.Kh. Mathematical support of the automated system for determining the external tensile stress in a potential block-sliding landslide body. *Ugol'*. 2026;(3):108-110. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-3-108-110.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение устойчивости бортов угольных разрезов является необходимым условием безопасной и эффективной добычи полезных ископаемых [1, 2, 3]. Ежегодно оползни наносят существенный экономический ущерб угольным предприятиям и приводят к большому количеству жертв. Так, например, недавний массивный оползень на угольном разрезе «Алашань Синьцзин» (Китай) привел к гибели 53 человек, ранениям шести человек и экономическому ущербу в 30,2 млн. дол. США [4, 5].

Среди существующих опасных динамических явлений на угольных разрезах особое место занимают оползни блочного скольжения, характеризующиеся смещением крупных, относительно монолитных блоков горных пород или грунта вдоль плоской или слабонаклонной поверхностей скольжения без значительного вращения или дробления обломочного материала [6].

Практика показывает, что возникновение оползней блочного типа на угольных разрезах происходит внезапно, под влиянием интенсивных осадков и ведения горных работ, что требует разработки автоматизированных систем прогнозирования подобного рода явлений. Однако разработка подобного рода систем невозможна без соответствующего математического обеспечения, основной частью которого должны являться математические модели, определяющие напряженно-деформированное состояние (НДС) массива горных пород в окрестностях существующих магистральных трещин в потенциальных оползневых телах. Магистральные трещины возникают в результате концентрации растягивающих и сдвиговых напряжений, приводящих к смещению блоков горных пород. Анализ НДС позволяет выявить зоны концентрации напряжений, оценить запас устойчивости склона, моделировать сценарии активации оползня и обосновать параметры стабилизирующих мероприятий, таких как дренаж, подпорные конструкции или анкерное укрепление.

На данный момент существует большое количество математических моделей в области определения НДС с целью прогнозирования оползней [7, 8, 9 и др.]. Однако данные модели не в состоянии определить величины растягивающих напряжений, действие которых привело к формированию магистральных трещин заданного размера в потенциальных блочных оползневых телах. Именно критические значения

растягивающих напряжений являются основой прогнозирования оползней рассматриваемого типа. Вследствие этого, существующие автоматизированные системы (основанные на данных моделях) не в состоянии решить проблему оперативного прогнозирования блочных оползней.

В связи с изложенным разработка новой математической модели как основы математического обеспечения автоматизированной системы определения внешнего растягивающего напряжения в потенциальном блочном оползневом теле является актуальной научной задачей.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Произведем содержательную постановку задачи. Рассмотрим потенциальное оползневое тело блочного скольжения в стадии зарождения. Не теряя общности, будем считать, что рассматриваемое тело состоит из неоднородных упругих горными породами. Так как длина и ширина потенциального оползневое тела значительно превышают его глубину, то рассматриваемую задачу определения растягивающего напряжения можно свести к двумерной. За процесс формирования блочного оползня отвечают магистральные трещины. При этом на начальной стадии формирования потенциального оползневое тела магистральные трещины достаточно удалены друг от друга, вследствие чего их взаимным влиянием можно пренебречь. Требуется для каждой магистральной трещины в потенциальном блочном оползневом теле определить величину внешнего растягивающего напряжения, приведшего к формированию этой трещины.

В результате содержательной постановки задачи получим двумерную неограниченную неоднородную изотропную упругую сплошную среду с трещиноподобным надрезом. В соответствии с классическим подходом к описанию плоского напряженного состояния рассматриваемая среда будет описываться следующими системами уравнений, записанными в полярной системе координат:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_{эф}} (\sigma_r - \nu_{эф} \sigma_\theta), \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E_{эф}} (\sigma_\theta - \nu_{эф} \sigma_r), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{2G_{эф}}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \gamma_{r\theta}}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \gamma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0, \quad \text{при } \theta = \pm \alpha, \quad (4)$$

где r – полярный радиус; θ – полярный угол; α – определяет границы двухгранного угла, устанавливающего размеры трещиноподобного надреза; $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ – компоненты тензора напряжений в полярной системе координат; $E_{эф}$ – эффективный модуль упругости; $\nu_{эф}$ – эффективный коэффициент Пуассона; $G_{эф}$ – эффективный модуль сдвига.

Используя в рамках метода аналогии работ [10, 11, 12] для решения системы уравнений (1-3) при граничных условиях (4), получим следующее выражение для определения внешнего растягивающего напряжения σ , действие кото-

рого привело к формированию магистральной трещины заданного размера в потенциальном оползневом теле блочного скольжения:

$$\sigma = \frac{u_r 4G_{\text{эф}} \sqrt{2\pi}}{\sqrt{\pi a} \left(\frac{5-3\nu_{\text{эф}}}{1+\nu_{\text{эф}}} \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right)}, \quad (5)$$

где a – полудлина трещины; u_r – смещение вдоль направления изменения вектора r относительно вершины магистральной трещины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложена математическая модель, использование которой позволяет определить величины растягивающих напряжений, действие которых привело к формированию магистральных трещин заданного размера в потенциальных блочных оползневых телах.

Полученная модель может служить основой для математического обеспечения автоматизированной системы определения внешнего растягивающего напряжения в потенциальном блочном оползневом теле скольжения. Применение такой системы на угольных разрезах является первым шагом в решении задачи прогнозирования оползней блочного скольжения.

Список литературы • References

- Eker R., Aydin A., Görüm T. Tracking deformation velocity via PSI and SBAS as a sign of landslide failure: an open-pit mine-induced landslide in Himmetoglu (Bolu, NW Turkey). *Natural Hazards*. 2024;(120):7701-7724. DOI: 10.1007/s11069-024-06533-0.
- Jia L., Wang J., Gao S., Fang L., Wang D. Landslide risk evaluation method of open-pit mine based on numerical simulation of large deformation of landslide. *Scientific Reports*. 2023;(13):15410. DOI: 10.1038/s41598-023-42736-4.
- Pipatpongsa T., Fang K., Leelasukseree C., Chaiwan A. Stability analysis of laterally confined slope lying on inclined bedding plane. *Landslides*. 2022;(19):1861-1879. DOI: 10.1007/s10346-022-01873-z.
- Cui F., Xiong C., Wu Q., Zhou Y., Hou C., Fan L., Liu M., Xu H., Pan X. Dynamic mechanism triggering the catastrophic Xinjing Landslide in Alxa, Inner Mongolia, China. *Engineering Geology*. 2025;(346):107911. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.107911.
- Wang Q., Xing A., Xu X., Zhou Y., Yang Q., Song H., Peng J., Zhai L., Bilal M., Liu Y. Formation mechanism and dynamic process of open-pit coal mine landslides: a case study of the Xinjing landslide in Inner Mongolia, China. *Landslides*. 2024;(21):541-556. DOI: 10.1007/s10346-023-02193-6.
- Zhang F., Peng J., Zhao Y., Chen K., He Q. A homogenized sliding-block model for landslide motion analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025;17(12):7832-7847. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.02.019.
- Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // Горный журнал. 2016. № 3. С. 200-205. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05. 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):200-205. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.
- Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Применение теории катастроф для математического моделирования оползневого процесса на вогнутых склонах горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 3. С. 720-726. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-720-726. Khalkechev R.K., Khalkechev K.V. Application of catastrophe theory for mathematical modeling of landslide process on concave slopes of mountain territories. *Ustojchivoe razvitie gornyx territorij*. 2023;15(3):720-726. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-720-726.
- Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Разработка математической модели поверхностного трансляционного оползня с дерном на прямых склонах горных территорий при выпадении атмосферных осадков // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 1. С. 174-180. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-174-180. Khalkechev R.K., Khalkechev K.V. Mathematical model development of a surface translational landslide with a sod on straight slopes of mountain territories during atmospheric precipitation. *Ustojchivoe razvitie gornyx territorij*. 2024;16(1):174-180. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-174-180.
- Халкечев К.В., Халкечев Р.К., Левкин Ю.М. Математическая модель поля напряжений в целиках с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях // Уголь. 2023;(7):56-58. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58. Khalkechev K.V., Khalkechev R.K., Levkin Yu.M. Mathematical model of the stress field in the pillars with due account taken of the main crack in coal fields. *Ugol'*. 2023;(7):56-58. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58.
- Халкечев К.В., Левкин Ю.М., Абрамкин Н.И. Разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле горной выработки // Уголь. 2024;(7):52-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54. Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Abramkin N.I. Development of a mathematical model of the stress field in the vicinity of a longitudinal shear main crack in the mine roof. *Ugol'*. 2024;(7):52-54. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.
- Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях // Уголь. 2023;(8):84-96. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86. Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V. Mathematical model development of the stress field in the pillars stratified texture in coal deposits. *Ugol'*. 2023;(8):84-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.

Authors Information

Dzhurtubaeva F.Kh. – Deputy Director for Internship, Karachay-Cherkess Republican State Budgetary Professional Educational Institution "Polytechnic college", Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 369200, Russian Federation, e-mail: fatimadzurtubaeva@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.02.2026

Поступила после рецензирования: 17.02.2026

Принята к публикации: 27.02.2026

Paper info

Received February 3, 2026

Reviewed February 17, 2026

Accepted February 27, 2026