

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО БОЛЬШЕСЫРСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В. Е. Кисляков, А. С. Федотов[✉], Д. С. Снетков, А. В. Шварцкопф

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты анализа условий Большесырского бурогоугольного месторождения в части определения уровня изменчивости характеристик с использованием статистических методов и их классификация. Результаты работы позволили обоснованно определить наиболее изменчивую характеристику месторождения для последующей разработки решений по ее регулированию. Выявлена зависимость изменения зольности, использование которой должно способствовать стабилизации потока продукции. Поставлены дальнейшие цели для исследований.

Ключевые слова: уголь, качественные характеристики, управление качеством угля, коэффициент вариации

Для цитирования: Кисляков ВЕ, Федотов АС, Снетков ДС, Шварцкопф АВ. Исследование пространственной изменчивости горно-геологических условий и показателей качества полезного ископаемого Большесырского бурогоугольного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):47-52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-47-52>.

STUDY OF SPATIAL VARIABILITY OF QUALITY INDICATORS OF THE BOLSHESYRSKOYE LIGNITE COAL DEPOSIT

V. E. Kislyakov, A. S. Fedotov[✉], D. S. Snetkov, A. V. Shwartzkopf

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University", Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Abstract: This paper presents the results of the analysis of conditions of the Bolshesyrskoye lignite coal deposit in terms of determining the level of variability of characteristics using statistical methods and provides their classification. The results of the work made it possible to reasonably determine the most variable characteristic of the deposit for the subsequent development of solutions for its regulation. The dependence of ash content change was revealed, the use of which should contribute to stabilization of the product flow. Further research goals are set.

Keywords: coal, quality characteristics, coal quality management, coefficient of variation

For citation: Kislyakov VE, Fedotov AS, Snetkov DS, Shwartzkopf AV. Study of spatial variability of quality indicators of the Bolshesyrskoye lignite coal deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-47-52>.

Введение

Исследованиями доказано, что качество добываемой продукции оказывает прямое влияние на величину показателей экономической эффективности освоения месторождения [13]. Кроме того, однородность потока добытого полезного ископаемого, поступающего из карьера (разреза), также влияет на величину эксплуатационных затрат. Чем

однородность потока ниже, тем больше затрат возникает в дальнейших технологических переделах для приведения продукции в более однородное состояние, особенно при поставке сырья нескольким потребителям с разным требованием [4].

Однородность потока добываемой продукции напрямую зависит от применяемой технологии, порядка отработки месторождения и непосредственно от уровня изменчивости ка-

качественных характеристик полезного ископаемого в недрах, которое уникально для каждой залежи. Для того чтобы иметь однозначное понимание о качественных характеристиках полезного ископаемого на конкретном объекте исследования, а именно диапазоне и характере изменчивости, а также закономерности изменения, необходимо детальное изучение показателей качества. Наличие исчерпывающей информации о характере изменчивости показателей качества позволит в дальнейшем наиболее точно обосновать параметры ведения горных работ и способов усреднения. Для получения результатов достаточно изучения материалов по результатам детальной геологической разведки с использованием методов статистической оценки и современных инструментов визуализации.

Совместно с качеством полезного ископаемого существенное влияние на технологию и комплексную механизацию оказывает изменчивость горно-геологических условий месторождения. Поэтому не менее важным является наличие информации о диапазонах и степени изменчивости мощностей как полезного ископаемого, так и вскрышных пород.

Цель исследования: проведение анализа и оценки уровня изменчивости характеристик полезного ископаемого для дальнейшего обоснования и принятия технологических и технических решений, позволяющих максимально стабилизировать однородность добываемой продукции.

Основным исследуемым показателем принята зольность полезного ископаемого, как один из ключевых факторов, влияющих на уровень доходности предприятия, а следовательно, и на уровень инвестиционной привлекательности [5, 6].

Объект исследования: Большесырское бурогольное месторождение.

Предмет исследования: качественные характеристики угольного пласта и уровень их изменчивости.

Методика исследования

Методы

Основным методом исследования в рамках данной работы является анализ с применением встроенных функций различных программных комплексов, позволяющих оперативно решать поставленные статистические задачи, такие как построение графиков зависимости, диаграмм рассеяния, гистограмм распределения, получение уравнений зависимости.

Вторым используемым методом исследования является моделирование [7–9], с помощью которого ранее был создан цифровой двойник объекта исследования [10], полноценно описывающий изучаемое месторождение и тем самым позволяющий более обширно производить анализ не только по имеющимся данным разведочного бурения.

Определение уровня изменчивости или однородности по каждому исследуемому параметру допустимо оценивать с использованием статистической оценки.

Наиболее удобным показателем, демонстрирующим уровень однородности выборки, является коэффициент вариации, который можно определить по следующей формуле

$$K_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{\bar{K}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; $\bar{K}$ – среднее значение оцениваемого показателя,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

здесь

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где K_i – значение показателя в выбранной i -й пробе; n – количество угольных проб, используемых для вычисления.

В таблице 1 приведено описание совокупности характеристик, оцениваемых по коэффициенту вариации [11].

Таблица 1 / Table 1
Типизация выборки в зависимости от уровня изменчивости /
Sample typification depending on the level of variability

Значение коэффициента вариации, % / Variation coefficient value, %	Тип выборки / Sample type
10	Однородная
10–20	Достаточно однородная
20–33	Достаточно разнородная
>33	Разнородная

Таким образом, определяя коэффициент вариации для исследуемого показателя и рассматривая выборки разного объема, возможно дать сравнительную оценку каждой выборке по единому показателю однородности.

В качестве основных материалов и инструментов исследования для анализа и достижения поставленной цели использовано следующее:

- отчет о геологоразведке Большесырского бурогольного месторождения;
- блочная модель месторождения;
- встроенные функции пакета Microsoft Excel;
- встроенные функции ГГИС MicroMine.

Выбор исследуемых показателей

В качестве основных исследуемых показателей, подлежащих оценке на уровень их изменчивости, выбраны: мощность угольного пласта, мощность вскрышных пород, зольность угля. Параметры рассцениваются как наиболее доминирующие при выборе технологии отработки и дальнейшей эффективности освоения месторождений.

Степень изменчивости мощностей вскрышных пород и угольного пласта напрямую влияет на структуру комплексной механизации, порядок отработки и скорость продвижения горных работ. Однако указанными параметрами полезного ископаемого невозможно управлять, а только обосновывать технологию ведения работ, ее параметры и направление с целью получения наибольшей выгоды. При выдержанности мощностей вскрышных пород и полезного ископаемого повышение эффективности освоения за счет изменения параметров ведения горных работ (или направления развития) не принесет значительных результатов. Кроме того, необходимо отметить, что при сравнении базовых методик геометрического анализа [12] качество полезного ископаемого не учитывают при выборе направления развития горных работ. А сравнение и выбор вариантов производятся по соотношению объемов вскрышных и добычных работ. Хотя при достаточной выдержанности мощностей вскрышных пород и полезного ископаемого выбор направления отработки и обоснование параметров ведения горных работ с учетом изменчивости зольности позволит получать более высокий экономический эффект.

Поэтому для повышения эффективности необходимо рассмотреть возможность реализации продукции по более высоким ценам за счет повышения ее качества и однородности. Как правило, цены на уголь устанавливаются в зависимости от его калорийности, и чем она выше, тем выше цена реализации. Но и немаловажным фактором является *зольность угля*, за превышение которой договорами на поставку предусматриваются значительные штрафные санкции.

Анализ геологической информации по объекту исследования показал, что в более чем 90 % угольных проб определена зольность (более 1,5 тыс. определений зольности). А с учетом того, что калорийность и зольность имеют прямую зависимость, контроль и управление зольностью как одной из качественных характеристик позволит не только избежать штрафных санкций за поставку некачественного сырья, но и реализовывать продукцию по более высокой цене за счет более высокой калорийности.

Результаты исследований

Для определения уровня изменчивости для выбранных показателей проведены следующие действия:

- с использованием данных о мощности вскрышных пород по каждой скважине произведена их группировка (скважин) по интервалам мощности и построены диаграммы распределения для первоначальной оценки наличия изменчивости по исследуемым характеристикам;
- определен коэффициент вариации по формулам (1–3) для оценки уровня изменчивости (колебаний) оцениваемых параметров;
- произведена классификация выборки в соответствии с таблицей 1;
- сформулированы выводы на основании полученных данных.

Исследование изменчивости мощности вскрыши

Для исследования изменения мощности вскрыши приняты результаты геологоразведочного бурения, на основании которых построены соответствующие гистограммы и произведен дальнейший анализ.

На рисунке 1 представлена гистограмма распределения мощности вскрышных пород в границах исследуемой площади.

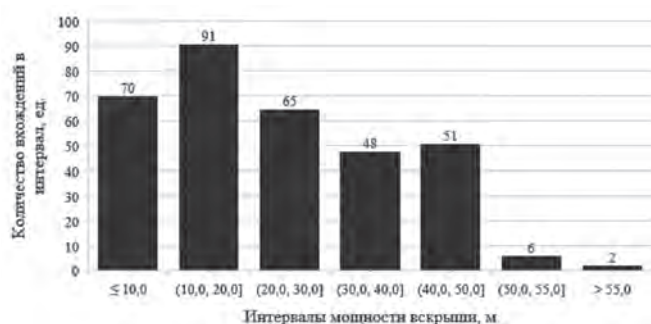


Рис. 1. Гистограмма распределения мощности вскрышных пород на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемой площади /

Fig. 1. Histogram of distribution of overburden rock thickness at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the study area

Для оценки изменчивости выборки были использованы

выражения (1–3). Классификация выборки по коэффициенту вариации приведена в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа изменчивости мощности вскрышных пород в границах исследуемой площади /
Results of the analysis of the variability of the overburden thickness within the boundaries of the study area

Интервал мощности вскрыши, м / Overburden thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение мощности вскрыши, м / Average value of overburden thickness, m	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<10	70	7	25	Достаточно разнородная
10–20	91	14,9	21	Достаточно разнородная
20–30	65	24,7	11	Достаточно однородная
30–40	48	35	8	Однородная
40–50	51	44,5	6	Однородная
>50	8	52,5	3,5	Однородная
Средневзвешенное по выборке			15	Достаточно однородная

Исследование изменчивости мощности пласта

По аналогии с анализом изменчивости мощности вскрышных пород проведено исследование изменчивости мощности угольного пласта. На рисунке 2 представлена гистограмма распределения мощности угольного пласта в границах исследуемого участка.

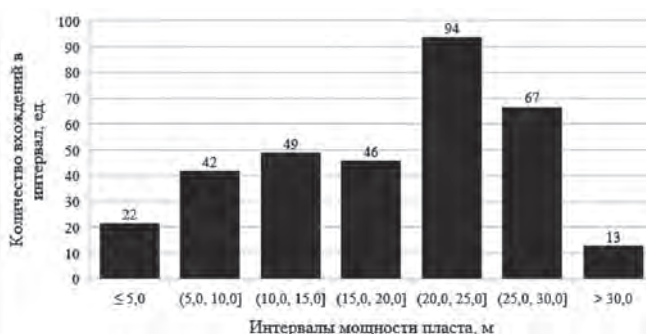


Рис. 2. Гистограмма распределения мощности угольного пласта на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемого участка /

Fig. 2. Histogram of coal seam thickness distribution at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the study area

Классификация выборки по коэффициенту вариации приведена в таблице 3.

Исследование изменчивости зольности

Используя известные формулы для определения степени изменчивости и на основании данных геологоразведочного бурения, была произведена оценка уровня изменчивости уровня зольности по интервалам мощности пласта.

На рисунке 3 представлена гистограмма распределения зольности в границах исследуемого пласта.

Таблица 3 / Table 3

Результаты анализа изменчивости мощности угольного пласта в границах исследуемого пласта /
Results of the analysis of the variability of the coal seam thickness within the boundaries of the studied seam

Интервал мощности пласта, м / Seam thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение мощности пласта, м / Average value of seam thickness, m	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<5	22	3,2	29	Достаточно разнородная
5–10	42	7,5	17	Достаточно однородная
10–15	49	12,7	11	Достаточно однородная
15–20	46	17,6	8	Однородная
20–25	94	23,1	6	Однородная
25–30	67	26,5	4	Однородная
30–35	13	31,3	4	Однородная
Средневзвешенное по выборке			9,4	Однородная

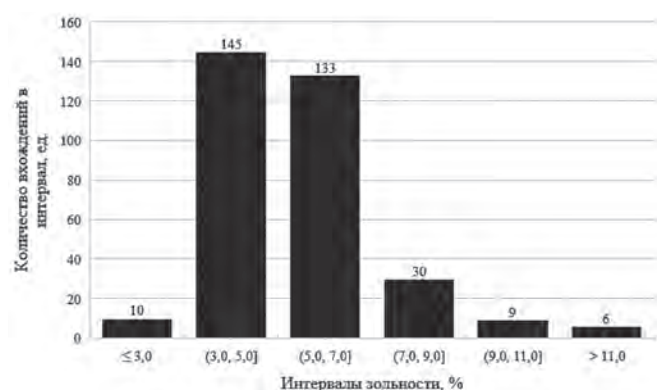


Рис. 3. Гистограмма распределения зольности на Большесырском месторождении бурого угля в границах исследуемого пласта /

Fig. 3. Ash content distribution histogram at the Bolshesyrskoye lignite coal deposit within the boundaries of the studied seam

Для увязки уровней зольности пласта с его мощностью классификация по коэффициенту вариации, приведенная в таблице 4, составлена с учетом разделения пласта на интервалы.

Приведенные результаты анализа демонстрируют высокую однородность исследуемой площади в части мощности вскрышных пород и угольного пласта, что является положительным фактором для разработки. При этом зольность по каждому исследуемому интервалу мощности пласта показывает высокую изменчивость, что осложняет процесс дальнейшей переработки продукции. В таких условиях возникает

необходимость реализации дополнительных мероприятий по усреднению угля для стабилизации потока продукции.

В результате детального анализа изменчивости зольности скважинам по части из них выявлена явная зависимость распределения зольности.

На рисунке 4 приведен наиболее наглядный пример найденной зависимости по выборке.

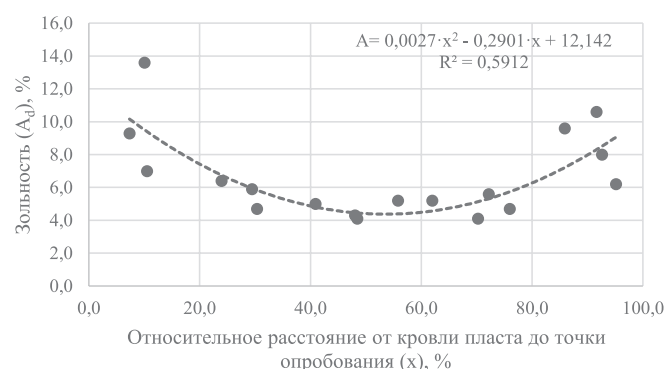


Рис. 4. Зависимость зольности от относительного расстояния от кровли / Fig. 4. Dependence of ash content on relative distance from the roof

Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что по мере увеличения относительного расстояния от кровли уменьшается и зольность пласта. Далее, на определенном расстоянии от кровли возникает зона «стабильности» зольности, после чего зольность снова увеличивается.

Принимая во внимание данную зависимость, можно

Таблица 4 / Table 4

Результаты анализа изменчивости зольности угля в границах исследуемого пласта /
Results of the analysis of ash content variability in coal within the boundaries of the studied seam

Интервал мощности пласта, м / Seam thickness interval, m	Количество скважин в интервале / Number of drillholes in the interval	Среднее значение зольности, % / Average ash content, %	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	Тип выборки / Sample type
<5	22	7,3	38	Разнородная
5–10	41	6,1	43	Разнородная
10–15	50	5,9	36	Разнородная
15–20	47	5,5	35	Разнородная
20–25	94	5,3	38	Разнородная
25–30	67	5,5	41	Разнородная
3–35	12	5,1	38	Разнородная
Средневзвешенное по выборке			38,5	Разнородная

предположить, что выделение зоны пласта с наиболее стабильным уровнем зольности позволит повысить уровень однородности добываемого продукта за счет наиболее точной информации о качестве угля в конкретной оцениваемой точке при выборе направления развития и параметров горных работ.

Заключение

1. Проведенные исследования месторождения в части изменчивости характеристик пласта и вскрышных пород позволили охарактеризовать исследуемый объект как месторождение с достаточно выдержанными мощностями полезной толщины и покрывающих пород, но с достаточно изменчивым уровнем качества.

2. Нестабильный поток продукции, поступающей из карьера, требует реализации дополнительных мероприятий, направленных на стабилизацию уровня качества, что влечет за собой временные, технические, а следовательно, и экономические затраты, которые в итоге влияют на конечную стоимость продукции. А принимая во внимание тот факт, что в некоторых случаях качество продукции может ухудшаться на пути к потребителю [13, 14], стабилизация качества в потоке из карьера (разреза) становится еще более приоритетной задачей.

3. Использование выявленной зависимости в части изме-

нения зольности позволит выделять зоны пласта с наиболее постоянным уровнем качества, а дальнейшее обоснование направления развития горных работ с учетом выделенных зон позволит поставлять продукцию на склады с более стабильным уровнем, тем самым снизив затраты на усреднение на складах.

4. При наличии полной информации о качественных характеристиках полезного ископаемого по всей площади и в зависимости от его мощности имеется возможность выбирать направление развития и параметров горных работ таким образом, чтобы на выходе из разреза однородность потока продукции была максимальной.

5. Для дальнейшего развития данного направления исследования рекомендуется:

- провести анализ блочной модели месторождения и выделить зоны по площади распространения и мощности с более стабильным уровнем качества;

- осуществить анализ результатов и рассмотреть различные варианты направлений отработки и дать им оценку в части возможного режима горных работ, выбрать направление развития;

- обосновать наиболее целесообразную высоту уступа для сохранения однородности потока продукции с учетом полученных зависимостей и результатов, при этом сохранив эффективность использования выемочного оборудования [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азев ВА, Попов ДВ. Обоснование технологических параметров разработки пластовых месторождений с невыдержанными характеристиками залегания и качества угля. *Уголь*. 2022; 2: 14-21. [Azey VA, Popov DV. Justification of technological parameters for the development of bedded deposits with uneven characteristics of coal occurrence and quality. *Coal*. 2022; 2: 14-21. (In Russ.).] DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
2. Субботин ЮВ, Овешников ЮМ, Самойленко и др. Управление качеством бурых углей Харанорского месторождения. *ГИАБ*. 2012; 4: 64-72. [Subbotin YuV, Oveshnikov YuM, Samoylenko AG, et al. Quality management of brown coals of the Kharanorskoye deposit. *GIAB*. 2012; 4: 64-72. (In Russ.).]
3. Ржевский ВВ. Технология и комплексная механизация открытых горных работ: Учебник. Изд. 2, перераб. и доп. Москва, 1975: 574. [Rzhevsky VV. Technology and complex mechanization of open-pit mining. Textbook. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, 1975: 574. (In Russ.).]
4. Якубовский ММ, Дребенштетт К. Управление качеством бурого угля на карьере при наличии нескольких потребителей с различными требованиями к сырью. *Записки Горного института*. 2014: 90-94. [Yakubovsky MM, Drebenstedt K. Quality management of brown coal in a quarry in the presence of several consumers with different requirements for raw materials. *Notes of the Mining Institute*. 2014: 90-94. (In Russ.).]
5. Эпштейн СА, Шинкин ВК. Показатели качества угля для разных направлений. *ГИАБ*. 2022; 4: 5-16. [Epshteyn SA, Shinkin VK. Coal quality indicators for different directions. *GIAB*. 2022; 4: 5-16. (In Russ.).] DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_5.
6. Швабенланд ЕЕ, Лаптева МИ. Принципы управления качеством минерального сырья при комбинированной разработке сложноструктурных месторождений. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021; 3: 326-335. [Shvabenland EE, Lapteva MI. Principles of quality management of mineral raw materials in the combined development of complex-structured deposits. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 3: 326-335. (In Russ.).]
7. Кантемиров ВД, Яковлев АМ, Титов РС. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 1: 63-73. [Kantemirov VD, Yakovlev AM, Titov RS. Application of geoinformation technologies of block modeling to improve methods for assessing the quality indicators of minerals. *News of higher educational institutions. Mining journal*. 2021; 1: 63-73. (In Russ.).] DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
8. Яковлев АМ. Аprobация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством полезного ископаемого. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 5-1: 248-257. [Yakovlev AM. Testing of algorithms for automated processing of geological databases in technological schemes for managing the quality of minerals. *Mining information and analytical bulletin*. 2021; 5-1: 248-257. (In Russ.).] DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_248.
9. Маниковский ПМ. Управление качеством углей по критерию их опасности с использованием цифровых моделей полезного ископаемого на Кутинском буроугольном месторождении. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023; 29 (2): 8-23. [Manikovskiy PM. Coal quality management based on their hazard criteria using digital models of minerals at the Kutinsky brown coal deposit. *Bulletin of the Transbaikal State University*. 2023; 29 (2): 8-23. (In Russ.).] DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
10. Кисляков ВЕ, Федотов АС, Снетков ДС, Шварцкопф АВ. Моделирование Большесырского буроугольного месторождения в горно-геологической информационной системе Micromine. *Успехи современного естествознания*. 2024; 11: 100-105. [Kislyakov VE, Fedotov AS, Snetkov DS, Schwarzkopf AV. Modeling of the Bolshesyrskoye brown coal deposit in the mining and geological information system Micromine. *Advances in modern natural science*. 2024; 11: 100-105 (In Russ.).] DOI: 10.17513/use.38339.

11. Полякова ВВ, Шаброва НВ. Основы теории статистики: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург, 2015: 148. [Polyakova VV, Shabrova NV. Fundamentals of the theory of statistics: textbook. allowance. 2nd ed., rev. and additional. Yekaterinburg, 2015: 148. (In Russ.)].
12. Трубецкой КН, Краснянский КЛ, Хронин ВВ. Проектирование карьеров: Учебник для вузов: В 2 томах. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 2001; I: 51. [Trubetskoy KN, Krasnyansky KL, Khronin VV. Design of quarries: Textbook. For universities: In 2 volumes. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 2001; I: 519. (In Russ.)].
13. Гаврилов ВЛ. Управление качеством угля в динамической системе «Георесурс технологическое воздействие потребитель». ГИАБ. 2009; 12: 56-61. [Gavrilov VL. Coal quality management in the dynamic system "Georesource – technological impact-consumer". GИAB. 2009; 12: 56-61 (In Russ.)].
14. Гаврилов ВЛ. Анализ изменения качества угля в технологической цепочке «Забой – потребитель». ГИАБ. 2013; 5: 156-162. [Gavrilov V.L. Analysis of coal quality changes in the process chain "Slaughter-house – consumer". GИAB. 2013; 5: 156-162 (In Russ.)].
15. Шестаков ВА, Шмаленюк АА, Белодедов АА. Метод обоснования минимальной мощности разрабатываемых пластов с учетом качества угля. ГИАБ. 2003; 2: 87-89. [Shestakov VA, Shmalenyuk AA, Belodedov AA. Method of justifying the minimum thickness of developed seams taking into account the quality of coal. GИAB. 2003; 2: 87-89. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Евгеньевич Кисляков –

доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Артём Сергеевич Федотов –

аспирант кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: ar.fedotow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Дмитрий Сергеевич Снетков – кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Андрей Валериевич Шварцкопф – аспирант кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства / Contribution:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи / The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.04.2025.

Поступила после рецензирования: 04.07.2025.

Принята к публикации: 11.07.2025.

Article info

Received: 16.04.2025.

Revised: 04.07.2025.

Accepted: 11.07.2025.

ABOUT THE AUTHORS

Viktor E. Kislyakov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Open-pit Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Artem S. Fedotov –

PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: ar.fedotow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Dmitry S. Snetkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Andrey V. Schwarzkopf – PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation