



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.012

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАЗЛИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЛЯ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Аннотация. Актуальность работы. Поддержка заданного уровня качества добываемой продукции – задача, которая занимает лидирующую позицию на любом производстве, в особенности при добыче рудных полезных ископаемых. Но требования к качеству угольной продукции не менее основательны, поэтому вопросы зависимости и взаимосвязи качественных характеристик угольных месторождений имеют актуальность. Учитывая неоспоримый факт того, что качество в недрах невозможно изменить, проектировщики, исследователи и технические специалисты на производстве вынуждены изыскивать наиболее эффективные методы прогнозирования качества при добыче и складировании полезного ископаемого и совершенствовать методы по стабилизации потока добываемой продукции. Большинство исследований предлагает методы управления качеством при добыче путем его усреднения или обогащения. Несмотря на высокую эффективность, такой процесс увеличивает время получения финальной продукции, а следовательно, и затраты и может быть осложнен высокой вариативностью качества продукции, поступающей из разреза. Поэтому стабильность потока играет ключевую роль в получении продукции заданного качества. **Цель работы.** Проанализировать месторождение на предмет зависимостей распределения качества угля для их дальнейшего использования в процессе управления качеством продукции. **Используемые методы.** В статье использован метод корреляционного анализа для обнаружения зависимостей распределения. **Новизна.** Результаты работы позволят разработать новый подход в обосновании высоты добычного уступа, с учетом не только параметров техники, но и особенностей распределения качества. **Результаты работы.** Настоящее исследование включает в себя обобщенные результаты анализа угольных проб и выявление зависимостей распределения качества в границах пласта. **Выводы.** Определенная зависимость дает возможность наиболее точно прогнозировать качество полезного ископаемого и тем самым позволит определить направление и параметры горных работ, при которых будет достигнута минимальная вариация уровня качества. **Практическая значимость.** Применение результатов работы на практике позволит стабилизировать уровень качества продукции, поставляемой из разреза, тем самым снизив затраты на операции по усреднению.

Ключевые слова: уголь, зольность, зависимость, качество, буроугольные месторождения

© Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В., 2025

Для цитирования

Исследование взаимосвязи различных показателей качества для угольных месторождений / Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 35-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF THE INTERCONNECTION BETWEEN VARIOUS QUALITY INDICATORS FOR COAL DEPOSITS

Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shwartskopf A.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Maintaining a given level of quality of the extracted products is a task that occupies a leading position in any production, especially in the extraction of ore minerals. But the requirements for the quality of coal products are no less fundamental, so the issues of dependence and interrelation of the quality characteristics of coal deposits are relevant. Given the indisputable fact that the quality in the subsoil cannot be changed, designers, researchers and technical specialists in production are forced to seek the most effective methods for predicting the quality during the extraction and storage of minerals and improve methods for stabilizing the flow of extracted products. Most studies suggest quality management methods during extraction by averaging or enrichment. Despite the high efficiency, such a process increases the time for obtaining the final product, and, consequently, costs and can be complicated by the high variability of the quality of the products coming from the open pit. Therefore, flow stability plays a key role in obtaining products of a given quality. **Objective.** Is to analyze the deposit for coal quality distribution dependencies for their further use in the product quality management process. **Methods used.** The article uses the correlation analysis method to detect distribution dependencies. **Originality.** The results of the work will allow developing a new approach to substantiating the height of the mining bench, taking into account not only the equipment parameters, but also the discovered dependence. **Results.** This study includes generalized results of coal sample analysis and identification of quality distribution dependencies within the seam boundaries. **Conclusions.** A certain dependence makes it possible to most accurately predict the quality of the mineral and thus will allow determining the direction and parameters of mining operations, in which the minimum variation in quality levels will be achieved. **Practical Relevance.** The application of the results of the work in practice will allow stabilizing the quality level of the products supplied from the open pit, thereby reducing the costs of averaging operations.

Keywords: coal, ash content, dependence, quality, lignite deposits

For citation

Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shwartskopf A.V. Investigation of the Interconnection Between Various Quality Indicators for Coal Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 35-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40>

Введение

Угли буроугольных месторождений широко используются в различных сферах жизнедеятельности. Согласно ГОСТ 25543-2013 бурые угли разделяют на три группы (1Б, 2Б, 3Б). Бурые угли могут быть использованы в различных сферах производства как в качестве основного продукта, так и в качестве «добавок». Как и любое другое полезное ископаемое, бурый уголь обладает своими характерными свойствами, которые изменяются в широких диапазонах.

Повлиять на уровень качества угля непосредственно в недрах невозможно, но существует возможность его прогнозировать и им управлять в процессе технологических переделов с применением усреднения, сортировки или обогащения [1–3]. Уровень качества угля напрямую зависит от применяемой технологии [4, 5], а конечная стоимость угля напрямую зависит от его качества, как на внутреннем, так и на международном рынке [6, 7]. В то же время усложнения технологии добычи угля, при которой не снижается качество, соответственно, ведут к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат,

которые увеличивают себестоимость добычи. Поэтому выявление зависимостей распределения качественных характеристик позволяет повысить уровень стабильности потока продукции и играет важную роль в исследовании месторождений. Обнаруженные зависимости позволяют точно спрогнозировать изменчивость качества при разработке месторождения и вовремя принять технологические и организационные меры для его стабилизации. Для этого необходимо исследовательским путем определить взаимозависимость основных качественных характеристик [8, 9], чтобы в дальнейшем прогнозировать его изменение.

Объект исследования – Большесырское бурогоугольное месторождение.

Предмет исследования – качественные характеристики полезного ископаемого рассматриваемого объекта и их взаимозависимость. Основное внимание в исследовании уделено зольности угля.

Описание и выбор оцениваемых показателей качества

При разведке месторождений и техническом анализе угольных проб определяют широкий спектр ха-

рактических как лабораторным, так и расчетным путем. Часть определяемых характеристик занимает свое место в описании уровня качества продукции, а другая часть применима при определении марок угля и его вторичных свойств.

В связи с тем, что основное направление использования угля — это сжигание на тепловых электрических станциях (ТЭС), далее приведено краткое описание качественных характеристик, по которым можно оценить или охарактеризовать уголь, который может быть использован на ТЭС.

Теплота сгорания ($Q_{\text{гн}}$, ккал/кг) — показатель, напрямую влияющий на производительность котлов. Низкий уровень теплоты сгорания снижает производительность станций и требует комплекс мероприятий по сжиганию. Следует отметить, что слишком высокая теплота сгорания также негативно влияет на экономичность, так как возрастает шлакование топок, а также происходит повышение экологической нагрузки за счет увеличения количества вредных выбросов.

Выход летучих веществ (V^{daf} , %) демонстрирует возможность воспламенения и устойчивого горения угля в топочной камере. Также уровень выхода летучих веществ влияет на взрывобезопасность угля при его размельчении.

Влажность угля (рабочая) (W_p , %) — один из главных показателей, характеризующих уголь. Уровень влажности угля влияет на сыпучесть продукта при разгрузке и перемещении по конвейерным лентам. При повышенном уровне влаги увеличивается нагрузка на сушильное оборудование [10] или происходит недостаточная просушка, что, в свою очередь, приводит к снижению производительности оборудования. Поэтому уровень влаги является одной из главных характеристик угля.

Зольность (A , %) представляет собой отношение массы несгораемого остатка (зола) к сожженной массе угля. Увеличение золы, как и увеличение влаги, наиболее нежелательны в связи с понижением теплотворной способности угля, трудностей использования.

Различают внутреннюю и внешнюю зольности. Внутренняя зольность образуется за счет включений, находящихся непосредственно в угле, а внешняя — за счет засорения угля пустыми породами в процессе добычи. Увеличение зольности приводит к увеличению занимаемых площадей под отходы золошлаков [11] и повышению экологической нагрузки, а также к увеличению платы за размещение отходов.

По опыту эксплуатации предприятий зольность — определяющий фактор в оценке качества угля. Анализ ТЭО кондиций по месторождениям каменного и бурого углей подтверждает данное суждение, так как основные параметры кондиций представлены такими характеристиками, как минимальная выемочная мощность и зольность, а такие характеристики, как теплота сгорания, влажность, выход летучих веществ, представляют как дополнительные характеристики и

не включают в перечень параметров кондиций, что подтверждает важность зольности в качественной оценке угля, поэтому в дальнейшем ходе исследований наибольшее внимание уделено анализу распределения зольности угля.

Порядок исследования

На первом этапе исследования произведен поиск и оценка влияния на зольность пласта таких характеристик, как влажность, выход летучих веществ, мощность пласта (рис. 1-3). Для исследования использованы данные результатов технического анализа угольных проб в процессе геологоразведки Больше-сырского буроугольного месторождения.

Ввиду того, что показатели качества изменяются в широких пределах, все данные были разделены на несколько характерных групп, по которым произведены дальнейшие исследования. Группы формировались по интервалам мощности пласта от <5 до > 35 м с шагом интервала 5 м. Результат распределения представлен на рис. 4.

По представленным диаграммам рассеяния сделан вывод о том, что наибольшее влияние на зольность оказывает мощность пласта, но рассмотрение всей совокупности данных не отражает достоверной зависимости. Далее произведено изучение зависимости зольности от мощности пласта по каждой скважине.

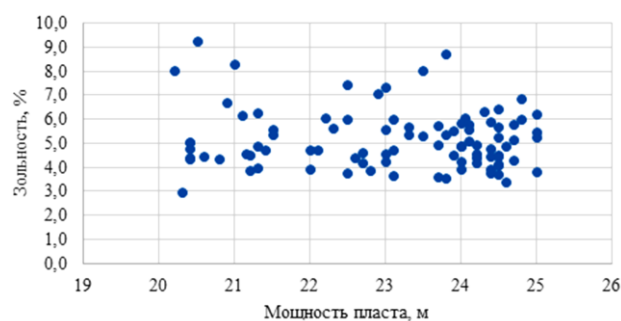


Рис. 1. Рассеяние зольности в зависимости от мощности пласта (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 1. Ash content dispersion depending on the seam thickness (seam thickness 20–25 m)

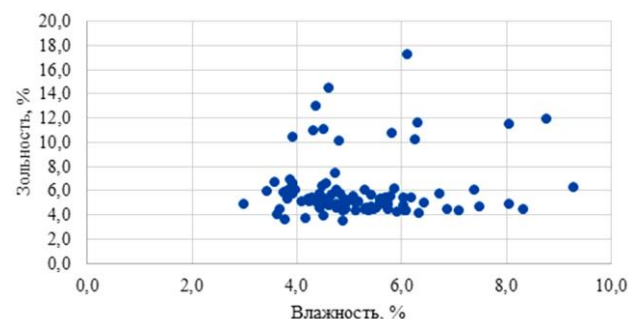


Рис. 2. Рассеяние зольности в зависимости от влажности угля (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 2. Ash content dispersion depending on coal moisture content (seam thickness 20–25 m)

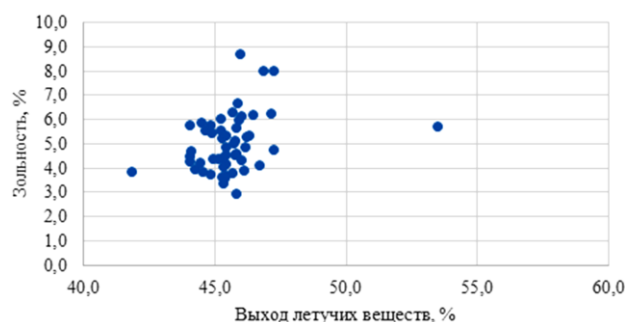


Рис. 3. Рассеяние зольности в зависимости от величины выхода летучих веществ (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 3. Ash content dispersion depending on the value of the volatile matter yield (seam thickness 20–25 m)

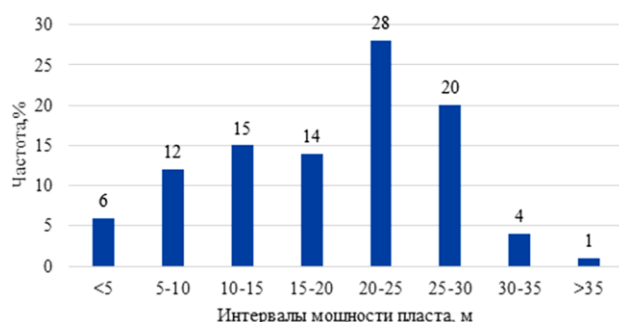


Рис. 4. Гистограмма распределения мощности пласта по исследуемым интервалам

Fig. 4. Histogram of the distribution of the reservoir thickness across the studied intervals

Для каждой группы интервалов по каждой скважине, входящей в интервал, произведено исследование зависимости зольности от расстояния от кровли до оцениваемой точки. Так как мощность исследуемого пласта изменяется в широком диапазоне, для каждой исследуемой точки было определено относительное расстояние от кровли пласта до исследуемой пробы по следующей формуле:

$$dh = \frac{h_i}{h_{max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где h_i – расстояние от кровли пласта до оцениваемой точки, м; h_{max} – максимальная мощность пласта в оцениваемой точке, м.

Переход к относительным значениям расстояния позволит корректно сравнивать полученные результаты для разных диапазонов мощности пласта. Интервалы с мощностью менее 5 м в исследование не включены в связи с малым количеством проб на одно пластопересечение.

Для наглядного представления на рис. 5 изображен характерный график найденной зависимости зольности от относительного расстояния от кровли по

случайной выборке скважин. По представленному графику можно отметить тенденцию уменьшения зольности при отдалении от кровли пласта и последующем увеличении зольности при приближении к почве.



Рис. 5. График изменчивости зольности угля от относительного расстояния от кровли пласта

Fig. 5. Graph of variability of coal ash content from relative distance from the seam roof

Скважины по каждому интервалу мощности проанализированы на предмет наличия зависимости распределения зольности. Результаты на основании корреляционного анализа по интервалам пласта приведены в таблице.

Таблица. Результаты анализа изменчивости зольности по интервалам

Table. Results of the analysis of ash content variability by intervals

Интервал исследования	Количество исследуемых скважин	Коэффициент корреляции		Средний R^2
		минимальный	максимальный	
<5	–	–	–	–
5-10	41	0,14	1,00	0,86
10-15	50	0,05	1,00	0,82
15-20	47	0,07	1,00	0,71
20-25	94	0,00	0,99	0,63
25-30	67	0,00	0,94	0,60
30-35	12	0,01	0,98	0,41
>35	1	0,54	0,54	0,54

На основании таблицы можно сделать вывод о том, что на каждом интервале мощности пласта подтверждается искомая зависимость изменения зольности, пример которой приведен на рис. 5 по случайной выборке скважин. По результатам анализа определен процент скважин относительно их общего количества, в которых подтверждается искомая зависимость распределения зольности. Распределение представлено на рис. 6.

Разделение скважин по коэффициенту корреляции позволит выделять зоны с различным уровнем прогноза значений зольности, что, в свою очередь, дает возможность учесть распределение зольности при определении направления развития горных работ.

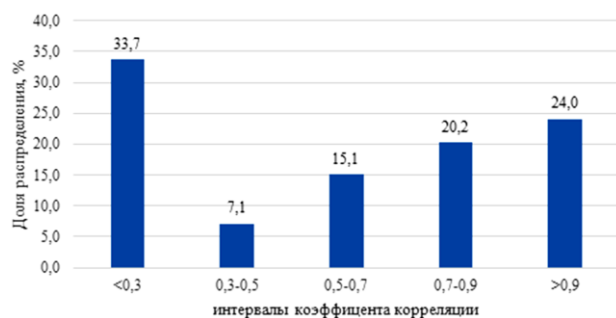


Рис. 6. Гистограмма распределения коэффициента корреляции относительно общего количества скважин

Fig. 6. Histogram of the distribution of the correlation coefficient relative to the total number of drillholes

Результаты анализа блочной модели Большесырского месторождения подтверждают найденную зависимость. Для подтверждения были проанализированы случайные блоки модели между разведочными скважинами, на которых также прослежена зависимость зольности от относительного расстояния от кровли.

В процессе исследований также были рассмотрены месторождения каменного угля (Никольское и Бейское). В поисках зависимости, представленной на рис. 5, сделан вывод о том что, отмеченная тенденция выявлена по ряду скважин, но учитывая то, что пласты каменного угля имеют большое количество углистых и породных включений, искомая зависимость по многим скважинам не подтверждена. Кроме того, мощность проанализированных пластов изменяется в широких пределах и при мощности пласта 10 м и менее количество опробований на одно пластопересечение не позволяет корректно оценить изменчивость зольности, поэтому приведенный подход к исследованию наиболее целесообразно применять на месторождениях с выдержанной мощностью пласта от 10-15 м и более. Подтверждения искомой зависимости на других буровугольных месторождениях приведено в работе [12].

Выводы

Результаты поиска зависимостей распределения качественных характеристик демонстрируют явную изменчивость зольности пласта в зависимости от расстояния от кровли до оцениваемой точки. Выявленная зависимость подтверждает теорию о том, что зольность пласта может быть спрогнозирована на основании выявленных закономерностей распределения, а учет найденной закономерности позволит наиболее рационально выбирать направление развития горных работ и параметры выемочных слоев (высота уступа/подступа) с целью достижения наиболее стабильного и однородного потока угля, поступающего из разреза.

Практическая значимость заключается в том, что выявленные закономерности позволяют учитывать из-

менчивость зольности по высоте пласта и выбирать направления развития горных работ и высоту добычного уступа таким образом, чтобы получать наиболее стабильный поток (по качеству) продукции, что, в свою очередь, снизит временные и финансовые затраты на усреднение, а следовательно, повысит эффективность освоения месторождения. Наиболее однородное по качеству сырье, поставляемое потребителю, которым в основном являются ТЭС, повысит их производительность и снизит возможные внеплановые технологические простои, связанные со шлакованием и прочими технологическими издержками.

Представленный подход исследования наиболее допустим к применению при мощности пласта 10 м и более, так как при меньшей мощности пласта количество проб на одно пластопересечение не позволяет корректно оценить изменчивость зольности.

Список источников

1. Красильников А.Е. Тенденции формирования стабильного качества угля при открытой добыче // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. №1. С. 27-31.
2. Усреднение качества бурого угля на Харанорском буровугольном месторождении / Овешников Ю.М., Субботин Ю.В., Авдеев П.Б., Самойленко А.Г. // ГИАБ. 2016. №4. С. 326-337.
3. Маниковский П. М. Управление безопасным качеством углей с использованием цифровых моделей полезного ископаемого на Кутинском буровугольном месторождении // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 8–23. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
4. Управление качеством бурых углей Харанорского месторождения / Субботин Ю.В., Овешников Ю.М., Самойленко А.Г., Циношкин Г.М. // ГИАБ. 2012. №4. С. 64-72.
5. Азев В.А., Попов Д.В. Обоснование технологических параметров разработки пластовых месторождений с невыдержанными характеристиками залегания и качества угля // Уголь. 2022. № 2. С. 14-21. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
6. Эпштейн С. А., Шинкин В. К. Показатели качества угля для разных направлений // ГИАБ. 2022. №4. С.5-16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_5.
7. Швабенланд Е.Е., Лаптева М.И. Принципы управления качеством минерального сырья при комбинированной разработке сложноструктурных месторождений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. №3. С. 326-335.
8. Waterman Sulistyana Bargawa, Harry H. Syahputra. Coal quality study using multivariate geostatistics. AIP Conf. Proc. 23 November 2021; 2363 (1): 030012. <https://doi.org/10.1063/5.0061103>
9. Andrew P. Richards, Denver Haycock, Jacob Frandsen, Thomas H. Fletcher. A review of coal heating value correlations with application to coal char, tar, and other fuels, Fuel. 2021, vol. 283, 118942. ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118942>.
10. Козлов В.А. Влияние химического состава золы угля на эксплуатационные параметры топок // ГИАБ. 2012. №10. С.205-211.

11. Хакимуллин Б.Р., Гумеров И.Р., Зайнуллин Р.Р. Экологические проблемы современных тепловых электростанций // Теория и практика современной науки. 2017. №3 (21). С.763-766.
12. Снетков Д.С., Косолапов А.И. Оценка возможности управления качеством угля на буроголовых месторождениях края // ГИАБ. 2015. №S1-2. С.15-23.

References

1. Krasilnikov A.E. Developments of stable coal quality formation during open-pit mining. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of Zabaikalsky State University], 2013;(1):27-31. (In Russ.)
2. Oveshnikov Yu.M., Subbotin Yu.V., Avdeev P.B., Samoylenko A.G. Averaging of brown coal quality at the Kharanorskoye brown coal deposit. *GIAB* [MIAB], 2016;(4):326-337. (In Russ.)
3. Manikovsky P. M. Safe coal quality management using digital models of the mineral in the Kutinskoye brown coal deposit. *Vestnik Zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikalian State University], 2023;29(2):8-23. (In Russ.) DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
4. Subbotin Yu.V., Oveshnikov Yu.M., Samoylenko A.G., Tsinoshin G.M. Quality management of brown coals of the Kharanorskoye deposit. *GIAB* [MIAB], 2012;(4):64-72. (In Russ.)
5. Azev V.A., Popov D.V. Justification of technological parameters for the development of bedded deposits with uneven high-quality occurrences and coal quality. *Ugol* [Coal], 2022;(2):14-21. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
6. Epshteyn S.A., Shinkin V.K. Coal quality indicators for different directions. *GIAB* [MIAB], 2022;(4):5-16. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_5.
7. Shvabenland E.E., Lapteva M.I. Principles of mineral raw material quality management in the combined development of complex structural deposits. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth Sciences], 2021;(3):326-335. (In Russ.)
8. Bhargava W.S., Syahputra H.H. Coal quality study using multivariate geostatistics. AIP Conference. Textbook. 2021;2363(1): 030012. <https://doi.org/10.1063/5.0061103>.
9. Andrew P. Richards, Denver Haycock, Jacob Frandsen, Thomas H. Fletcher. A review of coal heating value correlations with application to coal char, tar, and other fuels. *Fuel*. 2021;283:118942. ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118942>.
10. Kozlov V.A. Analysis of the chemical composition of ash coals on the economic parameters of furnaces. *GIAB* [MIAB], 2012;(10):205-2011. (In Russ.)
11. Khakimullin B.R., Gumerov I.R., Zainullin R.R. Environmental problems of modern thermal power plants. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science], 2017;(3(21)):763-766. (In Russ.)
12. Snetkov D.S., Kosolapov A.I. Assessment of the possibilities of managing American coals at brown coal deposits of the region. *GIAB* [MIAB], 2015;(C1-2):15-23. (In Russ.)

Поступила 29.11.2024; принята к публикации 06.01.2025; опубликована 30.06.2025
Submitted 29/11/2024; revised 06/01/2025; published 30/06/2025

Кисляков Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: vkislyakov@sfu-kras.ru

Федотов Артем Сергеевич – аспирант кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956

Снетков Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

Шварцкопф Андрей Валериевич – аспирант кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

Viktor E. Kislyakov – DrSc (Eng.), Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: vkislyakov@sfu-kras.ru

Artem S. Fedotov – Postgraduate Student of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956.

Dmitry S. Snetkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

Andrey V. Schwarzkopf – Postgraduate Student of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ar.fedotow@yandex.ru.