

О ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПЕКАЕМОСТИ КОКСУЮЩЕГОСЯ УГЛЯ

Владимир Леонидович Гаврилов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: gvlugorsk@mail.ru

Евгений Александрович Хоютанов

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru

Рассмотрен рост сложности строения обрабатываемых месторождений коксующегося угля и изменчивости его качества в запасах. Отмечено, что добывающие предприятия в таких условиях вынуждены уделять повышенное внимание вопросам управления потребительскими свойствами угля для достижения требуемого рынком уровня качества. Показано, что цифровизация георесурса и геотехнологий освоения месторождений способствует получению более полной и точной картины производственно-сбытовых процессов, росту эффективности работы при разведке, добыче, обогащении и потреблении угля. Обозначены роль и место моделирования показателей спекаемости угля в пластах и построения карт качества в комплексных системах управления добывающих компаний Южной Якутии. Определена целесообразность применения результатов 3D моделирования, уточненной оценки запасов с учётом их качества и условий залегания для настройки работы предприятий под различные конкурентоспособные сценарии освоения сложных по строению месторождений.

Ключевые слова: коксующийся уголь, спекаемость, моделирование, карты качества, геотехнология, управление

ON GEOTECHNOLOGICAL MODELING OF COKING COAL SINTERABILITY INDICES

Vladimir L. Gavrilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: gvlugors@mail.ru

Evgenii A. Khoiutanov

Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Lenina av., Yakutsk, 677980, Russia, Ph. D., Researcher, e-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru

The increase in the complexity of the structure of mined coking coal deposits and the variability of its quality in reserves is considered. It was noted that under such conditions, mining enterprises had to pay more attention to the management of coal consumer properties in order to achieve the quality level required by the market. It has been shown that digitalization of georesource and geotechnologies in the development of deposits contributes to obtaining a more complete and accurate view of production and marketing processes, increasing the efficiency of work in the exploration, production, enrichment and consumption of coal. The role and place of modeling of coal sinterability indices in seams and quality mapping in complex management systems of mining companies of South Yakutia are outlined. The feasibility of applying the results of 3D modeling, enhanced assessment of reserves taking into account their quality and geological conditions to customize the work of enterprises for various competitive stages of development of complex deposits.

Keywords: coking coal, sinterability, modeling, quality maps, geotechnology, management

Введение

В развитии угольной отрасли страны обозначился устойчивый тренд на увеличение добычи не только в наиболее развитом Кузбассе, но и районах пионерного освоения со сложными горно-геологическими условиями в Амурской и Сахалинской областях, Якутии, Тыве, Хакасии, Забайкальском и Хабаровском краях [1, 2]. В этих регионах интерес недропользователей направлен в основном на освоение месторождений ценных марок угля, в первую очередь, коксующегося [2, 3]. Ужесточение конкуренции на внешнем и внутреннем рынке ведёт к необходимости устранения противоречий между высокой изменчивостью потребительских свойств твёрдого топлива в запасах и жёсткими запросами покупателей к качеству готовой продукции. Такой компромисс в цепочках поставок угля достигается путём: рационального управления качеством, базирующегося на точной и достоверной оценке природного потенциала георесурса; максимально возможном уровне его использования посредством реализации комплекса технологических и организационно-экономических мер [4-6].

Для коксующихся углей, наряду с зольностью, выходом летучих веществ, влажностью, содержанием вредных примесей, наиболее значимыми являются показатели спекаемости и коксуемости, характеризующие ценность угля и его пригодность к получению качественного и прочного кокса. В мире, как показывает анализ, используется ряд показателей для оценки с различных позиций возможностей угля к переходу через пластическое состояние в кокс, который бы по своим характеристикам соответствовал требованиям металлургов и коксохимиков. При этом прямые корреляции между этими показателями могут отсутствовать или быть статистически недостаточно значимыми [4, 7-8].

В нашей стране для оценки спекаемости, характеризующей способность угля преобразовываться при нагреве без доступа кислорода в кокс, по исторически сложившейся традиции широко применяют показатель «толщина пластического слоя», который присутствует в основных классификациях коксующегося угля и учитывается при подсчете запасов и ресурсов. Из-за требований реальных или потенциальных покупателей для дополнительной оценки свойств угля выполняется менее масштабная оценка и по другим показателям. Для Нерюнгринского, Эльгинского, Чульмаканского и Денисовского месторождений в Южной Якутии, на примере которых проводятся исследования, это индекс свободного вспучивания и степень окисленности угля. Совместное использование обозначенных показателей для оценки уровня соответствия угля аналогам-конкурентам повышает уровень обоснованности принимаемых решений в рамках комплексного управления качеством добываемого и поставляемого на экспорт минерального сырья.

Из сказанного вытекает актуальность проведения работы по геотехнологическому моделированию и картированию показателей спекаемости коксующегося угля в пластах сложных по строению месторождений для повышения эффективности функционирования комплексных систем управления качеством добываемого угля.

Методы и материалы

При выполнении работы использовались методы системного анализа, синтеза решений и обобщения, математической статистики и геостатистики. Компьютерное и геотехнологическое моделирование месторождений и их запасов проводилось с применением различных инструментов, входящих в арсенал в горно-геологических информационных систем (ГГИС) Mineframe [9] и Micromine.

Информационной базой для выполнения работ по картированию запасов коксующегося угля, включая показатели спекаемости, явились первичные и синтезированные на этой основе опубликованные и фондовые материалы многостадийной геологической разведки месторождений, данные опробования качества угля в технологических потоках при ведении добычных работ, его внутрикарьерной подготовке и обогащении. Для уточнения получаемых результатов при необходимости использованы карты-прототипы «Южякутгеологии», ИГД СО РАН [10, 11], ИГД УрО РАН [12], других организаций, а также различные публикации, например, [13].

Результаты

Комплексное управление качеством угля и менеджмент качества предприятий при разведке и разработке месторождений предусматривает достижение ряда целевых показателей, определяемых на основе требований рынка, учёта природных горно-геологических особенностей минерального сырья и характера его качественно-количественной трансформации при выемке в забое, углеподготовке, логистике и первичной переработке [4, 5, 14]. Их базисом является промышленный инжиниринг — вид деятельности, связанной с созданием, улучшением, внедрением и мониторингом производственных систем, позволяющих наилучшим образом объединять человеческие и материальные ресурсы.

В компании “Tata Steel” (Индия), одной из крупнейших в мире, при управлении качеством угля применяется ступенчатый подход, включающий изучение сырья в недрах, создание баз данных, каркасное и блочное моделирование месторождений, перспективное планирование и оперативное инженерное обеспечение добычи с постоянным мониторингом всех операций и процессов [15].

При исследовании месторождений со сложными геологическими условиями залегания и высокой изменчивостью показателей качества и геометрии пластов используются различные методы геостатистики [16, 17 и др.]. Их применение, дополняемое возможностями, вытекающими из предварительной подготовки угля к обогащению в карьерном пространстве [18], использованием понятия “углеминеральная однородность” [19], перспективами автоматизации и роботизации различных процессов открытых горных работ [20] в условиях нестабильности, неопределённости, сложности и неоднозначности внешней среды [21] позволяют организовать планирование горных работ на более высоком уровне.

В пределах литологического разреза месторождения или его участка в смежных пластах могут находиться разные марки и сорта угля, не говоря уже о разных

залежах одного и того же угленосного района. Дополнительное влияние оказывает наличие зон с окисленным или частично окисленным углем, приуроченных к выходам пластов под четвертичные отложения и к тектоническим нарушениям. Окисленность рассматриваемого полезного ископаемого, формируемая в результате длительного воздействия на него кислорода воздуха и воды, снижает в той или иной степени ценность углей с переходом их в разряд энергетических. При этом порядок оконтуривания и дифференциации запасов в целях их рационального ресурсосберегающего освоения усложняется, что вносит дополнительные возмущающие воздействия в процесс управления качеством добываемого и поставляемого на конкурентные рынки угля.

Последовательность действий при геотехнологическом моделировании показателей спекаемости, даже с учётом специфики их оценки, во многом схожа с моделированием других показателей качества, например, зольности [18, 22] или обогатимости [5, 10]. Она включает следующие основные этапы: анализ и использование открытой и фондовой информации об исследованиях спекаемости и коксуемости угля; формирование баз данных пластов и месторождений с максимальным учётом первичной геолого-маркшейдерской информации; статистическая и геостатистическая оценка качества угля в запасах и технологических потоках; построение различными методами цифровых моделей пластов месторождений с помощью горно-геологических информационных систем; планирование добычных работ в режиме управления качеством.

По Эльгинскому месторождению, одному из основных объектов исследований, с учётом наличия зон окисления рассчитаны основные статистические параметры распределения толщины пластического слоя (табл. 1) в запасах четырёх самых мощных пластов. С разной степенью детализации построен набор модифицированных карт в 2D (рисунок) и 3D вариантах, которые характеризуют изменчивость толщины пластического слоя в запасах по различным векторам пространства.

Таблица 1

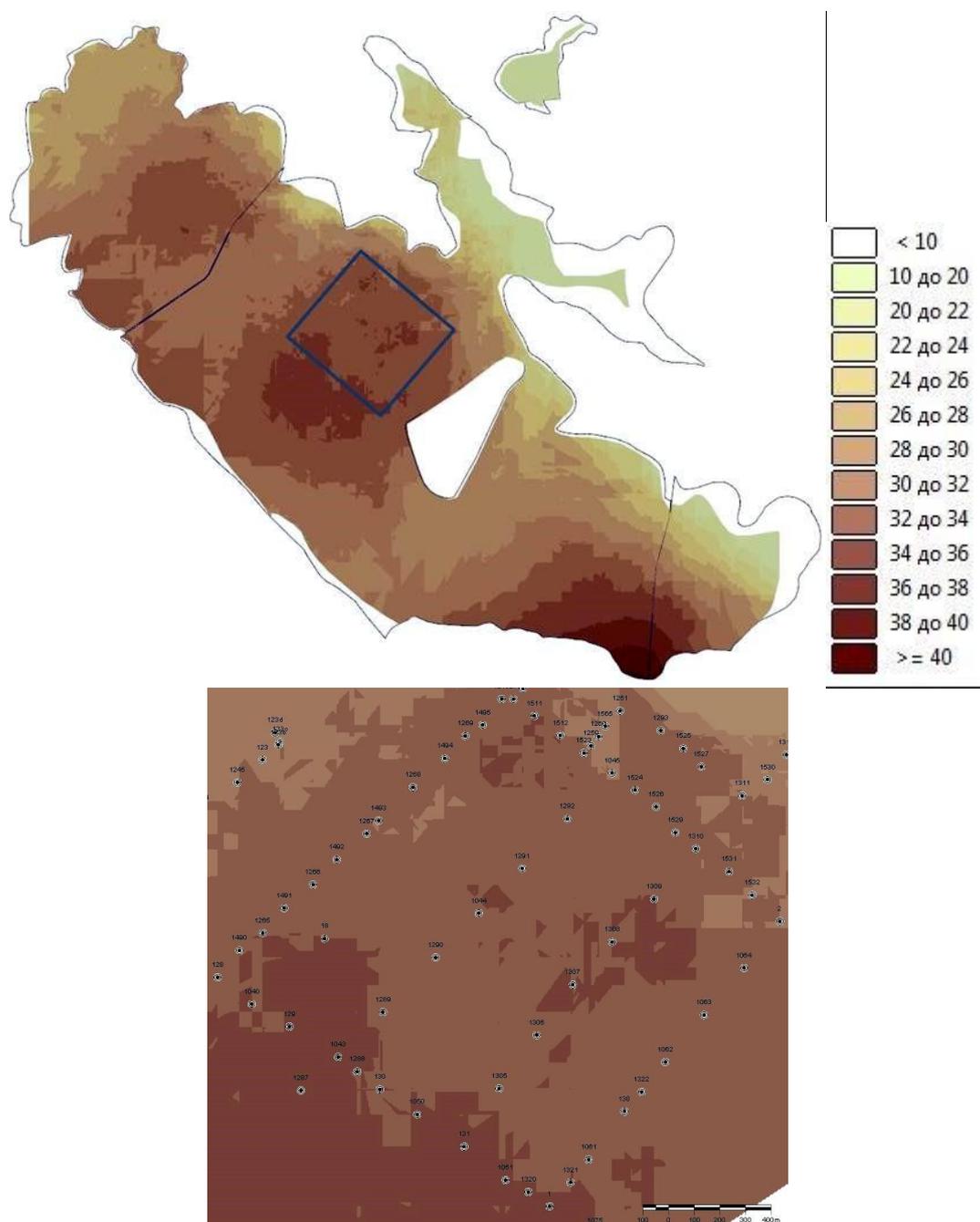
Статистические характеристики толщины пластического слоя по основным пластам Эльгинского месторождения

Показатель/пласт	У5	У4	Н16	Н15
Количество значений по скважинам	310	339	404	486
Среднее	24,96	24,05	30,95	35,27
Стандартное отклонение	7,05	6,74	8,59	6,21
Коэффициент вариации	28,24	28,05	27,75	17,62
Эксцесс	0,82	0,90	2,54	3,45
Асимметричность	-0,93	-0,83	-1,62	-1,55

Обсуждение

В техническом проекте (2014 г.) в границах отработки Северо-Западного участка Эльгинского месторождения разрезом I очереди представлены данные о распределении балансовых запасов по направлению использования: угли с

толщиной пластического слоя до 14 мм отнесены к энергетическим; угли с толщиной пластического слоя от 14 до 20 мм отнесены к пригодным для коксования; угли с толщиной пластического слоя более 20 мм отнесены к коксующимся углям. В пластах выделены следующие марки угля 2ГЖОК, 2ЖОК, 2ГЖ, 2Ж.



Карты спекаемости коксующегося угля по пласту N16 Эльгинского месторождения (северо-западная часть)

В структуре балансовых запасов угля при варианте со схемой валовой отработки с присечкой вмещающих пород в кровле (для низкочольных пластов) и зачисткой почвы угольных пластов на долю окисленных углей приходится 13,0 %,

частично окисленных 21, 0%. В четырех основных пластах эти значения могут достигать 17,9 % и 42,8 % (табл. 2).

Таблица 2

Балансовые запасы угля в границах отработки Северо-Западного участка Эльгинского месторождения разрезом I очереди

Пласт и марка угля	Балансовые запасы			
	По сумме чистых угольных па- чек		С учётом 100 % засорения по- родными прослоями	
	млн. т	%	млн. т	%
Всего по разрезу	364,2	100,0	412,9	100,0
в т.ч., Y = 0–13	47,3	13,0	55,3	13,4
Y = 14–20	76,4	21,0	88,3	21,4
Y ≥ 21	240,5	66,0	269,3	65,2
Пласт Н15, всего	48	100,0	59,4	100,0
в т.ч., Y = 0–13	0	-	0,1	0,2
Y = 14–20	2,5	5,2	3,1	5,2
Y ≥ 21	45,5	94,8	56,2	94,6
Пласт Н16, всего	112,5	100,0	119,1	100,0
в т.ч., Y = 0–13	4,8	4,3	5,1	4,3
Y = 14–20	6,9	6,1	7,3	6,1
Y ≥ 21	100,8	89,6	106,7	89,6
Пласт У4, всего	83,6	100,0	95,4	100,0
в т.ч., Y = 0–13	15	17,9	17,2	18,0
Y = 14–20	35,8	42,8	41,0	43,0
Y ≥ 21	32,8	39,2	37,2	39,0
Пласт У5, всего	51	100,0	58,3	100,0
в т.ч., Y = 0–13	7,4	14,5	8,6	14,8
Y = 14–20	15,4	30,2	17,9	30,7
Y ≥ 21	28,2	55,3	31,8	54,5

Многолетняя практика работы Нерюнгринского разреза, расположенного также в Южно-Якутском бассейне, показывает, что в процессе эксплуатационной доразведки и опережающего опробования структура запасов может измениться, к сожалению, в сторону ухудшения ожидаемых параметров потребительских свойств твёрдого топлива с одновременным усложнением на картах качества границ окисленной, переходной зон и области неокисленных, самых ценных марок углей.

Следует учесть также определённую ограниченность и сложность квалиметрической оценки запасов угля в пластах и применения имеющихся в арсенале ГГИС методов построения моделей спекаемости, целесообразность апробации нелинейных методов геостатистики для снижения уровня различных допущений и ограничений при моделировании неаддитивных показателей качества, к которым можно отнести и спекаемость.

Кроме того, говорить о достаточности картирования спекаемости запасов и последующего управления их извлечением только по толщине пластического слоя не вполне корректно. Технологическую ценность (коксуемость) угля или угольной смеси можно оценить с достаточной степенью точности по совокупности значений пяти показателей свойств – выходу летучих веществ V^d ; толщине пластического слоя Y ; отражательной способности витринита $R_{o,r}$; содержанию самого витринита Vt ; индексу свободного вспучивания SI [23]. Дополнить этот перечень может и химический состав золы углей, влияющий на технологические свойства кокса [24].

Решение задачи совместного картирования этих показателей, измеряемых в разных шкалах, дополняемое влиянием процесса окисления угля в недрах требует альтернативных решений с использованием, видимо, других методов моделирования и интерполирования. Также целесообразна разработка специальных процедур совмещения на картах графических представлений о показателях качества в запасах по различным пластам месторождения и оценки их достоверности.

Заключение

Дополнительное изучение георесурса с позиций оценки его спекаемости на примере толщины пластического слоя угля показывает, что выявляемые резервы совершенствования процесса управления потребительскими свойствами коксующегося угля позволяют повысить эффективность использования заложенного природой потенциала сложных по строению и неоднородных по качеству запасов месторождений.

В основе новых технологических и управленческих решений рационального освоения недр должны лежать не утвержденные по практически постоянным для недропользователя кондициям объёмы с унифицированным качеством угля, а реальные для текущего уровня планирования геологические запасы во всем их природном разнообразии.

Цифровизация георесурса и геотехнологий освоения месторождений позволяет формировать более полную, точную и достоверную картину производственно-сбытовых процессов, способствующую росту эффективности работы угледобывающих компаний при различных конкурентоспособных сценариях освоения сложных по строению месторождений коксующегося угля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р). – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 17.04.2021).

2. Новак А. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика – 2020. – № 8. – С. 6–13.

3. Национальная программа социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 24.09.2020 г. № 2464-р). – Режим доступа: <https://minvr.gov.ru/upload/iblock/fdc/nats-programma.pdf> (дата обращения: 17.04.2021).

4. Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / Батугин С.А. и др. – Новосибирск: Гео. – 2013. – 307 с.
5. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений Сибири. – Новосибирск: СО РАН; Наука, 2019. – 264 с.
6. Гаврилов В.Л. Фрейдина Е.В. О дифференциации и оценке потенциала угольных месторождений при их освоении // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2020, т. 7, № 1, С. 35-42.
7. Ткач С.М., Гаврилов В.Л. О закономерностях развития угольной промышленности // *Проблемы недропользования.* – 2019. – № 3. – С. 49-61.
8. Томаш А.А., Тарасов В.П., Ковальчик Р.В. и др. Влияние реакционной способности и «горячей» прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях ОАО «МК «Азовсталь» // *Вісник Приазовського державного технічного університету.* – 2007. – № 17. – С. 9-13.
9. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // *Горный журнал.* – 2019. – № 6. – С. 51-55.
10. Freidina E.V. Botvinnik A.A., Dvornikova A.N. Method and Estimation of Efficient Differentiation of Coal Reserves Based on Washability // *Journal of Mining Science.* — 2016. — № 4. — P. 712–724.
11. Goncharova N.V. Structuring of Complex Coal Deposits with Respect to Quality // *Journal of Mining Science.* – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 1220-1225.
12. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // *Проблемы недропользования.* –2016. – № 4. – С. 170-176.
13. Угольная база России. Т. V. Кн. 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, Сахалин, Камчатка). — М.: ЗАО «Геоинформмарк». –1999. – 639 с.
14. Yingde L. and Yanzhong W. Study on whole process quality control in coal production based on industry engineering, Proc. of 2008 Int. Conf. of Logistics Eng. and Supply Chain, 2008. — P. 886–890.
15. Srivastava R. R., Mohan S. R., and Verma S. Quality management of iron ore and coal by raw material division of Tata steel. Режим доступа: http://www.eoq.org/fileadmin/user_upload/Documents/Congress_proceedings/Budapest_June_2011/Proceedings/3_7_srivastava_s.pdf.
16. Webber T., Leite Costa J. F., and Salvadoretti P. Using borehole geophysical data as soft information in indicator kriging for coal quality estimation, *Int. J. of Coal geology*, 2013, Vol. 112. — P. 67–75.
17. Oliver M. A. and Webster R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging, *Catena*, 2014, Vol. 113. — P. 56–69.
18. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // *Вестник Забайкальского государственного университета.* – 2016. –Т. 22. – № 10. – С. 20-29.
19. Секисов Г. В., Якимов А. А., Чебан А. Ю. Технологическая углеминеральная однородность // *Вестн. ЗабГУ.* — 2017. — Т. 23. — № 9. — С. 32–44.
20. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // *Горная промышленность.* – 2020. – № 1. – С. 8–11.
21. Гаврилов В. Л., Ткач С. М. О цифровых технологиях горных предприятий в условиях нестабильности, неопределённости, сложности и неоднозначности // *ГИАБ.* – 2019. – № 11 (37). – С. 112–121.

22. Khoiutanov E. A., Gavrilov V. L Procedure for Estimating Natural and Technological Components in Ash Content of Produced Coal // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54, – Is. 5. – PP. 782–792. DOI 10.1134/S1062739118054891.

23. Киселев Б.П., Стахеев С.Г. Угольное сырье и кокс. О предпосылках выпуска стабильного по свойствам кокса // Кокс и химия. – 2011. – № 10. – С. 2-7.

24. Козлов В.А. Влияние химического состава золы углей на технологические свойства кокса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 108-113.

© В. Л. Гаврилов, Е. А. Хоютанов, 2021