

## К ВОПРОСУ МОНИТОРИНГА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ СДВИЖЕНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Р.В. Ключев<sup>1</sup>, В.С. Бригида<sup>2</sup>, К.Ю. Лобков<sup>3</sup>, А.А. Ступина<sup>3,4,5</sup>, В.В. Тынченко<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», Сочи, Россия, e-mail: 1z011@inbox.ru

<sup>3</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>5</sup> Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

**Аннотация:** Рассмотрено совершенствование методов оценки деформационных процессов в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности. Затронуты вопросы разработки методики оценки пространственно-временных изменений трещинообразования в природно-технических системах. Методика исследований состояла в комплексном подходе, включающем: анализ литературных источников; обработку натурных данных по ширине раскрытия трещин на поверхности склоновой системы с использованием фотограмметрического метода; использование методов сглаживания LOESS, трехмерной интерполяции b-spline и построения поверхностей отклика в ПО Gnuplot, а также прочие расчеты в MS «Excel». Приведены результаты исследований деформационных процессов природно-технических систем. При этом установлено, что ширина стенок трещины нелинейно увеличивается в зависимости от протяженности трещины в сторону более высоких значений номеров пикетов, при этом величина абсолютных сдвижений (в 2023 г.) для локальных максимумов находится в диапазоне 4–16 мм, а для локального минимума – 50–52 мм. Кроме того, в результате проведенного мониторинга установлено, что минимальные значения среднегодовой скорости смещений отдельных участков стенок исследуемых трещин составляют 7,5% в год, а максимальные – 21,8% в год.

**Ключевые слова:** смещение земной поверхности, геологический мониторинг, трещинообразование, природно-технические системы, пространственные модели.

**Для цитирования:** Ключев Р. В., Бригида В. С., Лобков К. Ю., Ступина А. А., Тынченко В. В. К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 292–304. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.

### On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements

R.V. Klyuev<sup>1</sup>, V.S. Brigida<sup>2</sup>, K.Y. Lobkov<sup>3</sup>, A.A. Stupina<sup>3,4,5</sup>, V.V. Tynchenko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,

<sup>2</sup> Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre  
of Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia, e-mail: 1z011@inbox.ru

<sup>3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>5</sup> Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service  
of Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russia

---

**Abstract:** The article is devoted to improving methods for assessing deformation processes in natural-technical systems during displacement of the earth's surface. The authors address the issues of developing a methodology for assessing spatiotemporal changes in cracking in natural and technical systems. The research methodology consisted of an integrated approach, including: analysis of literary sources; processing of field data on the width of cracks on the surface of the slope system using the photogrammetric method; use of LOESS smoothing methods, three-dimensional b-spline interpolation and construction of response surfaces in Gnuplot software, as well as other calculations in MS Excel. The paper presents the results of studies of deformation processes in natural-technical systems. It was found that the width of the crack walls increases nonlinearly depending on the length of the crack towards higher values of picket numbers, while the magnitude of absolute displacements (in 2023) for local maxima is in the range of 4–16 mm, and for a local minimum – 50–52 mm. In addition, as a result of the monitoring, it was established that the minimum values of the average annual displacement rate of individual sections of the walls of the cracks under study are 7.5% per year, and the maximum values are 21.8% per year.

**Key words:** displacement of the earth's surface, geological monitoring, fracturing, natural-technical systems, spatial models

**For citation:** Klyuev R. V., Brigida V. S., Lobkov K. Y., Stupina A. A., Tynchenko V. V. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):292-304. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.

---

## Введение

В настоящее время пространственное планирование играет лишь незначительную роль в управлении рисками при проектировании и эксплуатации выемочных участков на действующих горных предприятиях [1–4]. Необходимость учета и разработки мер по компенсации технологических и экологических рисков при обеспечении устойчивого развития геотехнологий не поддается сомнению в мировой практике [5–8]. Наивысший уровень риска развития деформаций можно эффективно определять на основе матрицы рисков «частота – тяжесть последствий» [9]. В то же время существующие методики оценки рисков внезапных проявлений развития опасных геологических процессов далеки от совершенства [10–12]. Неожиданные аномальные изменения и, как следствие,

катастрофические деформационные процессы в природно-технических системах могут привести к нарушению работы объектов добычи полезных ископаемых, представляя существенную угрозу для жизни и здоровья горнорабочих [13–15].

Глубина ведения открытых горных выработок крупнейших предприятий Российской Федерации достигает 400 м (Бачатский разрез – 360 м) [16]. В том же исследовании утверждается, что высота отвальных масс вскрышных пород на угольных шахтах превышает 100 м, при этом есть проекты отвалов высотой 300 м и более. Одним из ключевых факторов, определяющих развитие катастрофических деформационных процессов, является геодинамическая активность массива, которая приводит к трансформации распределения поля напряжений в пространстве освоения геосреды [17,

18]. Такие геологические опасности также могут быть результатом продолжающихся природных процессов (выветривание, суффозия, залповые ливни, кислотный дренаж в искусственных сооружениях из хвостов обогащения [19, 20] или эрозия почв [21, 22]). Важным аспектом исследования геологических опасностей является определение временного и пространственного распределения областей, подверженных движению, включая расположение потенциальных поверхностей скольжения [23, 24].

Если природно-техногенные системы расположены в районах активных экзогенных процессов, могут повышаться риски проявления аварийных ситуаций обусловленных сдвижением слоев земной поверхности [25]. Экзогенные геологические процессы могут представлять существенную угрозу территориям, которые были частично или полностью использованы в технологическом процессе горно-обогатительных комбинатов [26, 27]. Исходя из результатов исследования Качарского карьера [28], где произошли быстротекающие движения борта карьера, можно утверждать, что оценка возникновения внезапных деформационных явлений остается довольно сложной задачей, даже при проведении автоматического мониторинга деформаций горного массива. Например, на карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» мониторинг устойчивости уступов и бортов карьера осуществляются георадарами IBIS ArcSAR и IBIS FM, которые фиксируют медленные смещения массива (3 – 5 мм/год), что существенно сужает эффективность их применения [29]. Существенную сложность составляет то, что в определенных горно-геологических условиях деформационные процессы протекают локально, не оставляя заметных следов на земной поверхности [30]. При этом могут быть реализованы так называемые «мульти-

опасные явления», обусловленные совокупным действием нескольких факторов, таких как: количество выпадающих осадков, литология, геоморфология, гидрогеология, абсолютные отметки рельефа, угол склона, экспозиция и др. [31 – 33].

В связи с этим цель работы – совершенствование методики оценки пространственно-временных изменений трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности.

### **Материалы и методы**

Объектом исследования послужила склоновая система с развитой системой трещин, которая имитировала плоскость уступа карьера при открытой разработке полезных ископаемых (43°34'20" N 39°43'43" E). На первом этапе исследований (сентябрь, 2022 г.) была выбрана трещина, наиболее близко прилегающая к краю уступа. Вдоль всей ее протяженности с шагом 1 м были сформированы пикеты (методом засечек), расположенные на расстоянии 11 – 23 м от выбранной начальной точки отсчета (пикеты № 11 – 23 соответственно). После чего фиксировали ширину раскрытия трещин фотограмметрическим методом (фотоаппаратом Nikon D3100). Далее фотографии «депикселизовали» в файлы PNG ASCII и обрабатывали авторским методом [34, 35], получая систему векторизованных слоев оттенков серого цвета. После сглаживания шумов данных и подбора регрессионных моделей методом наименьших квадратов выбиралась модель с наименьшим разбросом данных при анализе остатков на Q-Q диаграмме (по аналогии с работами [36 – 38]). Между каждой парой пикетов на равном расстоянии выбиралось 10 участков (сегментов), и в каждом из них определялось расстояние между двумя точками, расположенными на двух

противоположных изогипсах (краях трещины в виде кривых определенного оттока серого). Полученные данные сдвижений занесли в таблицу. На втором этапе — через полтора года — вышеприведенная процедура была повторена (июнь, 2023 г.). Задача геоэкологического мониторинга решалась путем построение пространственного профиля сдвижений ( $U$ , мм) для времени  $t_1$  и  $t_2$  (09.2022 и 06.2023 соответственно) в зависимости от значения пикета ( $N$ ) и номера участка внутри каждого расстояния между пикетами ( $n$ ). Итоговые поверхности отклика формировали при помощи сплайновой интерполяции в ПО Gnuplot. Двумерные графики получены с использованием MS Excel.

### Результаты и обсуждения

Полученные результаты, полученные в сентябре 2023 г., представлены в таблице.

Попытка представления результатов в двумерной постановке для выявления общих закономерностей исследуемого

процесса представлена на рис. 1. Из анализа динамики кривых сдвижений для одинаковых номеров участков у каждого номера пикета следует, что можно выделить явно выраженные общие локальные минимумы для пикетов 14 и 22. На отрезке от 19 до 20 номера реперов локальный минимум для всех номеров участков выделяется не столь очевидно.

Кроме того, явно выражены три локальных максимума для номеров пикетов 11, 12, 16 и 23 соответственно. Для оценки динамики развития деформационных процессов более представительно рассматривать проекцию поверхности отклика (трехмерная постановка) на плоскость  $U$ - $n$ . В связи с этим, согласно методике исследований, на основании данных таблицы был сформирован вид поверхности, приведенный на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что установленные границы первого явно выраженного общего локального минимума (с 13-го по 14-ый пикеты) составляют  $U =$  от 8 до 15 мм. Второго локального минимума (с 18-го по 19-ый пикеты) —

### Измеренные перемещения реперных точек вдоль трещины ( $U$ ), мм Measured displacements of reference points along the crack ( $U$ ), mm

№ пикета, $N$	Участки разбиения пикетов, $n$									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
23	19	20	33	33	24	28	25	24	18	20
22	19	23	25	14	11	21	21	6	0	24
21	27	26	22	19	14	10	13	12	25	19
20	15	18	26	39	17	11	21	16	28	13
19	23	24	12	15	14	5	27	25	11	15
18	15	26	14	19	14	11	14	16	16	27
17	17	20	52	32	33	18	41	23	25	21
16	36	42	51	52	23	25	44	19	13	19
15	28	46	19	23	29	41	22	18	22	22
14	13	21	10	9	0	0	0	11	19	14
13	13	30	25	24	32	22	24	37	27	24
12	44	32	33	34	33	24	32	21	25	31
11	44	34	34	29	28	25	33	22	26	28

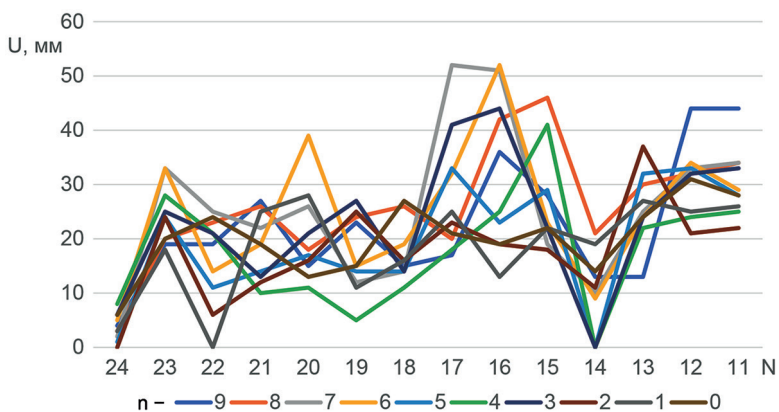


Рис. 1. Изменение величины абсолютных сдвижений ( $U$ ) сегментов трещины ( $n$ ) между каждым пикетом ( $N$ )

Fig. 1. Change in the magnitude of absolute displacements ( $U$ ) of crack segments ( $n$ ) between each picket ( $N$ )

$U =$  от 4 до 16 мм. Границы третьего минимума сосредоточены неравномерно по участкам на 22-ом пикете. Что касается обобщенного локального максимума, то он явно прослеживается в диапазоне от 15-го до 17-го пикетов, причем величина абсолютных сдвижений реперных точек существенно превышает искусственно введенные границы  $U = 40$  мм (принятые для удобства сравнения площадей поверхности отклика, построенных для разных дат замера). Величина максимальных сдвижений в районе пи-

ка исследуемого локального максимума — 50–52 мм.

На следующем этапе обрабатывались данные за 2022 г. Таким же образом натурные данные сперва сглаживались методом LOESS, после чего сглаженные данные дополнялись и вводились, в виде текстового формата файла, в ПО Gniplot. Результирующие поверхности отклика сдвижений реперных точек в зависимости от номера пикета и значения участка проецировались на вышеуказанные оси (рис. 3).

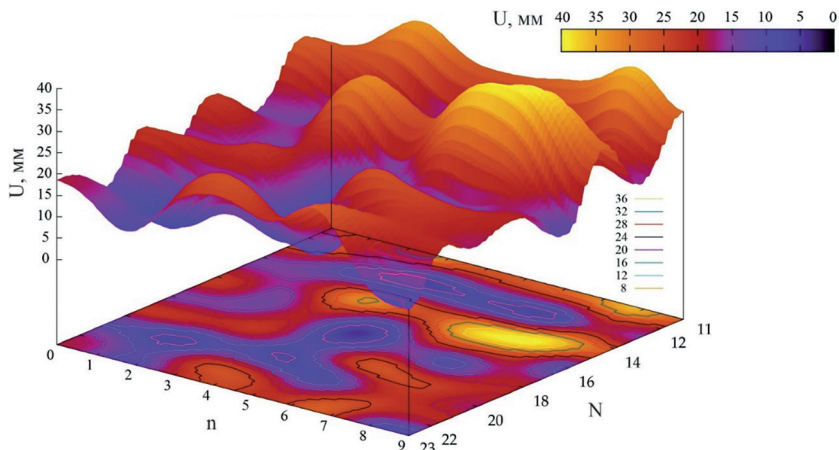


Рис. 2. Пространственное распределение величины абсолютных сдвижений вдоль протяженности трещины (на июнь 2023 г)

Fig. 2. Spatial distribution of magnitude of absolute displacements along the length of crack (as of June 2023)



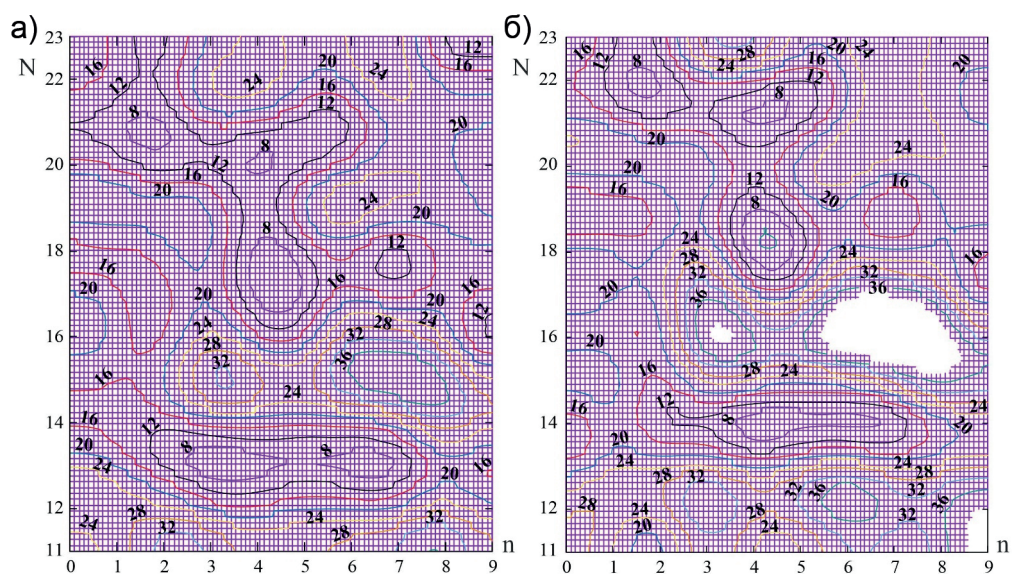


Рис. 3. Профиль абсолютных сдвижений, замеренных в реперных точках каждого участка трещины: для времени замеров  $t_1$  (09.2022) (а); для времени замеров  $t_2$  (06.2023) (б)

Fig. 3. Profile of absolute displacements measured at reference points of each crack section: for measurement time  $t_1$  (09.2022) (a); for measurement time  $t_2$  (06.2023) (b)

Из анализа рис. 3, а следует, что в начале проведения мониторинга (в 2022 г.) установленный первый явно выраженный общий локальный минимум находился в районе 13-го пикета ( $U =$  от 8 до 12 мм). Второй локальный минимум — с 17 по 18 пикет ( $U =$  от 8 до 16 мм) и третий минимум был сосредоточен на 21-м пикете ( $U$  минимально составляло 8 мм). Обобщенный локальный максимум явно прослеживался в диапазоне от 15-го до 16-го пикетов, причем величина абсолютных сдвижений смещения реперных точек варьировалась от 32 до 36 мм. Величина максимальных сдвижений в районе пика исследуемого локального максимума не превышала 36 мм.

По сравнению с 2022 г. очевидно наличие сдвижений локальных максимумов и минимумов в стороны больших значений номеров реперных точек, кроме того, максимум сдвижений на 16-м пикете за исследуемый год вырос с 36 мм до более чем 50 мм. На заключительном этапе исследований определялась ско-

рость относительных смещений за исследуемый период — с 06.2022 по 06.2023 (1 год) — по стандартной формуле:

$$\varepsilon = \frac{U_{t_2} - U_{t_1}}{U_{t_1}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительные смещения реперных точек за год (скорость смещений, % в год);  $U_{t_1}$ ,  $U_{t_2}$  — значения абсолютных сдвижений реперных точек на каждом участке трещины, мм.

После получения таблицы данных о распределении величины скорости смещений реперных точек на каждом участке трещины для каждого пикета была найдена среднеарифметическая величина скорости смещений (рис. 4).

Из анализа рис. 4 следует, что минимальные значения среднегодовой скорости смещений составляют от 5 до 9% в год и прослеживаются для пикетов № 11, 14, 19, 20 и 21. В целом обобщенное среднее для данной совокупности  $\varepsilon_{\text{ср.}}$  составляет 7,5% в год. Максимальные значения среднегодовой скорости сме-

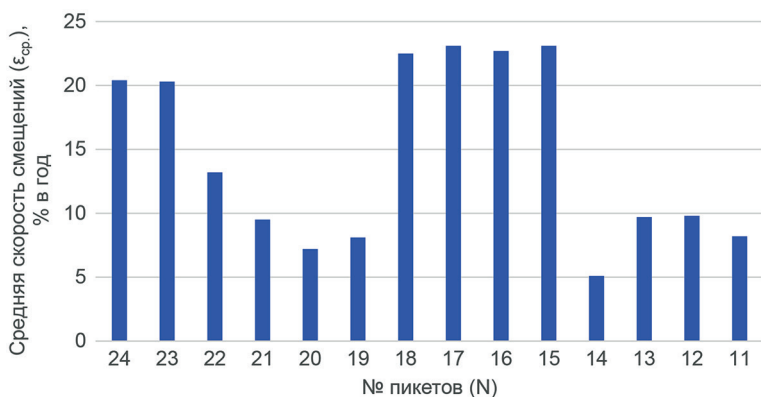


Рис. 4. Изменение значений среднегодовой скорости смещений в зависимости от протяженности трещины (на 06.2023)

Fig. 4. Change in the values of average annual displacement rate depending on the length of crack (as of 06.2023)

щений составляют от 20 до 23% в год и прослеживаются для пикетов № 15, 16, 17, 18, 23 и 24. В целом, обобщенное среднее (максимальное значение) для данной совокупности  $\varepsilon_{ср.}$  составляет 21,8% в год.

### Заключение

Для обеспечения безопасного недропользования, особенно при открытом способе разработки запасов полезных ископаемых, возникает необходимость непрерывного мониторинга за состоянием природно-технических систем. Развитие трещинообразования и опасных геологических явлений в склоновых системах (уступы карьеров) возможно оперативно предотвратить при использовании фотограмметрического метода мониторинга земной поверхности.

В работе приведены результаты исследований особенности протекания деформационных процессов, заключающиеся в следующем.

1. Установлено, что ширина стенок трещины нелинейно увеличивается в зависимости от номера реперных точек и величины промежуточных участков в сторону более высоких значений номеров пикетов, при этом величина абсолютных сдвижений (в 2023 г.) для локальных максимумов находится в диапазоне 4–16 мм, а локального минимума — 50–52 мм.

2. В результате проведенного мониторинга установлено, что минимальное значение среднегодовой скорости смещений отдельных участков стенок исследуемой трещины составляет 7,5% в год, а максимальное — 21,8% в год.

3. Результаты исследования могут быть использованы при разработке методики мониторинга трещиноватых систем на поверхности земли, техногенной нарушенности зоны неупругих деформаций (в горных выработках), а также при исследовании массива на эквивалентных материалах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. Региональный критерий отнесения горнопромышленных регионов к территориям с наибольшей подверженностью геоэкологическим изменениям // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 27–34. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

2. *Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V.* Circular mining wastes management for sustainable production of *camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

3. *Захаров В. Н., Каплунов Д. Р., Клебанов Д. А., Радченко Д. Н.* Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами // *Горный журнал*. — 2022. — № 12. — С. 55–61. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10.

4. *Баловцев С. В.* Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах // *Горные науки и технологии*. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 310–319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18.

5. *Джигоева А. К.* Перспективы экологизации горного производства для снижения вредных выбросов в атмосферу // *Уголь*. — 2022. — № 10. — С. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.

6. *Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Коликов К. С.* Управление аэрологическими рисками в подготовительных выработках угольных шахт // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 107–116. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-107-116.

7. *Shutaleva A.* Ecological culture and critical thinking: Building of a sustainable future // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 18, article 13492. DOI: 10.3390/su151813492.

8. *Zhanbayev R. A., Irfan M., Shutaleva A. V., Maksimov D. G., Abdykadyrkyzy R., Filiz Ş.* Demoethical model of sustainable development of society: A Roadmap towards digital transformation // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 16, article 12478. DOI: 10.3390/su151612478.

9. *Ананенко Е. В., Бахаева С. П.* Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал – основание» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 9. — С. 5–21. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_5.

10. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

11. *Bazaluk O., Anisimov O., Saik P., Lozynskiy V., Akimov O., Hrytsenko L.* Determining the safe distance for mining equipment operation when forming an internal dump in a deep open pit // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 7, article 5912. DOI: 10.3390/su15075912.

12. *Abdullah G. M. S., Abd El Aal A., Al Saiari M., Radwan A. E.* Sustainable impact of coarse aggregate crushing waste (CACW) in decreasing carbon footprint and enhancing geotechnical properties of silty sand soil // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 19, article 10930. DOI: 10.3390/app131910930.

13. *Копылов А. С., Джигоева А. К., Кондратьев Ю. И.* Комплексный подход к освоению сырьевой базы горнодобывающего региона с применением ресурсовоспроизводящих технологий // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 228–239. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-228-239.

14. *Li S., Wang Z.* Study on the coupling effect of stress field and gas field in surrounding rock of stope and gas migration law // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 18, article 6672. DOI: 10.3390/en16186672.

15. *Golik V. I., Mitsik M. F., Aleksakhina Y. V., Alenina E. E., Ruban-Lazareva N. V., Kruzhkova G. V., Kondratyeva O. A., Trushina E. V., Skryabin O. O., Khayrutdinov M. M.* Comprehensive recovery of metals in tailings utilization with mechanochemical activation // *Resources*. 2023, vol. 12, no. 10, article 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

16. *Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Поспехов Г. Б., Васильева А. Д.* Инженерно-геологические особенности формирования техногенных массивов из различных видов фосфогипса // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11.



17. Конюхов Д. С. Прогноз технологических деформаций при строительстве зданий и сооружений на подрабатываемых территориях // Уголь. — 2023. — № 4. — С. 61–64. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-61-64.

18. Захаров В. Н., Ефремовцев Н. Н., Федотенко В. С. Исследования техногенного воздействия взрывного разрушения горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом // Горная промышленность. — 2022. — № 6. — С. 61–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-61-68.

19. Bourtsalas A. Statewide analysis of U.S. metal waste and industrial residues trade dynamics from 2002 to 2022, 30 October 2023, Preprint (Version 1), available at Research Square. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3443899/v1.

20. Xiang Y., Lan J., Cai Y., Wang Y., Dong Y., Hou H. Preparation of nickel–cobalt tailings-based cementing materials by mechano-chemical activation: Performance and mechanism. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2640932/v1.

21. Голик В. И., Бурдзиева О. Г. Геофизический мониторинг технологии разработки месторождений Садона // Геология и геофизика Юга России. — 2023. — № 13(3). — С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

22. Гарифулина И. Ю., Абдулхалимов А. Г., Засеев И. А., Майстров Ю. А. Перспективы разработки Садонских месторождений подземным выщелачиванием // Горные науки и технологии. — 2020. — Т. 5. — № 4. — С. 358–366. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-358-366.

23. Melkov D., Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A. Temporal and spatial geophysical data analysis in the issues of natural hazards and risk assessment (in example of North Ossetia, Russia) // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 6, article 2790. DOI: 10.3390/app12062790.

24. Ananenko E., Bakhaeva S. The reason analysis of the overburden rock dumps deformation // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 315, article 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202131501001.

25. Gantimurov A., Kravtsov K., Tynchenko V., Evsyukov D., Nelyub V. Investigation of the influence of geographical factors on soil suitability using a nonparametric controlled method of training and data analysis // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 431, article 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/202343103005.

26. Маковозова З. Э., Аксенова М. А., Кесвани Четан, Умиров Б. З. Вопросы оценки влияния опасных экзогенных процессов на устойчивость природно-техногенных систем на примере Фиагдонского хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 7. — С. 76–87. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_0\_76.

27. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

28. Усанов С. В., Коновалова Ю. П., Ефремов Е. Ю., Харисова О. Д., Усанова А. В. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения // Горная промышленность. — 2022. — № 15. — С. 111–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-15-111-118.

29. Розанов И. Ю., Рыбин В. В., Константинов К. Н. Реализация многоуровневого комплексного мониторинга устойчивости бортов карьеров // Горная промышленность. — 2023. — № S1. — С. 135–141. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-135-141.

30. Харисова О. Д., Харисов Т. Ф. Прогноз обрушений земной поверхности по данным инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород при подземной разработке месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 264–274. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-264-274.

31. Строкова Л. А., Надеждина Ю. Ю. Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность склоновых процессов территории проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино // Известия Томского политехнического университета.

Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 11. — С. 170–181. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3255.

32. Kang K., Huang S., Liu W., Cheng H., Fomenko I., Zhou Y. Sandstone slope stability analysis under wetting-drying cycles based on generalized hoek-brown failure criterion // *Frontiers of Earth Science*. 2022, vol. 10, article 838862. DOI: 10.3389/feart.2022.838862.


33. 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.

34. Яицкая Н. А., Бригида В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных // *Геология и геофизика Юга России*. — 2022. — Т. 12. — № 1. — С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

35. Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Y. I. Efficiency gains when using acti-vated mill tailings in underground mining // *Metallurgist*. 2023, vol. 67, pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

36. Kozlova A., Kukartsev V., Melnikov V., Kovalev G., Stashkevich A. Finding dependencies in the corporate environment using data mining // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 431, article 05032. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105032.

37. Яицкая Н. А., Дзагания Л. М., Бригида В. С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа // *Геология и геофизика Юга России*. — 2023. — № 13(2). — С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

38. Wang D., Li R., Cheng J., Zheng W., Shen Y., Zhao S., Wu M. Research on the calculation model and control method of initial supporting force for temporary support in the underground excavation roadway of coal mine // *Axioms*. 2023, vol. 12, no. 10, article 948. DOI: 10.3390/axioms12100948. 

## REFERENCES

1. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geoeological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

2. Malyukova L. S., Martyshev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

3. Zakharov V. N., Kaplunov D. R., Klebanov D. A., Radchenko D. N. Methodical approaches to standardization of data acquisition, storage and analysis in management of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 12, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10.

4. Balovtsev S. V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 310–319. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18.

5. Dzhioeva A. K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. *Ugol'*. 2022, no. 10, pp. 29–32. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.

6. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kolikov K. S. Aerological risk management in preparation mining of coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 107–116. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-107-116.

7. Shutaleva A. Ecological culture and critical thinking: Building of a sustainable future. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 18, article 13492. DOI: 10.3390/su151813492.

8. Zhanbayev R. A., Irfan M., Shutaleva A. V., Maksimov D. G., Abdykadyrkyzy R., Filiz Ş. Demoethical model of sustainable development of society: A Roadmap towards digital transformation. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 16, article 12478. DOI: 10.3390/su151612478.

9. Ananenko E. V., Bakhaeva S. P. Deformation risk analysis and geomechanical monitoring for the natural–technical system of a spoil dump and its foundation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 5 – 21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_5.

10. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2023, vol. 15, no. 1, pp. 7 – 16. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

11. Bazaluk O., Anisimov O., Saik P., Lozynskiy V., Akimov O., Hrytsenko L. Determining the safe distance for mining equipment operation when forming an internal dump in a deep open pit. *Sustainability.* 2023, vol. 15, no. 7, article 5912. DOI: 10.3390/su15075912.

12. Abdullah G. M. S., Abd El Aal A., Al Saiari M., Radwan A. E. Sustainable impact of coarse aggregate crushing waste (CACW) in decreasing carbon footprint and enhancing geotechnical properties of silty sand soil. *Applied Sciences.* 2023, vol. 13, no. 19, article 10930. DOI: 10.3390/app131910930.

13. Kopylov A. S., Dzhoieva A. K., Kondratyev Yu. I. An integrated approach to the development of the raw material base of the mining region with the use of resource-reproducing technologies. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2022, vol. 14, no. 2, pp. 228 – 239. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-228-239.

14. Li S., Wang Z. Study on the coupling effect of stress field and gas field in surrounding rock of stope and gas migration law. *Energies.* 2023, vol. 16, no. 18, article 6672. DOI: 10.3390/en16186672.

15. Golik V. I., Mitsik M. F., Aleksakhina Y. V., Alenina E. E., Ruban-Lazareva N. V., Kruzhkova G. V., Kondratyeva O. A., Trushina E. V., Skryabin O. O., Khayrutdinov M. M. Comprehensive recovery of metals in tailings utilization with mechanochemical activation. *Resources.* 2023, vol. 12, no. 10, article 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

16. Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. Yu. Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining. *Gornyi Zhurnal.* 2023, no. 5, pp. 69 – 74. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11.

17. Konyukhov D. S. forecast of technological deformations of the earth's surface during the construction of surface complexes of mines. *Ugol'.* 2023, no. 4, pp. 61 – 64. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-61-64.

18. Zakharov V. N., Efremovtsev N. N., Fedotenko V. S. Research into man-made impact of rock blasting in surface mining of mineral deposits. *Russian Mining Industry Journal.* 2022, no. 6, pp. 61 – 68. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-61-68.

19. Bourtsalas A. *Statewide analysis of U.S. metal waste and industrial residues trade dynamics from 2002 to 2022*, 30 October 2023, Preprint (Version 1), available at Research Square. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3443899/v1.

20. Xiang Y., Lan J., Cai Y., Wang Y., Dong Y., Hou H. *Preparation of nickel – cobalt tailings-based cementing materials by mechano-chemical activation: Performance and mechanism.* 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2640932/v1.

21. Golik V. I., Burdzieva O. G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2023, no. 13(3), pp. 180 – 192. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

22. Garifulina I. Y., Abdulkhalimov A. H., Zaseev I. A., Maystrov Yu. A. Prospects for development of Sadon deposits by in-situ leaching. *Mining Science and Technology (Russia).* 2020, vol. 5, no. 4, pp. 358 – 366. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-358-366.

23. Melkov D., Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A. Temporal and spatial geophysical data analysis in the issues of natural hazards and risk assessment (in example of North Ossetia, Russia). *Applied Sciences.* 2022, vol. 12, no. 6, article 2790. DOI: 10.3390/app12062790.

24. Ananenko E., Bakhaeva S. The reason analysis of the overburden rock dumps deformation. *E3S Web of Conferences.* 2021, vol. 315, article 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202131501001.

25. Gantimurov A., Kravtsov K., Tynchenko V., Evsyukov D., Nelyub V. Investigation of the influence of geographical factors on soil suitability using a nonparametric controlled method

of training and data analysis. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 431, article 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/202343103005.

26. Makovozova Z. E., Aksenova M. A., Keswani Chetan, Umirov B. Z. Effect of hazardous exogenous processes on nature and manmade system stability: A case-study of a Fiagdon tailings pond. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 7, pp. 76–87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_0\_76.

27. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

28. Usanov S. V., Konovalova Yu. P., Efremov E. Yu., Kharisova O. D., Usanova A. V. Unexpected deformation processes in the rock mass in surface mining: Emergence factors and prevention capabilities. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 15, pp. 111–118. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-15-111-118.

29. Rozanov I. Yu., Rybin V. V., Konstantinov K. N. Implementation of multi-tier integrated monitoring of wall stability in open pit mines. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. S1, pp. 135–141. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-135-141.

30. Kharisova O. D., Kharisov T. F. Prediction of ground surface collapse by instrumental observation data on rock mass movements during underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 264–274. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-264-274.

31. Strokova L. A., Nadezhdina Yu. Y. Natural and anthropogenic factors related to activity of slope processes on the territory of the projected railway Egegest–Kyzyl–Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 11, pp. 170–181. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3255.

32. Kang K., Huang S., Liu W., Cheng H., Fomenko I., Zhou Y. Sandstone slope stability analysis under wetting-drying cycles based on generalized hoek-brown failure criterion. *Frontiers of Earth Science*. 2022, vol. 10, article 838862. DOI: 10.3389/feart.2022.838862.

33. Khalkecheva L. K., Khalkechev R. K. Automated monitoring system of transport berms condition for landslide danger in the form of subsidence. *Ugol'*. 2022, no. 4, pp. 50–52. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

34. Yaitskaya N. A., Brigida V. S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022, vol. 12, no. 1, pp. 162–173. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

35. Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Y. I. Efficiency gains when using acti-vated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023, vol. 67, pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

36. Kozlova A., Kukartsev V., Melnikov V., Kovalev G., Stashkevich A. Finding dependencies in the corporate environment using data mining. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 431, article 05032. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105032.

37. Yaitskaya, N.A., Dzaganiia, L.M., Brigida, V.S. Geocological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023, no. 13(2), pp. 118–132. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

38. Wang D., Li R., Cheng J., Zheng W., Shen Y., Zhao S., Wu M. Research on the calculation model and control method of initial supporting force for temporary support in the underground excavation roadway of coal mine. *Axioms*. 2023, vol. 12, no. 10, article 948. DOI: 10.3390/axioms12100948.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Роман Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор, Московский политехнический университет, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203,

*Бригада Владимир Сергеевич* — канд. техн. наук,  
научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр  
«Субтропический научный центр РАН»,  
e-mail: 1z011@inbox.ru,

Web of Science Researcher ID: G-6933-2018,

РИНЦ SPIN-код: 2427-5938,

Scopus Author ID: 57209375522,

ORCID ID: 0000-0002-9421-5613,

*Лобков Константин Юрьевич*<sup>1</sup> — директор ИИЭ,

e-mail: lobkov.study@yandex.ru,

*Ступина Алена Александровна*<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор,

Сибирская пожарно-спасательная академия

ГПС МЧС России, e-mail: h677hm@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

*Тынченко Валерия Валерьевна*<sup>1,2</sup> — доцент, ИКИТ,

e-mail: t080801@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9701-7460,

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет

науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет.

**Для контактов:** Бригада В.С., e-mail: 1z011@inbox.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*R. V. Klyuev*, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor, Moscow Polytechnic University,  
107023, Moscow, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-3777-7203,

*V.S. Brigida*, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,

Federal Research Centre the Subtropical

Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,

354002, Sochi, Russia, e-mail: 1z011@inbox.ru,

Web of Science Researcher ID: G-6933-2018,

Scopus Author ID: 57209375522, RSCI SPIN-код: 2427-5938,

ORCID ID: 0000-0002-9421-5613,

*K. Y. Lobkov*<sup>1</sup>, Director IEE, e-mail: lobkov.study@yandex.ru,

*A.A. Stupina*<sup>1,2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Siberian Fire and Rescue Academy

of State Fire Service of Ministry of Emergency

Situations of Russia, 662972, Zheleznogorsk, Russia,

e-mail: h677hm@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

*V.V. Tynchenko*<sup>1,2</sup>, Assistant Professor, Institute of Space

and Information Technologies, e-mail: t080801@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9701-7460,

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science

and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia,

<sup>2</sup> Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.

**Corresponding author:** V.S. Brigida, e-mail: 1z011@inbox.ru.

Получена редакцией 16.08.2023; получена после рецензии 20.09.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 16.08.2023; received after the review 20.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.