

АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р.В. Ключев¹, Н.В. Мартюшев², В.В. Кукарцев^{3,4,5}, В.А. Кукарцев⁴, В.С. Бригида⁶

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Комплексный научно-исследовательский институт
им. Х.И. Ибрагимова, Грозный, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁵ Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁶ Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Россия

Аннотация: Обеспечение устойчивого функционирования горнотехнических систем и технологических процессов горного производства является одной из фундаментальных научных проблем. При этом особую актуальность приобретают вопросы совершенствования методологии оценки риска возникновения опасных геологических процессов. Авторский подход заключается в разработке приемов анализа и формирования совокупности регрессионных моделей разного типа влияющих факторов для их дальнейшего использования при оценке риска реализации опасных процессов по методике Ван Вестена-Абелла. Результаты исследований включают в себя обработку геологических данных о массиве горных пород с использованием LOESS. Представлена трехмерная интерполяция для заполнения пробелов в данных. Сформированы проекции функции отклика с использованием ПО Gnuplot. Построены двумерные регрессионные модели. Приведены результаты выявленных закономерностей пространственного распределения совокупности химических соединений, содержащихся во вмещающем массиве Дороговского месторождения песчаника.

Ключевые слова: оползень, геологический мониторинг, устойчивость склона, опасные явления, деградация земель, Устойчивая инфраструктура, экологическая устойчивость, устойчивая инфраструктура, инновации, глобальная эффективность использования ресурсов.

Для цитирования: Ключев Р. В., Мартюшев Н. В., Кукарцев В. В., Кукарцев В. А., Бригида В. С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.

Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems

R.V. Klyuev¹, N.V. Martyushev², V.V. Kukartsev^{3,4,5}, V.A. Kukartsev⁴, V. Brigida⁶

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,

² Kh. Ibragimov Complex Institute of Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

⁵ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁶ Federal Research Center «Subtropical Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Sochi, Russia

Abstract: Performance sustainability of geotechnical systems and process flows in mining is one of the key scientific problems of basic research. Specific relevance in this regard belongs to improvement of evaluation methodology for risks of hazardous geological processes. The authorial approach consists in development of techniques for the analysis and grouping of the regression models of different-type influential factors to be used later on in assessment of risk of hazardous processes by the Van Westen–Abella procedure. The studies include processing of rock mass geology data using LOESS. 3D interpolation for filling data gaps is presented. Projections of the response functions using Gnuplot are generated. 2D regression models are constructed. The revealed spatial patterns of chemical compounds contained in enclosing rock mass of the Dorogovskoe sandstone deposit.

Key words: landslide, geological monitoring, slope stability, hazardous events, land degradation, sustainable infrastructure, ecological sustainability, sustainable infrastructure, innovations, global resource use efficiency.

For citation: Klyuev R. V., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Brigida V. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):144-157. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.

Введение

Рост добычи ресурсов в усложняющихся горнотехнических условиях отработки запасов приводит к увеличению объемов вскрышных работ. При этом актуализируются проблемы реализации опасных деформационных процессов в склоновых системах [1]. Потеря устойчивости откосов или склонов (оползни) представляет собой опасное геологическое явление [2–4]. Деформации земной поверхности и контуров горнотехнических систем (бортов карьеров, надшахтных зданий и сооружений и др.) могут

реализовываться медленно (3–5 мм/год) или внезапно, приводя к невозможности ведения горных работ. Это создает существенные риски для работников горных предприятий. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы, связанные с оценкой и компенсацией негативного влияния природных и техногенных рисков [5–8]. Например, на Качарском карьере потеря устойчивости уступа с последующей остановкой работы произошла, несмотря на наличие действующей системы автоматического мониторинга поверхности уступов [9]. Системы мо-

нитинга чаще всего представляют собой несколько георадаров или лидаров, соединенных между собой в единую информационную сеть. На Ковдорском ГОК применяются IBIS ArcSAR и IBIS FM, которые могут оценивать только небольшие смещения на контуре уступов [10].

Исследованиям гравитационных процессов в склоновых системах посвящены работы [13, 14]. Подверженность оползням на основе мониторинга негативных геологических проявлений можно охарактеризовать на различных иерархических уровнях [15]. Альтернативным подходом к оценке природных и антропогенных рисков является использование матрицы «частота — тяжесть последствий» [16, 17]. Из анализа существующих методов локализации оползнеопасных зон следует, что наиболее важными факторами являются: климатические (осадки, температура, испарение); геоморфологические (топография местности, уклон, форма, растительность); геологические (литология, уровень подземных вод); структурные (тектонические нарушения); сейсмоактивность; техногенные (удаленность до объектов инфраструктуры). При оценке деформационных процессов склоновых систем следует учитывать целый спектр факторов различной природы, что делает решение данной многомерной задачи весьма затруднительным [11, 12]. Функционирование природно- и горнотехнических систем напрямую связано с климатологическими, геологическими или сейсмическими типами факторов, что может существенно сказываться на объемах добычи полезных ископаемых. Единовременное воздействие нескольких однотипных факторов увеличивает стохастическую составляющую (частоту неопределенности) при оценке устойчивости откосов. Для решения данной задачи нашли широкое применение алгоритмы

искусственного интеллекта: адаптивные сетевые системы нечеткой логики (ANFIS) [18], машины опорных векторов (SVM) [19], k-ближайших соседей (k-NN) [20], деревья решений (DT) [21, 22], а также методы случайного леса (RF) и многослойные перцептроны (MLP) [23]. Тем не менее, общая методология и отдельные аспекты при оценке рисков мгновенного развития оползневых процессов в геосредах нуждаются в совершенствовании [24–26], как и алгоритмы обработки данных.

Разнообразие геологических условий и сложность описания совокупности пространственного распределения литологических, стратиграфических и других особенностей сложения геологической толщи обуславливают вопросы локализации зон ослабления пласта [27]. На это следует накладывать районы активного протекания экзогенных процессов, которые активизируют сдвиги земной поверхности [28, 29]. Данная составляющая представляет серьезные риски в криолитозоне, в зоне промышленных площадок горно-обогатительных комбинатов [30, 31], а также при наличии поблизости гидротехнических сооружений.

В большинстве работ зонирование риска оползней производится на основе ГИС-технологий и является неотъемлемой частью городского планирования или управления пространственным развитием прибрежных территорий [32]. Например, в работе [33] при решении подобных задач учитывалось существование слабых геологических структур в сочетании с топографическими данными местности. При зонировании рисков в особой зоне Южного Парса (Иран) сочетание нескольких факторов учитывалось для многокритериальных и нечетких подходов к оценке рисков развития оползней. Авторы использовали процесс аналитической иерархии (АНР) и нечеткие множества для процесса при-

нения решений в виде многокритериальной оценки на основе ГИС с применением ArcGIS. При этом общая методология оценки геологического риска (по методике Ван Вестена-Абелла) учитывает все возможные варианты реализации опасных геологических процессов [34, 35].

Выбор способа использования множества растров (пространственного распределения реализации отдельного фактора) и методов их представления в виде регрессионных моделей остается трудоемкой научной задачей. Качество построения таких моделей («проекции функции отклика») напрямую зависит от выбранной последовательности алгоритмов и стадий. Наряду с методами машинного обучения или методами на основе Гаусовских процессов (метод Винера – Колмогорова) можно эффективно применять детерминированные методы.

Анализ пространственно-временной изменчивости геологической информации при оценке деформационных процессов в склоновых системах является важной научной задачей для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем.

Материалы и методы

Исходя из цели исследования, основная задача заключалась в определении способа сравнения пространственно-распределенных наборов данных относительно главного фактора — мощности песчаника. При этом трехмерная интерполяция S-spline в сочетании с LOESS (методом сглаживания набора экспериментальных данных) использовалась для формирования поверхности отклика в ПО Gnuplot по образцу работы [36].

Предметом исследования являлись геологические параметры вмещающих пород при освоении Дороговского ме-

сторождения песчаника $O_3^0SO_3^1$. В химическом составе песчаника в основном полевошпатово-кварцевая разность и слюда. Геологическое строение данного месторождения обусловлено каменноугольными и четвертичными отложениями. Первые отложения относятся к свите C_3^2 (карбон) и на исследуемом участке образуют заворот геологических формаций на северо-запад. При этом угол падения не превышает 3° , что указывает на пологое залегание пласта. Четвертичные отложения встречаются в виде желто-бурых суглинков со средней мощностью 2,5–2,8 м с включением известняка. Непосредственная почва исследуемого пласта представлена глинистыми сланцами $m \leq 2,3$ м.

Авторский подход к анализу экспериментальных данных заключался в интерпретации совокупности моделей реализации отдельных элементов (проекции функции отклика, растров или регрессионных моделей) для одного типа факторов. Решение данной задачи позволит оптимизировать классический метод оценки риска реализации опасных процессов [34].

Для каждого значимого геологического фактора формировалась отдельная регрессионная модель, ее графическое решение представлялось в трехмерном виде, а затем проецировалось на двумерную пространственную плоскость (XY). Регрессионная модель вычислялась методом наименьших квадратов. Ограничения моделей обусловлены граничными значениями данных геологического априорирования и пространственными границами сети поверхностных скважин. Пространственные ограничения можно представить как: $X \in [6,4; 25]$, $Y \in [11,8; 25]$. По параметрам элементов реализации геологического фактора ограничения следующие: мощность залежи $\in [0,9; 24]$, $Al_2O_3 \in [2,9; 6,4]$, $K_2O + Na_2O \in [0,8; 1,8]$, $CaO + MgO \in [0,4; 0,7]$.

Результаты и обсуждения

Геологические параметры месторождения песчаника на площади Дороговского месторождения [37, 38] представлены в таблице.

Представление пространственно распределенных данных на двумерной плоскости вызывает ряд проблем, которые связаны с недостаточной точностью регрессионных моделей, а именно, с вы-

Пространственные изменения мощности пласта и химических элементов Spatial changes in reservoir thickness and chemical element content

Протяженность по падению залежи (X), м	Протяженность по простиранию залежи (Y), м	Мощность залежи (m), м	Элементы, %		
			Al ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O	CaO+MgO
11,5	18,9	0,9	2,88	0,83	0,49
19,4	15,1	4,7	2,96	0,86	0,55
21,3	18,7	5,6	6,44	1,80	0,71
20,4	22,2	8,0	4,38	1,28	0,39
18,4	18,3	10,1	3,94	0,95	0,53
9,8	27,2	11,8	5,02	1,03	0,62
11,0	21,1	12,1	5,12	1,38	0,64
15,4	13,9	12,2	4,28	1,37	0,45
17,6	21,8	15,0	6,31	1,76	0,48
11,6	16,8	15,6	3,74	1,06	0,52
24,3	22,9	15,8	4,63	1,27	0,49
15,6	17,0	17,0	5,46	1,51	0,73
6,4	13,9	18,8	4,96	1,62	0,68
14,4	22,5	19,4	5,1	1,20	0,45
7,8	16,3	20,3	5,05	1,43	0,64
25,0	19,2	22,2	6,08	1,64	0,38
9,8	11,8	23,8	4,74	1,12	0,38

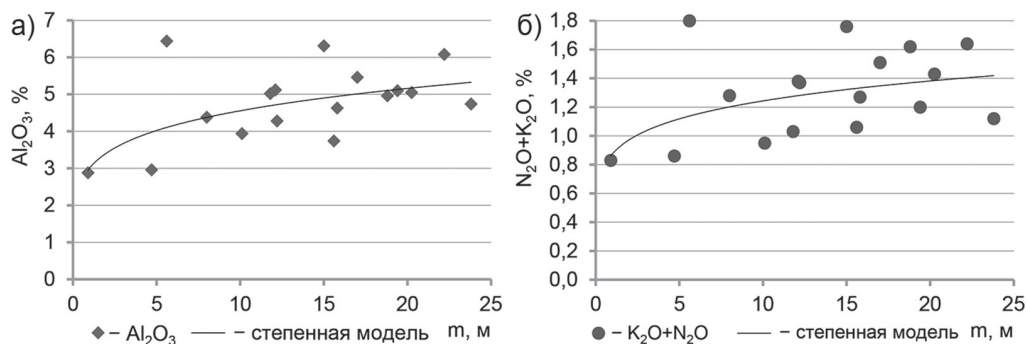


Рис. 1. Взаимосвязь изменения содержания химических соединений с мощностью песчаника: изменение оксида алюминия (а); изменение оксида калия и натрия (б)

Fig. 1. Relationship between changes in content of chemical compounds and the thickness of sandstone: change in aluminum oxide (a); change in potassium and sodium oxide (b)

сокой степенью дисперсии экспериментальных точек. Например, для оксида алюминия или другого произвольного элемента сложно выявить его взаимосвязь с изменением мощности песчаника (см. рис. 1).

Из анализа данных (рис. 1) следует, что в целом очевидна тенденция роста доли химических соединений с ростом мощности полезного ископаемого. Тем не менее, это суждение основывается на моделях степенных кривых, коэффициент детерминации которых не превышает 0,5. Так как существует значительная степень рассеяния экспериментальных данных относительно оси ординат, то распределение мощности $O_3^0SO_3^1$ далеко от «равномерного». Пространственная модель ($R^2 = 0,91$) распределения мощности залежи относительно «Х» (простираение) и «У» (падение/восстание) приведена на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что имеет место ярко выраженная нелинейность в распределении мощности песчаника, при этом локальный минимум (2 м) сосредоточен в крайнем правом углу области с максимальным значением Х и минимальным — У. Локальный максимум (25 м) сосредоточен в крайне левом углу области с максимальным значением.

Х и минимальным — У. В зоне средних значений падения/восстания залежи с ростом ее простираения мощность песчаника меняется нелинейным образом.

В связи с этим очевидно, что и пространственное распределение химических соединений будет иметь похожие тенденции, обуславливая особенности разброса своих значений при их отображении на двумерной плоскости. Это и объясняет минимальные значения коэффициентов детерминации для двумерных моделей, приведенных на рис. 1. В дальнейшем на основе авторского метода представления трехмерных моделей осуществлялось сглаживание экспериментальных значений методом LOESS, затем пробелы в данных заполнялись по алгоритму Renka с последующим вводом (в виде текстового формата данных) в Gnuplot. Поверхности отклика пространственного распределения концентрации химических соединений отображались по образцу рис. 2. На последнем этапе поверхности отклика проецировались на плоскость «падение-простираение». Полученная совокупность проекций отклика произвольных геологических факторов (оксида алюминия, оксида калия и натрия, а также оксида кальция и магния) от геометрических парамет-

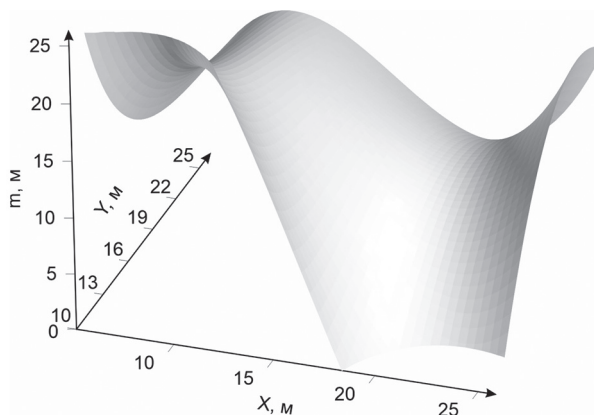


Рис. 2. Пространственное распределение мощности песчаника $O_3^0SO_3^1$
 Fig. 2. Spatial distribution of sandstone thickness $O_3^0SO_3^1$

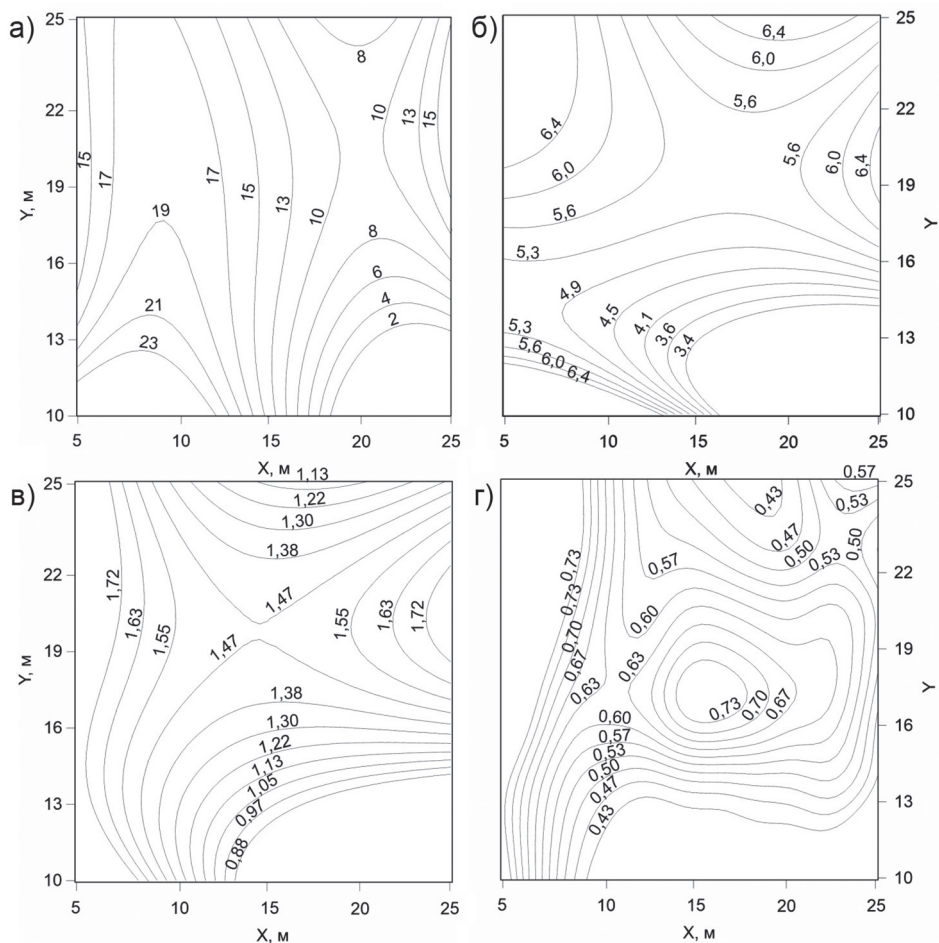


Рис. 3. Проекция пространственного распределения геологических факторов и мощности залежи: мощности песчаника $O_3^0SO_3^1$ (а); распределение Al_2O_3 (б); распределение K_2O+N_2O (в); распределение $CaO+MgO$ (г)

Fig. 3. Projections of the spatial distribution of geological factors and thickness of the deposit: thickness of sandstone $O_3^0SO_3^1$ (a); distribution of Al_2O_3 (b); distribution of K_2O+N_2O (v); distribution of $CaO+MgO$ (g)

ров месторождения сравнивается с проекцией мощности песчаника $O_3^0SO_3^1$ (рис. 3).

Из анализа рис. 3, а следует, что описанные ранее особенности распределения мощности песчаника можно дополнить — стабилизация выдержанности мощности залежи наблюдается по всем значениям ее простираения при диапазоне значений $Y =$ от 19 до 25 м.

Из анализа рис. 3, б следует, что локальный минимум доли оксида алюми-

ния (3,4%) находится в области $X =$ от 16 до 25 м, а по оси Y — от 10 до 14,5 м. При этом его локальный максимум (6,4%) прослеживается при $X =$ от 5 до 13 м, а по оси Y — от 10 до 12 м.

Из анализа рис. 3, в следует, что локальный минимум концентрации оксида калия и натрия (0,88%) находится в области $X =$ от 14 до 25 м, Y — от 10 до 13,8 м. При этом его локальный максимум (1,72%) прослеживается при $X =$ от 5 до 7 м по всей протяженности оси Y .

Из анализа рис. 3, г следует, что локальный минимум доли оксида кальция и магния (0,43%) расположен в области $X = 14 - 25$ м, $Y = 10 - 13,8$ м. При этом его локальный максимум (0,73%) прослеживается при $X = 5 - 7$ м, $Y = 13 - 25$ м. Существует вторая область максимального экстремума (0,73%), которая локализована в диапазоне $X = 14,9 - 16$ м, $Y = 16,1 - 18$ м.

Заключение

Для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем и технологических процессов горного производства необходимо совершенствовать методы оценки устойчивости откосов на основе анализа пространственно распределенных данных. Оползни являются сложно протекающими природными геологическими явлениями, триггером появления которых может быть единовременное действие нескольких факторов. Это вынуждает применять новые подходы к анализу локальных зон, которые присутствуют на проекциях моделей второстепенных геологических факторов. Единовременное их воздействие на массив горных пород может спровоцировать потерю устойчивости склоновых систем. Приведены результаты исследований произвольных сочетаний геологических параметров вмещающих пород Дороговского месторождения песчаника $O_3^0SO_3^1$, заключающиеся в следующем.

1. Установлено, что ярко выраженная нелинейность в распределении мощности песчаника обуславливает появление локального минимума (2 м), сосредоточенного в области $X = 18 - 25$ м, $Y = 10 - 13$ м, а также локального максимума (23 м) при $X = 5 - 11$ м, $Y = 10 - 12$ м.

2. В результате проведенного моделирования распределения химических соединений установлено, что в примерно тех же пространственных диапазонах границ локальные минимумы доли оксида алюминия составляют 3,4%, оксида калия и натрия — 0,88%, а оксида кальция и магния — 0,43%.

Кроме того, такие же особенности прослеживаются и для областей локальных максимумов, где доли оксида алюминия составляют 6,4%, оксида калия и натрия — 1,72%, а оксида кальция и магния — 0,73%.

3. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методологии оценки риска реализации опасных геологических процессов в склоновых системах.

Полученные результаты актуализируют необходимость будущих исследований в области использования авторского подхода к анализу и формированию совокупности регрессионных моделей функции отклика (разного типа влияющих факторов) при оценке риска реализации опасных процессов по методике Ван Вестена-Абелла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Клюев Р. В., Бригида В. С., Лобков К. Ю., Ступина А. А., Тынченко В. В. К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при движении земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 292–304. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_292.
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. 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.

5. Голик В. И., Дзапаров В. Х., Лискова М. Ю., Масленников С. А. Минимизация риска загрязнения селитебных зон пылью при открытой добыче руд // Безопасность труда в промышленности. — 2024. — № 1. — С. 56–60. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-1-56-60.

6. 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, article 2790. DOI: 10.3390/app12062790.

7. Конгар-Скюрюн Ч. Б., Ковальский Е. П. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряженно-деформированное состояние массива // Геология и геофизика Юга России. — 2023. — Т. 13. — № 4. — С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

8. Kuz'min M. P., Larionov L. M., Kondratiev V. V., Grigoriev V. G., Kuz'mina A. S. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing // Construction and Building Materials. 2018, vol. 179, pp. 117–124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.222.

9. Gladkih A. M., Konyuhov V. Yu., Galyautdinov I. I., Shchadova E. I. Green building as a tool of energy saving // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 350, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012032.

10. 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 in Earth Science. 2022, vol. 10, article 838862. DOI: 10.3389/feart.2022.838862

11. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Galyautdinov I. I., Shchadova E. I. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 760, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012027.

12. Kondrat'ev V. V., Gorovoy V. O., Kolosov A. D., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y. Description of the complex of technical means of an automated control system for the technological process of thermal vortex enrichment // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012101. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012101.

13. Золотарев Г. С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение / Материалы совещания по изучению оползней и мер борьбы с ними. — Киев: Изд-во КГУ, 1964. — С. 165–170.

14. Nikoobakht S., Azarafza M., Akgün H., Derakhshani R. Landslide susceptibility assessment by using convolutional neural network // Applied Sciences. 2022, vol. 12, article 5992. DOI: 10.3390/app12125992.

15. Бригида В. С., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З., Голик В. И. Использование разгрузочного бурения для обеспечения безопасности отработки газоносных угольных пластов Донбасса // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 3. — С. 7–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.

16. Kaverzneva T., Rodionov V., Skripnik I., Zhikharev S., Polyukhovich M. Determination of the miners' individual injury risk as a result of the dynamic manifestation of rock pressure // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 458, article 08011. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808011.

17. 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.

18. Pham B. T., Bui D. T., Dholakia M., Prakash I., Pham H. V. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area // Geotechnical and Geological Engineering. 2016, vol. 34, pp. 1807–1824. DOI: 10.1007/s10706-016-9990-0.

19. Hong H., Pourghasemi H. R., Pourtaghi Z. S. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China). A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models // Geomorphology. 2016, vol. 259, pp. 105–118. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.02.012.

20. Suprun E., Tynchenko V., Khramkov V., Kovalev G., Soloveva T. The use of artificial intelligence to diagnose the disease // BIO Web of Conferences. 2024, vol. 84, article 01008. DOI: 10.1051/bioconf/20248401008.

21. Hong H., Tsangaratos P., Ilija I., Chen W., Xu C. Comparing the performance of a logistic regression and a random forest model in landslide susceptibility assessments. The case of Wuyuan Area, China / Advancing Culture of Living with Landslides. Workshop on World Landslide, Forum. 2017, pp. 1043–1050. DOI: 10.1007/978-3-319-53498-5_118.
22. Chen W., Pourghasemi H. R., Naghibi S. A. A comparative study of landslide susceptibility maps produced using support vector machine with different kernel functions and entropy data mining models in China // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018, vol. 77, pp. 647–664. DOI: 10.1007/s10064-017-1010-y.
23. Borodulin A., Gladkov A., Gantimurov A., Kukartsev V., Evsyukov D. Using machine learning algorithms to solve data classification problems using multiattribute dataset // BIO Web of Conferences. 2024, vol. 84, article 02001. DOI: 10.1051/bioconf/20248402001.
24. Chen W., Pourghasemi H. R., Zhao Z. A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping // Geocarto International. 2017, vol. 32, pp. 367–385. DOI: 10.1080/10106049.2016.1140824.
25. Kondratiev V. V., Karlina A. I., Guseva E. A., Konstantinova M. V., Kleshnin A. A. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 463, no. 3, article 032068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032068.
26. Куликова Е. Ю., Конюхов Д. С. Об определении технологических деформаций зданий при геотехническом строительстве // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 187–197. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-187-197.
27. Klyuev S. V., Kashapov N. F., Radaykin O. V., Sabitov L. S., Klyuev A. V., Shchekina N. A. Reliability coefficient for fibreconcrete material // Construction Materials and Products. 2022, vol. 5, no. 2, pp. 51–58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58.
28. Novoselov O. G., Sabitov L. S., Sibgatullin K. E., Sibgatullin E. S., Klyuev A. S., Klyuev S. V., Shorstova E. S. Method for calculating the strength of massive structural elements in the general case of their stress-strain state (kinematic method) // Construction Materials and Products. 2023, vol. 6, no. 3, pp. 5–17. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-5-17.
29. Шестопалов В. Л., Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С. Сравнительный анализ деформационных методов мониторинга сейсмической активности горных районов Черноморского побережья и Камчатки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 535–543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.
30. Гридина Е. Б., Боровиков Д. О. Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 114–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.
31. Kirsanova N., Nevskaya M., Raikhlin S. Sustainable development of mining regions in the Arctic zone of the Russian Federation // Sustainability. 2024, vol. 16, article 2060. DOI: 10.3390/su16052060.
32. Tananykhin D. S., Struchkov I. A., Khormali A., Roschin P. V. Investigation of the influences of asphaltene deposition on oilfield development using reservoir simulation // Petroleum Exploration and Development. 2022, vol. 49, no. 5, pp. 1138–1149. DOI: 10.1016/S1876-3804(22)60338-0.
33. Azarafza M., Ghazifard A., Akgün H., Kaljahi E. Landslide susceptibility assessment of South Pars Special Zone, southwest Iran // Environmental Earth Sciences. 2018, vol. 77, article 805. DOI: 10.1007/s12665-018-7978-1.
34. Castellanos Abella E. A., Van Westen C. J. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantanamo, Cuba // Geomorphology. 2008, vol. 94, no. 3-4, pp. 453–466. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.038.
35. Kulikova E. Yu., Ivannikov A. L. The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1425, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.
36. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A. Circular mining wastes management for sustainable production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su15111671.
37. Босиков И. И., Клюев Р. В., Силаев И. В. Комплексный анализ геолого-промышленных параметров Дороговского месторождения // Геология и геофизика Юга России. — 2022. — Т. 12. — № 2. — С. 89–102. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.98.007.

38. Kusimova E., Saychenko L., Islamova N., Drofa P., Safiullina E., Dengaev A. Application of machine learning methods for predicting well disturbances // Journal of Applied Engineering Science. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 76–86. DOI: 10.5937/jaes0-38729. **MIAB**

REFERENCES

1. 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.
2. 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, no. 11-1, pp. 292–304. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_292.
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. 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.
5. Golik V. I., Dzaparov V. Kh., Liskova M. Yu., Maslennikov S. A. Minimization of the risk of contamination of residential areas with dust during open mining of ores. *Occupational Safety in Industry*. 2024, no. 1, pp. 56–60. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-1-56-60.
6. 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, article 2790. DOI: 10.3390/app12062790.
7. Kongar-Syuryun Ch. B., Kovalski E. R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023, vol. 13, no. 4, pp. 177–187. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.
8. Kuz'min M. P., Larionov L. M., Kondratiev V. V., Grigoriev V. G., Kuz'mina A. S. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 179, pp. 117–124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.222.
9. Gladkih A. M., Konyuhov V. Yu., Galyautdinov I. I., Shchadova E. I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 350, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012032.
10. 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 in Earth Science*. 2022, vol. 10, article 838862. DOI: 10.3389/feart.2022.838862
11. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Galyautdinov I. I., Shchadova E. I. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 760, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012027.
12. Kondrat'ev V. V., Gorovoy V. O., Kolosov A. D., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y. Description of the complex of technical means of an automated control system for the technological process of thermal vortex enrichment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012101. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012101.
13. Zolotarev G. S. Genetic types of landslides, their development and study. *Materialy soveshchaniya po izucheniyu opolzney i mer bor'by s nimi* [Materials of a meeting on the study of landslides and measures to combat them], Kiev, Izd-vo KGU, 1964, pp. 165–170.
14. Nikoobakht S., Azarafza M., Akgün H., Derakhshani R. Landslide susceptibility assessment by using convolutional neural network. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, article 5992. DOI: 10.3390/app12125992.
15. Brigida V. S., Dmitrak Yu. V., Gabaraev O. Z., Golik V. I. Use of destressing drilling to ensure safety of donbass gas-bearing coal seams extraction. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no. 3, pp. 7–11. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.
16. Kaverzneva T., Rodionov V., Skripnik I., Zhikharev S., Polyukhov M. Determination of the miners' individual injury risk as a result of the dynamic manifestation of rock pressure. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 458, article 08011. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808011.

17. 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.
18. Pham B. T., Bui D. T., Dholakia M., Prakash I., Pham H. V. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2016, vol. 34, pp. 1807 – 1824. DOI: 10.1007/s10706-016-9990-0.
19. Hong H., Pourghasemi H. R., Pourtaghi Z. S. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China). A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models. *Geomorphology*. 2016, vol. 259, pp. 105 – 118. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.02.012.
20. Suprun E., Tynchenko V., Khramkov V., Kovalev G., Soloveva T. The use of artificial intelligence to diagnose the disease. *BIO Web of Conferences*. 2024, vol. 84, article 01008. DOI: 10.1051/bioconf/20248401008.
21. Hong H., Tsangaratos P., Ilia I., Chen W., Xu C. Comparing the performance of a logistic regression and a random forest model in landslide susceptibility assessments. The case of Wuyuan Area, China. *Advancing Culture of Living with Landslides. Workshop on World Landslide, Forum*. 2017, pp. 1043 – 1050. DOI: 10.1007/978-3-319-53498-5_118.
22. Chen W., Pourghasemi H. R., Naghibi S. A. A comparative study of landslide susceptibility maps produced using support vector machine with different kernel functions and entropy data mining models in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2018, vol. 77, pp. 647 – 664. DOI: 10.1007/s10064-017-1010-y.
23. Borodulin A., Gladkov A., Gantimurov A., Kukartsev V., Evsyukov D. Using machine learning algorithms to solve data classification problems using multiattribute dataset. *BIO Web of Conferences*. 2024, vol. 84, article 02001. DOI: 10.1051/bioconf/20248402001.
24. Chen W., Pourghasemi H. R., Zhao Z. A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*. 2017, vol. 32, pp. 367 – 385. DOI: 10.1080/10106049.2016.1140824.
25. Kondratiev V. V., Karlina A. I., Guseva E. A., Konstantinova M. V., Kleshnin A. A. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 463, no. 3, article 032068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032068.
26. Kulikova E. Yu., Konyukhov D. S. On the determination of buildings technological deformations in geotechnical construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 187 – 197. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-187-197.
27. Klyuev S. V., Kashapov N. F., Radaykin O. V., Sabitov L. S., Klyuev A. V., Shchekina N. A. Reliability coefficient for fibreconcrete material. *Construction Materials and Products*. 2022, vol. 5, no. 2, pp. 51 – 58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58.
28. Novoselov O. G., Sabitov L. S., Sibgatullin K. E., Sibgatullin E. S., Klyuev A. S., Klyuev S. V., Shorstova E. S. Method for calculating the strength of massive structural elements in the general case of their stress-strain state (kinematic method). *Construction Materials and Products*. 2023, vol. 6, no. 3, pp. 5 – 17. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-5-17.
29. Shestopalov V. L., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S. Comparative analysis of deformation methods for seismic activity monitoring in mountainous areas of the Black Sea coast and Kamchatka. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 535 – 543. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.
30. Gridina E. B., Borovikov D. O. Identification of the causes of injuries based on occupational risk assessment maps at the open-pit coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 114 – 128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.
31. Kirsanova N., Nevskaya M., Raikhlin S. Sustainable development of mining regions in the Arctic zone of the Russian Federation. *Sustainability*. 2024, vol. 16, article 2060. DOI: 10.3390/su16052060.
32. Tananykhin D. S., Struchkov I. A., Khormali A., Roschin P. V. Investigation of the influences of asphaltene deposition on oilfield development using reservoir simulation. *Petroleum Exploration and Development*. 2022, vol. 49, no. 5, pp. 1138 – 1149. DOI: 10.1016/S1876-3804(22)60338-0.

33. Azarafza M., Ghazifard A., Akgün H., Kaljahi E. Landslide susceptibility assessment of South Pars Special Zone, southwest Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2018, vol. 77, article 805. DOI: 10.1007/s12665-018-7978-1.

34. Castellanos Abella E. A., Van Westen C. J. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantanamo, Cuba. *Geomorphology*. 2008, vol. 94, no. 3-4, pp. 453–466. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.038.

35. Kulikova E. Yu., Ivannikov A. L. The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1425, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.

36. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A. 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.

37. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V. Comprehensive analysis and assessment of Prospective gold-ore zones using modern geophysical methods. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022, vol. 12, no. 2, pp. 89–102. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.98.007.

38. Kusimova E., Saychenko L., Islamova N., Drofa P., Safiullina E., Dengaev A. Application of machine learning methods for predicting well disturbances. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 76–86. DOI: 10.5937/jaes0-38729.

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,

Мартюшев Никита Владимирович — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский

институт им. Х.И. Ибрагимова, e-mail: martjushev@tpu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0620-9561,

Кукарцев Владислав Викторович — канд. техн. наук, доцент,

Сибирский государственный университет науки и технологий

им. М.Ф. Решетнева; Сибирский федеральный университет;

Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,

Кукарцев Виктор Алексеевич — канд. техн. наук, доцент,

Политехнический институт, Сибирский федеральный университет,

e-mail: vkukarsev@sfu-kras.ru,

Бригада Владимир Сергеевич — канд. техн. наук,

научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр

«Субтропический научный центр Российской академии наук»,

e-mail: 1z011@inbox.ru, РИНЦ SPIN-код: 2427-5938,

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

Scopus Author ID: 57209375522,

ORCID ID: 0000-0002-9421-5613

Для контактов: Кукарцев В.В., e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R. V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Professor, Moscow Polytechnic University,

107023, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3777-7203,

N.V. Martjushev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Kh. Ibragimov Complex Institute

of Russian Academy of Sciences, Chechen Republic,
364906, Grozny, Russia, e-mail: martjushev@tpu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0620-9561,

V.V. Kukartsev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia;
Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia;
Bauman Moscow State Technical University,
105005, Moscow, Russia, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,

V.A. Kukartsev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Polytechnical Institute, Siberian Federal University,
660041, Krasnoyarsk, Russia,
e-mail: vkukarsev@sfu-kras.ru,

V. Brigida, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Federal Research Center «Subtropical Scientific Center
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-code: 2427-5938,
ORCID ID: 0000-0002-9421-5613.

Corresponding author: *V.V. Kukartsev*, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

Получена редакцией 01.02.2024; получена после рецензии 06.03.2024; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 01.02.2024; received after the review 06.03.2024; accepted for printing 10.04.2024.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИННОВАЦИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

(2024, № 1, СВ 3, 40 с.)

Голембо О.Д., Маркин И.В.

В настоящем выпуске отражены результаты исследований по внедрению инновационных технологий проходки и крепления вертикальных стволов в обычных и сложных геомеханических условиях. Большое внимание уделено моделированию взаимодействия системы «крепь – породный массив» с применением современных программных комплексов, а также проработке оптимальных параметров крепи и технологии ее возведения. Выпуск представляет интерес для ученых и специалистов практиков в сфере шахтного строительства.

INNOVATIONS IN THE CONSTRUCTION OF DEEP VERTICAL SHAFTS

O.D. Golembo, I.V. Markin

This issue reflects the results of research on the introduction of innovative technologies for sinking and fastening vertical shafts in ordinary and complex geomechanical conditions. Much attention is paid to modeling the interaction of the "support – rock mass" system using modern software systems, as well as working out the optimal parameters of the support and the technology of its construction. The issue is of interest to scientists and practitioners in the field of mine construction.