

УДК 622.271.3; 622.7.017

**МЕТОД И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ
ЗАПАСОВ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ ПО СВОЙСТВАМ ОБОГАТИМОСТИ**

Е. В. Фрейдина^{1,2}, А. А. Ботвинник¹, А. Н. Дворникова¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия, E-mail: albyna@mysd.ru*

²*Новосибирский государственный университет экономики и управления,
ул. Каменская, 52, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены геолого-технологические факторы, открывающие возможность разделения углей месторождений Южной Якутии по свойству обогатимости. Алгоритмизирован процесс обработки результатов фракционного анализа и обоснованы критерии дифференциации запасов углей. Представлены модели оптимизации управления выходом и качеством концентрата. Предложена матрица состава товарных продуктов на основе требований рынка.

Дифференциация запасов, модель фракционного состава, категория обогатимости, концентрат, управление качеством товарной продукции

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На стадии проектирования освоения угольных месторождений обогатимость ископаемых углей представляется, как правило, одной категорией по всем промышленным запасам. В соответствии с ГОСТ 10100-84 [1] 80 % запасов углей Нерюнгринского месторождения отнесены к категории очень трудной обогатимости. Приведенную оценку обогатимости углей следует рассматривать как прогноз в связи с тем, что к моменту разработки проекта на освоение месторождения результаты опробования углей получены по ограниченному количеству разведочных скважин. Недостаточность геологической информации о свойстве обогатимости в большой мере ощущается при разработке календарных планов ведения добычных работ в режиме управления качеством. В результате принимаемые решения относительно увеличения выхода концентрата недостаточно обоснованы с точки зрения освоения природного потенциала месторождения.

Факторами, свидетельствующими о неоднородности углей по обогатимости в контурах месторождения, являются сложность и изменчивость петрографического состава и стадии метаморфизма углей по простиранию и падению залежей. Так, возможность установить различия в обогатимости углей вскрытых и подготовленных к отработке запасов появилась в связи с вводом для опробования коксующихся углей скважин детальной разведки при освоении Нерюнгринского месторождения. Организация такого подробного изучения свойств обогатимости была проведена по инициативе главного геолога геолого-разведочной экспедиции Южно-Якутского угольного комбината В. Н. Машира. Разведочные скважины задавались по сетке 15×15 м. Поскольку планировалось тотальное обогащение углей месторождения в тяжелых средах, исходные данные, получаемые экспедицией при опробовании, представлялись фракционным составом углей по 4–5 точкам плотности разделения с шагом более 100 кг/м³. Полученные данные геологического опробования 34 скважин послужили в качестве исходной информации для исследо-

вания свойства обогатимости коксующихся углей месторождения. Начальная оценка свойства обогатимости углей состояла в определении зависимости выхода концентрата от зольности рядового угля. Полученное корреляционное поле данных по выходу концентрата на трех плотностях разделения (1 400, 1 460 и 1 500 кг/м³) подтвердило эту зависимость (рис. 1).

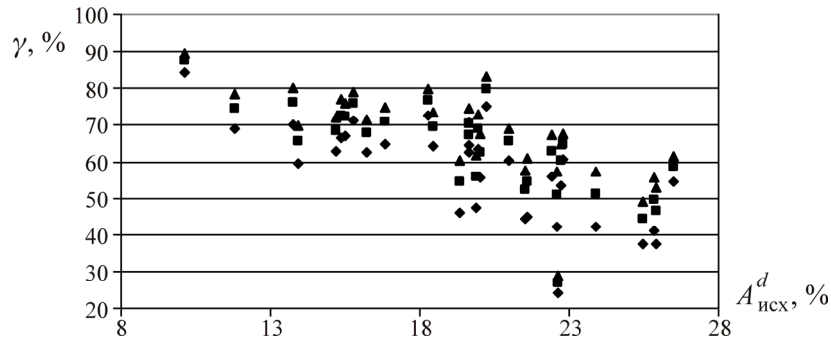


Рис. 1. Характер изменения выхода всплывшего продукта (γ) в зависимости от зольности рядовых углей ($A_{исх}^d$) на разной плотности разделения, кг/м³: \blacklozenge — 1 400; \blacksquare — 1 460; \blacktriangle — 1 500

При этом проявился большой разброс выхода концентрата при одной и той же зольности углей. Например, при зольности исходного угля 23 % получен разброс выхода концентрата на плотности 1 460 кг/м³ от 25 до 70 %. Для малозольных углей характерен меньший диапазон разброса выхода концентрата, составляющий от 60 до 80 %. Результаты выполненного анализа данных фракционного состава подтвердили неоднородность углей по свойствам обогатимости.

Следующая процедура анализа данных геологического опробования состояла в определении того, насколько различается обогатимость углей по площади пласта. Для выяснения этой особенности на рис. 2 показаны данные выхода всплывшего продукта по трем плотностям разделения, полученные опробованием разведочных скважин.

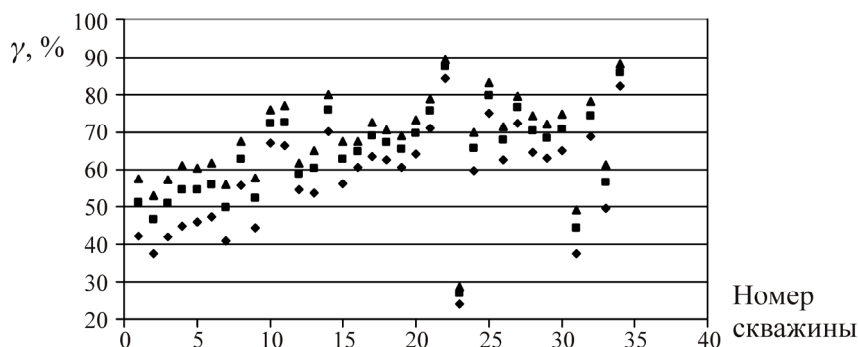


Рис. 2. Характер изменения выхода всплывшего продукта (γ) на разной плотности разделения по данным опробования разведочных скважин (усл. обозн. на рис. 1)

Как следует из расположения на рис. 2 данных по выходу концентрата по 34 разведочным скважинам, на плотности разделения 1 400 кг/м³ выделяются труднообогатимые (скважины 1–10), среднеобогатимые (скважины 12–20) и легкообогатимые (скважины 21–34) угли. Анализ расположения данных на рис. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы: коксующиеся угли месторождения неоднородны по свойствам обогатимости; участки коксующихся углей с различными свойствами обогатимости подлежат дифференциации.

Благодаря возможностям, которые открываются дифференциацией запасов коксующихся углей по свойствам обогатимости в процессе их использования, дана оценка результатам решения следующих задач:

- обоснование показателя дифференциации запасов на категории по свойству обогатимости;
- разработка метода картирования запасов пласта по категориям обогатимости;
- оценка и выбор вариантов отдельного или совместного обогащения углей с целью максимизации выхода концентрата;
- формирование вариантов состава товарных продуктов нескольких уровней качества.

Для решения поставленных задач потребовалось создание информационной модели обогащения углей в тяжелых средах на основе преобразования традиционной модели фракционного анализа и разработка алгоритма восстановления кривых обогатимости.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБОГАТИМОСТИ УГЛЕЙ

Основу модели оценки обогатимости ископаемых углей, по которой дается прогноз выхода и качества угольной продукции, составляют кривые Анри [2, 3]: кривая зольности элементарных слоев разделения λ и кривая выхода всплывшего продукта β . Кривая λ строится по данным фракционного анализа проб углей разведочных скважин по нескольким классам крупности. В существующей практике подготовки геологической информации по обогатимости углей фракционный анализ, состоящий в определении выхода всплывшего продукта γ и его зольности A^d по плотностям разделения, в связи со сложностью его проведения выполнен по 4–5 точкам для каждого класса крупности.

Структура традиционной информационной модели обогатимости, определенная результатами фракционного анализа, представлена по пласту “Мощный” Нерюнгринского месторождения (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты фракционного анализа углей по классам крупности

Номер класса крупности	Размер класса крупности, мм	Доля класса крупности, %	Плотность фракций ρ , кг/м ³									
			< 1300		1300–1400		1400–1500		1500–1600		> 1600	
			γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %
1	0.5–3.0	2.42	0.41	3.57	1.24	8.53	0.45	18.08	0.14	28.03	0.18	51.07
2	3.0–6.0	25.80	3.88	3.46	12.03	9.28	5.87	18.58	1.78	28.13	2.24	50.76
3	6.0–13.0	13.99	1.17	3.68	7.78	9.63	3.17	18.03	0.84	26.59	1.03	50.54
4	13.0–25.0	51.30	3.12	3.32	24.20	10.14	14.45	17.80	4.21	26.55	5.32	40.68
5	25.0–30.0	6.49	0.01	3.81	2.50	9.59	2.16	17.76	0.43	26.96	1.39	55.40
1–3	0.5–13.0	42.21	5.46	3.52	21.05	9.36	9.49	18.37	2.76	27.65	3.45	50.70
4–5	13.0–30.0	57.79	3.13	3.32	26.70	10.09	16.61	17.79	4.64	26.59	6.71	43.73
Суммарный класс	0.5–30.0	100.0	8.59	3.44	47.75	9.77	26.10	18.00	7.40	26.98	10.16	46.10

Наполнение информационной модели данными по образцу табл. 1 существенно ограничивает представление о характере изменчивости зольности и выхода продуктов обогащения по плотностям разделения в тяжелых средах. Для обоснованного выбора режима обогащения требуются результаты фракционного анализа с меньшим шагом плотности разделения. Для этого на основе алгоритма ГОСТ 4790-80 [4] разработана процедура автоматизированного восстановления кривой λ по имеющимся данным фракционного анализа и расчета кривой β .

Вычислительные процедуры включают:

- формирование информационной модели обогатимости углей с малым шагом плотности разделения;

- построение кривых зольностей элементарных слоев разделения λ и расчет теоретического выхода всплывшего продукта (концентрата) по кривой β ;
- построение кривых β для раздельного по обогатимости и суммарного потока углей, поступающих на обогащение;
- прогноз выхода продуктов обогащения.

Кривая λ строится по данным фракционного анализа любого уровня: отдельного класса крупности, совокупности классов крупности, в целом по пробе, скважине, пласту, месторождению или его участку. При построении кривой λ требуется обосновать выбор шага изменения плотности разделения ρ . Для достижения более точных результатов необходимо на интервале получения концентрата иметь данные с большей степенью детализации. Предложено строить ее с минимальным, например 5–10 кг/м³, шагом изменения ρ на всех участках кривой обогатимости.

Разработанный в ГОСТ 4790-80 алгоритм восстановления кривых зольностей элементарных слоев разделения λ сформирован на основе уравнений материального баланса для углей средней обогатимости. Кривая λ при этом разбивается на три участка. Первый (зона концентратных фракций) и третий (зона породных фракций) участки кривой обогатимости характеризуют уголь как однородную массу, состоящую только из органических частиц зольностью A_{\min}^d (первый участок), только из минеральных компонентов зольностью A_{\max}^d (третий участок). Второй участок (нижняя зона концентратных фракций при двухпродуктовом разделении и зона промпродуктовых фракций при трехпродуктовом разделении) характеризуется смесью органических частиц и минеральных компонентов в различных соотношениях. При математическом описании и построении кривых обогатимости на основе данных фракционного анализа эти три участка рассматриваются отдельно в силу разного характера зависимостей, связывающих изменение зольности с выходом фракций.

Расчеты по алгоритму показали, что для низкозольных легкообогатимых углей, когда прирост выхода и зольности легких фракций на интервале плотностей менее 1 400 кг/м³ (*первый участок кривой*) значителен (более 30 %), использование общепринятых расчетных формул нередко приводит к получению отрицательных значений зольности, что противоречит материальным основам расчета. Чтобы избежать этого, используется логическая процедура, позволяющая программно определить возможности расчета кривой λ либо по формулам ГОСТа действующего алгоритма, либо с помощью метода линейной интерполяции [5].

При восстановлении данных фракционного анализа на *втором участке кривой λ* (на интервале плотностей разделения от 1 500 до 1 800 кг/м³) для углей с незначительным приростом зольности, рассчитанного по формулам алгоритма, зольность также иногда принимает отрицательные значения. Для преодоления этого на данном участке кривой применяется процедура пошаговой корректировки исходных данных для их адаптации к формулам действующего алгоритма. Расчет зольности и выхода фракций на *третьем участке кривой λ* плотностей разделения более 1 800 кг/м³ выполняется без изменения.

С учетом разработанных процедур проведена адаптация алгоритма ГОСТ 4790-80 к ископаемым углям с широким диапазоном изменения показателей обогатимости, что позволило разработать программно-информационный комплекс для автоматизированного расчета кривых обогатимости углей [5–7]. Результатами расчетов является построение кривой λ с шагом изменения плотностей разделения от 5 до 100 кг/м³. На основе полученных восстановленных данных фракционного состава кривая всплывшего продукта β , представленная его выходом (γ^β , %) и зольностью ($A^{d\beta}$, %), рассчитывается для всех трех участков по формулам:

$$\gamma_1^\beta = \gamma_{\rho_1}^\lambda, \quad A_1^{d\beta} = A_{\rho_1}^{d\lambda}, \quad (1)$$

$$\gamma_v^\beta = \gamma_1^\lambda + \sum_{i=2}^v \gamma_{\rho_i}^\lambda, \quad v=1, \dots, N, \quad (2)$$

$$A_v^{d\beta} = \frac{\gamma_1^\lambda A_1^{d\lambda} + \sum_{i=2}^v A_{\rho_i}^{d\lambda} \gamma_{\rho_i}^\lambda}{\gamma_v^\beta}, \quad v=1, \dots, N, \quad (3)$$

где γ_v^β , $A_v^{d\beta}$ — выход и зольность фракций плотностью ρ_v для кривой всплывшего продукта β , %; $\gamma_{\rho_i}^\lambda$, $A_{\rho_i}^{d\lambda}$ — выход и зольность фракций плотностью ρ_i для кривой зольностей элементарных слоев разделения λ , %; N — количество точек плотности на восстановленной кривой λ .

Построение восстановленных кривых обогатимости λ и β с малым шагом плотности разделения ρ проводится как по рядовому углю, так и по всем классам крупности (отдельным или совокупным). Для оценки практической значимости такого приема получения детальной информации по обогатимости представлены результаты по выходу и зольности всплывшего продукта обогащения рядового угля Нерюнгринского месторождения (табл. 2) и углей разных классов крупности Эльгинского месторождения (табл. 3).

ТАБЛИЦА 2. Значения показателей обогатимости для кривых λ и β по пробе скважины 2303 Нерюнгринского месторождения для рядового угля

Плотность фракций ρ , кг/м ³	Восстановленные данные (кривая λ)		Кривая всплывшего продукта (кривая β)	
	γ^λ , %	$A^{d\lambda}$, %	γ^β , %	$A^{d\beta}$, %
< 1300	24.94	6.09	24.94	6.09
1300 – 1320	6.73	8.78	31.68	6.66
1320 – 1340	6.49	9.93	38.17	7.22
1340 – 1360	6.20	11.07	44.37	7.76
1360 – 1380	5.86	12.24	50.23	8.28
1380 – 1400	5.46	13.46	55.69	8.79
1400 – 1420	2.30	14.68	57.99	9.02
1420 – 1440	2.33	15.87	60.33	9.29
1440 – 1460	2.37	17.03	62.69	9.58
1460 – 1480	2.40	19.24	65.09	10.23
1480 – 1500	2.43	19.24	67.53	9.89
1500 – 1520	2.47	20.31	69.99	10.59
1520 – 1540	2.50	21.35	72.49	10.96
1540 – 1560	2.53	22.36	75.02	11.34
1560 – 1580	2.56	23.34	77.58	11.74
1580 – 1600	2.60	24.30	80.18	12.14
...

Как следует из данных табл. 2, развертывание стандартной модели фракционного анализа с шагом 20 кг/м³ позволяет оценить чувствительность выхода и зольности всплывшего продукта к изменению плотности разделения фракций. Благодаря этому появляется возможность выделить для процесса обогащения именно ту плотность разделения, при которой обогащенный продукт будет отвечать как требованиям потребителя, так и рациональному использованию ис-

копаемых углей в соответствии с их ценностью. С помощью разработанного программного обеспечения возможно при наличии данных геологов получить кривые обогатимости не только для рядового угля, но и для любых классов крупности, как это было сделано для Эльгинского месторождения коксующихся углей.

ТАБЛИЦА 3. Значения показателей обогатимости для кривых β по классам крупности пласта $У_{5(1)}$ Ундытканской свиты Эльгинского месторождения

Плотность разделения ρ , кг/м ³	Кривая всплывшего продукта (кривая β) по классам крупности							
	Суммарный		Более 13 мм		0.5–13.0 мм		0.0–0.5 мм	
	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %
< 1300	40.75	7.77	19.56	11.34	58.21	7.42	60.74	3.99
1300–1320	45.50	8.27	23.97	11.97	60.91	7.91	64.73	4.30
1320–1340	49.93	8.75	29.18	12.58	67.24	8.19	68.38	4.60
1340–1360	54.02	9.23	32.18	13.17	71.19	8.56	71.69	4.90
1360–1380	57.73	9.68	35.93	13.75	74.72	8.92	74.64	5.18
1380–1400	61.04	10.13	39.38	14.31	77.93	9.27	77.21	5.48
1400–1420	62.88	10.43	41.54	14.72	79.48	9.50	78.54	5.63
1420–1440	64.74	10.79	43.74	15.19	81.14	9.79	79.90	5.85
1440–1460	66.63	11.20	45.96	15.71	82.83	10.10	81.27	6.11
1460–1480	68.54	11.67	48.22	16.28	84.54	10.46	82.65	6.40
1480–1500	70.48	12.17	50.50	16.89	86.28	10.87	84.06	6.72
1500–1520	71.02	12.32	51.08	17.05	86.85	11.01	84.31	6.78
1520–1540	71.56	12.48	51.67	17.23	87.42	11.16	84.57	6.84
1540–1560	72.11	12.65	52.26	17.44	88.00	11.32	84.83	6.90
1560–1580	72.67	12.83	52.97	17.95	88.59	11.49	86.09	6.96
1580–1600	73.24	13.03	53.47	17.89	89.19	11.67	85.36	7.02
...

Анализ данных табл. 3 по разворачиванию модели фракционного состава с шагом 20 кг/м³ показывает, что существует явная природная сегрегация по обогатимости углей разных классов крупности. Результаты оценки свойств обогатимости дают основание рассматривать отдельное обогащение углей классов крупности 0.5–13 мм и более 13 мм как эффективный способ использования запасов. Существенное различие в обогатимости углей указанных классов крупности подтверждается кривыми выхода всплывшего продукта (рис. 3), построенными по результатам опробования пластов свит Эльгинского месторождения.

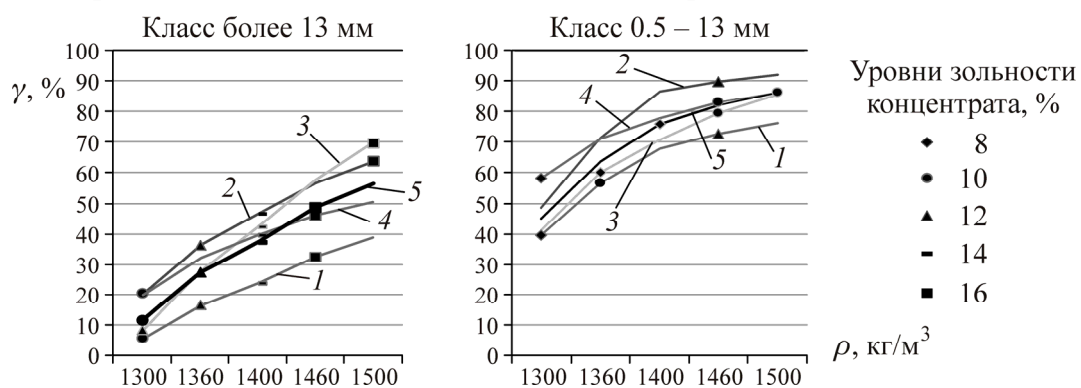


Рис. 3. Изменение выхода всплывшего продукта по плотности разделения легких фракций по пластам и классам крупности углей Эльгинского месторождения: 1 — $Н_{15}$; 2 — $Н_{16}$; 3 — $У_4$; 4 — $У_{5(1)}$; 5 — $У_{5(2)}$

Таким образом, можно заключить, что разработанная процедура восстановления данных фракционного анализа (кривая λ) и построения кривой всплывшего продукта (кривая β) позволяет оценить возможности повышения эффективности использования запасов месторождения путем организации раздельного и управляемого смешанного обогащения углей [8].

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ЗАПАСОВ УГЛЕЙ ПО СВОЙСТВАМ ОБОГАТИМОСТИ

Различия в обогатимости углей в контурах месторождения обуславливают постановку задачи о нахождении численного значения показателя дифференциации углей на категории по свойству обогатимости. В результате многолетних исследований установлено [6, 9], что прогноз ценности запасов месторождения и обоснование направлений использования угольной продукции наиболее эффективно проводить на основе оценки обогатимости углей по зольности и выходу легких фракций в диапазоне плотностей разделения 1400–1500 кг/м³. Зольность легких фракций определяет теоретически достижимое качество концентрата и позволяет достаточно точно оценить возможность его использования для тех или иных технологических целей, в частности в коксохимии. В наибольшей степени приведенным требованиям отвечает показатель категории обогатимости углей T_0 [9], в соответствии с которым рассчитываются результаты обогащения и возможности применения концентрата:

$$T_0 = a(A_\rho^d)^2 + b(100 - \gamma_\rho)^2, \quad (4)$$

где A_ρ^d — зольность легкой фракции, %; γ_ρ — выход легкой фракции, %, ρ — плотность разделения, кг/м³; a , b — коэффициенты, рассчитываемые для конкретного угольного бассейна. Метод расчета коэффициентов a и b изложен в [9].

Дифференциация углей по разделительному признаку T_0 проведена на пять категорий обогатимости, угли каждой из которых имеют определенное назначение (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Дифференциация запасов углей по методу из [9]

Значение T_0	Категория обогатимости	Назначение продукта обогащения
$T_0 \leq 1$	I	Угли, пригодные для производства чистых и сверхчистых концентратов
$1 < T_0 \leq 2$	II	Угли, дающие при обогащении высокие выходы концентрата для производства кокса
$2 < T_0 \leq 3$	III	Угли, при обогащении которых можно получить концентрат для производства кокса, но с пониженным выходом
$3 < T_0 \leq 4$	IV	Угли, пригодные для получения высокозольных концентратов для использования в энергетике
$4 < T_0$	V	Угли, непригодные для получения концентратов для коксохимии

Изложенный метод дифференциации запасов по категориям обогатимости, как следует из табл. 4, в основном раскрывает возможности получения угольной продукции определенного назначения из запасов месторождения. Такие возможности определяются по двум плотностям разделения — 1400 и 1500 кг/м³. Выделенное назначение продуктов обогащения косвенно отражает такие свойства углей как легко-, средне- и труднообогатимые, в то время как явное проявление таких свойств подтверждается результатами опробования разведочных скважин (см. рис. 1 и 2).

Дифференциации углей по выделенному признаку обогатимости открывает возможности для управления потоками добытого угля, обеспечивающего повышение выхода концентрата заданного качества. Задача состоит в нахождении значения признака для разделения запасов углей.

Для решения поставленной задачи выбран подход к дифференциации запасов, состоящий в определении возможностей для получения продуктов обогащения заданной зольности при экономически обоснованном выходе концентрата. Для этого (4) примет вид

$$T'_0 = a(A^{d\text{гп}})^2 + b(100 - \gamma^{\text{гп}})^2, \quad (4')$$

где $A^{d\text{гп}}$ — зольность планируемого продукта обогащения; $\gamma^{\text{гп}}$ — соответствующий выход.

Механизм реализации метода разделения углей на однородные по обогатимости зоны по предложенному подходу приведен на примере запасов отработки коксующихся углей марки К9 Нерюнгринского месторождения. В процессе разработки месторождения создаются условия, определяющие выпуск обогащенной продукции нескольких уровней качества. Так, исходные данные по уровням качества товарной продукции из углей Нерюнгринского месторождения, обусловленные различием в обогатимости, таковы:

— концентрат с максимальной зольностью 9.5 % и выходом более 60 % относится к продукту высшего уровня качества для использования в коксохимии;

— концентрат с максимальной зольностью 10.2 % и выходом не менее 60 % — продукт среднего уровня качества для использования в коксохимии самостоятельно в небольших объемах и (или) в смеси с концентратом высшего уровня качества;

— концентрат с зольностью выше 10.2 % и выходом менее 60 % — продукт низшего уровня качества для использования в коксохимии только в смеси с концентратом высшего уровня качества в небольших объемах и (или) самостоятельно в энергетике.

Доказанными эксплуатационной разведкой различиями в свойствах обогатимости нерюнгринских углей технологической группы К9 и планированием концентрата трех уровней качества обусловлена необходимость сделать управляемым и прогнозируемым процесс подготовки углей к обогащению. Для этого требуется провести картирование пласта по свойству обогатимости, основанное на определенном признаке дифференциации запасов.

Для определения T'_0 в уравнении (4') в качестве базовых параметров принимается зольность концентрата планируемого или заданного потребителями уровня качества $A^{d\text{гп}}$ и соответствующий ей средневзвешенный выход продукта $\gamma^{\text{гп}}$, рассчитанные по суммарной кривой β , построенной по совокупности данных опробования разведочных скважин. При подстановке значений зольности и выхода концентрата для каждого уровня качества товарной продукции в (4') находим граничные значения категорий обогатимости углей: $T_0^{\text{гп.1}}$ — первого уровня качества, $T_0^{\text{гп.2}}$ — второго уровня качества, и при условии $T'_0 > T_0^{\text{гп.2}}$ — третьего уровня качества.

Таким образом, все угли, для которых $T'_0 < T_0^{\text{гп.1}}$, являются наиболее предпочтительным сырьем для получения концентрата не хуже заданного высшего уровня качества, получаемого как при раздельном обогащении, так и при обогащении в смеси. Условно назовем эти угли легкообогатимыми. Далее таким же способом рассчитаем граничное значение $T_0^{\text{гп.2}}$ для углей, из которых возможно получить продукцию среднего уровня качества. Тогда все угли, для которых $T_0^{\text{гп.1}} < T'_0 < T_0^{\text{гп.2}}$, условно назовем среднеобогатимыми. Угли низшего уровня качества ($T'_0 > T_0^{\text{гп.2}}$) отнесены к категории труднообогатимых. Рассчитанные граничные значения категорий обогатимости по углям технологической группы К9 Нерюнгринского месторождения приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Граничные значения разделительного признака T'_0 для углей Нерюнгринского месторождения

Коэффициент	Значение разделительного признака	Категория обогатимости
$a = 0.0118$ $b = 0.0002$	$T'_0 \leq 1.38$	Легкообогатимые (ЛО)
	$1.38 < T'_0 \leq 1.54$	Среднеобогатимые (СО)
	$T'_0 > 1.54$	Труднообогатимые (ТО)

По значениям разделительного признака проведено зонирование запасов участка месторождения. Существенное различие зон подтверждено построенными зависимостями выхода и зольности всплывшего продукта от установленной категории обогатимости углей (рис. 4).

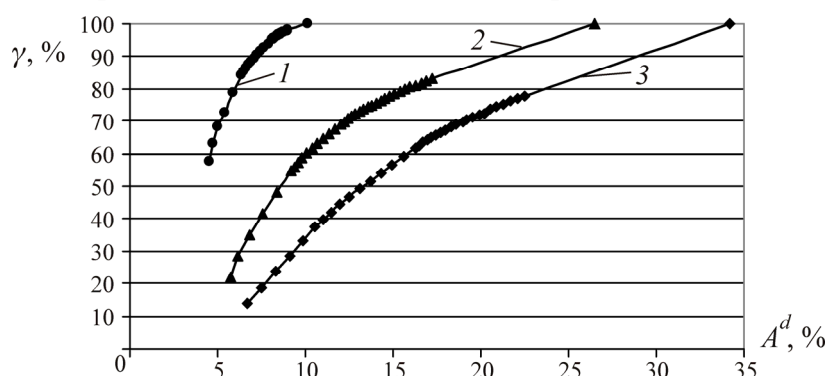


Рис. 4. Характер изменения выхода (γ , %) и зольности (A^d , %) всплывшего продукта по установленным категориям обогатимости углей: 1 — ЛО; 2 — СО; 3 — ТО

Как следует из представленных на рис. 4 зависимостей выхода всплывшего продукта и его зольности, отстроенных по выделенным категориям обогатимости углей, определенные признаки дифференциации запасов углей (табл. 4) отличаются высокой чувствительностью к изменению исследуемых свойств. Для подтверждения такой оценки в табл. 6 по трем уровням качества обогащенной угольной продукции приведены для каждой категории обогатимости показатели по выходу продукции заданного качества на разной плотности разделения фракций.

ТАБЛИЦА 6. Качество и выход угольной продукции по отдельным скважинам с различными категориями обогатимости углей

Зольность угольной продукции разных уровней качества, %	ТО		СО		ЛО	
	Выход (зольность), %	Плотность разделения, кг/м ³	Выход (зольность), %	Плотность разделения, кг/м ³	Выход (зольность), %	Плотность разделения, кг/м ³
Менее 9.5	28.50 (9.09)	1360	55.98 (9.38)	1420	83.12 (8.22)	1500
Менее 10.2	33.11 (9.84)	1380	60.19 (10.09)	1480	—	—
Более 10.2	37.47 (10.52)	1400	61.63 (10.38)	1500	—	—
	49.19 (13.09)	1500	—	—	—	—

Анализ данных табл. 6 свидетельствует о существенном различии в возможностях получения концентрата высшего уровня качества (с зольностью меньше 9.5%). Важным ресурсом для его производства являются угли категорий СО и ЛО, а угли категории обогатимости ТО (с зольностью более 10.2%) самостоятельно могут быть использованы только в энергетике. Из этого есть основание заключить, что дифференциация углей по свойству обогатимости позволит повысить эффективность управления формированием потоков углей, поступающих на обогащение, и, следовательно, эффективность использования запасов месторождения.

Аналогичный подход к оценке обогатимости углей применен при расчете граничных значений для дифференциации запасов технологической группы Ж21 Эльгинского месторождения. Исходные данные определены планируемыми уровнями качества товарной продукции: для коксохимии $A^d = 10.8 \%$ и $\gamma = 57.8 \%$, для энергетики $A^d = 14.4 \%$ и $\gamma = 80.1 \%$.

Полученные граничные значения по дифференциации углей Эльгинского месторождения приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Граничные значения разделительного признака T'_0 для углей Эльгинского месторождения

Коэффициент	Значение разделительного признака	Категория обогатимости
$a = 0.0118$ $b = 0.0002$	$T'_0 \leq 1.73$	Легкообогатимые
	$1.73 < T'_0 \leq 2.53$	Среднеобогатимые
	$T'_0 > 2.53$	Труднообогатимые

С использованием рассчитанных граничных значений разделительного признака проведена дифференциация запасов пластов углей по свойствам обогатимости как по рядовым углям, так и по их классам крупности (табл. 8).

ТАБЛИЦА 8. Разделение по категориям обогатимости и классам крупности углей пластов Нерюнгринской (Н) и Ундытканской (У) свит Эльгинского месторождения

Класс крупности, мм	Пласт Н ₁₅		Пласт Н ₁₆		Пласт У ₄		Пласт У ₅₍₁₎		Пласт У ₅₍₂₎	
	T'_0	Категория	T'_0	Категория	T'_0	Категория	T'_0	Категория	T'_0	Категория
Рядовой уголь	2.42	СО	1.99	СО	1.83	СО	1.69	ЛО	1.71	ЛО
Более 13.0	4.24	ТО	3.01	ТО	3.93	ТО	3.47	ТО	3.34	ТО
0.5 – 13.0	1.89	СО	1.77	СО	1.33	ЛО	1.25	ЛО	1.14	ЛО
0.0 – 0.5	0.77	ЛО	0.80	ЛО	0.66	ЛО	0.51	ЛО	0.57	ЛО

На основе полученных результатов оценки обогатимости запасов углей Эльгинского месторождения можно сформулировать следующее:

- подтверждается природная сегрегация углей по свойствам обогатимости (рис. 3): по всем пластам угли класса крупности более 13 мм отнесены к труднообогатимым;
- в связи с выявленной особенностью сырьевой базы месторождения целесообразно рассмотреть на стадии его эксплуатации раздельное обогащение углей класса крупности более 13 мм;
- для управления обогатимостью рядовых углей необходимо устанавливать категорию обогатимости по пластам свит в связи с выявленным ее различием.

УПРАВЛЕНИЕ ВЫХОДОМ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ЗАПАСОВ УГЛЕЙ

Установленной возможностью и целесообразностью дифференциации запасов по свойствам обогатимости на легко-, средне- и труднообогатимые с существенно различающимся выходом концентрата создаются условия для управления потоками добытых углей с целью повышения выхода товарной продукции заданного качества при обогащении. У коксующихся углей качество товарного продукта, кроме зольности, определяется комплексом показателей, основным из которых служит показатель спекаемости — толщина пластического слоя (γ , мм). Отсутствие тесной корреляционной зависимости между показателями спекаемости и обогатимости обуславливает самостоятельную постановку задачи планирования добычных работ с учетом обогатимости углей.

Необходимыми исходными данными задачи планирования в этой постановке являются данные фракционного состава углей по каждому геолого-технологическому блоку (k, i), представленные показателями выхода γ_{rki} и зольности A_{rki}^d всплывших фракций на дискретном множестве плотностей разделения ($r \in R$), а также максимально допустимая зольность концентрата A_{\max}^d .

Цель задачи состоит в том, чтобы найти такие объемы добычи угля x_{kij} из блоков (k, i) для периода j , при которых достигается максимальный выход концентрата на заданном множестве плотностей разделения:

$$\max_{r_j \in R} \max_{k, i, j} \gamma_j(r_j, x_{kij}), \quad (5)$$

где $0 \leq x_{kij} \leq Q_{kj}$; Q_{kj} — максимальная производительность экскаватора k в период j .

Модель оптимизации формируется путем построения для каждого периода j последовательности субмоделей $M_j(r)$ по плотности разделения r . Субмодель $M_j(r)$ включает:

1) ограничения на объем углей принятого к отработке геолого-технологического блока углей:

$$x_{kij} + R_{kij} \leq \sum_{m=1}^i W_{km}, \quad k \in K, \quad j = \overline{1, J}; \quad (6)$$

$$x_{k, i+1, j} \leq \delta_{k, i+1} W_{k, i+1}, \quad k \in K, \quad j = \overline{1, J}; \quad (7)$$

$$x_{kij} + R_{kij} \geq \delta_{k, i+1} \sum_{m=1}^i W_{km}, \quad k \in K, \quad j = \overline{1, J}; \quad (8)$$

$$\delta_{k, i+1} \in \{0, 1\}, \quad k \in K, \quad (9)$$

здесь R_{kij} — объем добычи из блока (k, i) за прошедшие периоды $1, 2, \dots, j$; $W_{ki}, W_{k, i+1}$ — объемы запасов в блоках (k, i) и ($k, i+1$); $\delta_{k, i+1}$ — символ Кронекера;

2) ограничения, учитывающие пределы объема добычи экскаватором k :

$$\sum_{k \in K} (x_{kij} + x_{k, i+1, j}) = Q_j^f, \quad j \in J; \quad (10)$$

$$x_{kij} + x_{k, i+1, j} \leq Q_{kj}, \quad k \in K, \quad j \in J, \quad (11)$$

где Q_j^f — производительность обогатительной фабрики в период j ;

3) ограничения на зольность товарного угля (концентрата):

$$\sum_{k=1}^K (x_{kij} A_{rki}^d \gamma_{rki} + x_{k, i+1, j} A_{r, i+1}^d \gamma_{r, i+1}) \leq A_{\max}^d \sum_{k=1}^K (x_{kij} \gamma_{rki} + x_{k, i+1, j} \gamma_{r, i+1}); \quad (12)$$

4) ограничения на разброс значений показателей качества в потоке добытого угля P^e :

$$P_{\min}^e \leq \frac{\sum_{k \in K_j} \sum_i x_{kij} P_{ki}^e}{\sum_{k \in K_j} \sum_i x_{kij}} \leq P_{\max}^e, \quad e = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где P_{ki}^e — единичный показатель качества в геолого-технологическом блоке (k, i) : зольность, толщина пластического слоя и др.

Поиск решения ведется последовательным применением критериев: максимизации выхода концентрата

$$\gamma_i \rightarrow \max \quad (14)$$

и управления динамикой отработки запасов углей

$$\max_{k \in K} \frac{x_{kj}}{W_k - R_{kj}} - \min_{k \in K} \frac{x_{kj}}{W_k - R_{kj}} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Первоначально изменением доли добычи угля из каждого забоя находятся на некоторой плотности разделения варианты с наиболее высоким выходом концентрата в рамках существующих ограничений. При этом всегда имеется область близких решений с различными значениями нагрузки на действующие добычные забои. В этом случае предпочтение следует отдавать варианту, при котором отработка запасов по каждому забою наиболее равномерна. Тогда на интервале планирования придется содержать резерв действующих забоев, что повышает вероятность более стабильной работы системы.

Представленная модель (5)–(15) строится начиная с субмодели $M_j(r_0)$ для варианта с минимальной плотностью разделения, когда заведомо имеется решение, удовлетворяющее (14). Затем формируется последовательность субмоделей $M_j(r_0 + 1), \dots, M_j(r_0 + n)$ до тех пор, пока для очередной субмодели полученное решение является недопустимым. В качестве оптимального принимается решение субмодели $M_j(r_0 + (n - 1))$ на предыдущем шаге. Результаты решения задачи планирования представляются векторами \overline{X}_j и \overline{P}_j^e и показателями обогатимости углей: $\gamma_{j \max}$, $r_j^{\text{опт}}$ и A_j^d .

Для принятия решения об использовании модели (5)–(15) с максимизацией выхода концентрата заданной зольности и определением его технологической ценности (модель 1) сравним полученное решение с результатами применения моделей в традиционной постановке, состоящей в следующем:

— стабилизация зольности концентрата угля при одновременном выравнивании нагрузки на добычные забои с частичной оптимизацией выхода концентрата и определением его технологической ценности и плотности разделения (модель 2);

— максимизация выхода концентрата на постоянной плотности разделения с определением его технологической ценности, что обеспечивает устойчивость процесса обогащения (модель 3).

Исследования проведены в условиях эксплуатации Нерюнгринского месторождения и состояли в разработке текущих планов ведения добычных работа в объеме 1.25 млн т. Найденные решения по моделям 1–3 приведены в табл. 9.

Из анализа табл. 9 следует, что при управлении потоками добываемого угля по модели 1 цель повышения выхода концентрата при одном уровне его качества достигнута. Так, средний выход концентрата, равный 78.2 % на 9.15 % выше, чем полученный по модели 2 и на 9.9 % выше, чем по модели 3, что, соответственно, приводит к увеличению ценности товарной про-

дукции. Одним из условий реализации управления добычными работами с позиции оптимизации выхода концентрата заданного качества является гибкий режим обогащения — способность по сменам перестраивать процесс на требуемую плотность разделения $r_j^{\text{опт}}$, полученную при решении задачи.

ТАБЛИЦА 9. Результаты, полученные для разных вариантов постановки задачи управления выходом и качеством концентрата

Наименование критерия в модели управления качеством	Выход и качества концентрата				Ценность товарной продукции, полученной по варианту плана (1.25 млн т), млн \$
	Зола, %	Выход, %	Плотность разделения, кг/м ³	Толщина пластического слоя, мм	
Максимизация выхода концентрата с заданной зольностью (модель 1)	9.27	78.20	1470	10.35	36.17
Стабилизация зольности концентрата (модель 2)	9.50	69.05	1450	10.60	31.94
Максимизация выхода концентрата на постоянной плотности разделения (модель 3)	9.46	68.31	1450	10.60	31.59

Устойчивость процесса обогащения обеспечивается по модели 3, но с потерей выхода части концентрата. От управления по модели 2, цель которой — стабилизация зольности концентрата при выполнении ограничения по толщине пластического слоя, ожидалось повышение ценности используемых запасов за счет отдачи потребителю угля строго заданного качества. Учитывая данные фракционного анализа по скважинам и зная принадлежность углей к категориям обогатимости, можно на основе предложенных моделей рассматривать варианты раздельного или смешенного обогащения углей разных категорий.

ФОРМИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ СОСТАВА ТОВАРНЫХ ПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ СВОЙСТВА ОБОГАТИМОСТИ

Традиционно угледобывающие предприятия ориентированы на производство концентратов одного уровня зольности. Однако для повышения эффективности их деятельности и гибкости поведения на рынке следует рассмотреть возможности расширения номенклатуры товарной продукции. Предлагается при ее определении основываться на различии углей в свойствах обогатимости по маркам, пластам и классам крупности [10]. В качестве объекта исследования рассмотрены запасы Эльгинского месторождения, представленные углями технологических групп Ж21 и Ж6. Угли месторождения в основном высокзольные (зольность рядового угля по пластам изменяется от 22.5 до 35.0 %), что обусловило необходимость их обязательного обогащения [5, 6].

Согласно данным табл. 7, для рядовых углей марки Ж21 установлено три категории обогатимости. Исследования показали, что существуют различия в свойстве обогатимости по пластам и по классам крупности (табл. 8).

Оценка углей по обогатимости принята как основа для организации управления качеством товарной продукции с позиции увеличения возможности адаптации угледобывающего предприятия к условиям рынка. Созданные однородные по обогатимости потоки (по маркам, технологическим группам, пластам и классам крупности) используются при формировании состава и качества угольной продукции.

Для этого по каждому отдельному потоку на основе кривых обогатимости β предложено строить матрицу состава товарной продукции (МСТП), состоящую из фрагментов кривых всплывшего продукта, соответствующих заданным уровням его зольности. Пример построения фрагмента МСТП для рядовых углей по пластам месторождения приведен в табл. 10.

Рассмотрим возможности формирования состава продуктов обогащения, различающихся по зольности, что характеризует уровень их качества. В матрице показаны границы, определяющие выход и плотности разделения для заданных продуктов обогащения. Так, для получения концентрата зольностью 10.8 % с выходом 57.8 % (требования при расчете табл. 8) необходимо вовлекать в отработку пласты $У_{5(1)}$ и $У_{5(2)}$ (см. табл. 9, 10). Запасы этих пластов, доля которых составляет около 30 % общего объема, следует рассматривать как важные ресурсы месторождения в получении концентрата для коксохимии [11]. Ресурсами получения товарной продукции с зольностью 14.4 % и выходом на уровне 80.1 % являются запасы пластов $Н_{15}$, $Н_{16}$ и $У_4$ (см. табл. 9, 10).

ТАБЛИЦА 10. Матрица состава товарной продукции по пластам Эльгинского месторождения для рядового угля

Уровень зольности товарной продукции, %	Пласт $Н_{15}$ ($A_{исх}^d = 34.97$)		Пласт $Н_{16}$ ($A_{исх}^d = 22.36$)		Пласт $У_4$ ($A_{исх}^d = 23.96$)		Пласт $У_{5(1)}$ ($A_{исх}^d = 31.74$)		Пласт $У_{5(2)}$ ($A_{исх}^d = 26.73$)	
	ρ , кг/м ³	γ , %	ρ , кг/м ³	γ , %	ρ , кг/м ³	γ , %	ρ , кг/м ³	γ , %	ρ , кг/м ³	γ , %
8	1300	27.48	—	—	1360	41.01	1300	43.17	1360	45.80
9	1330	34.43	1310	38.64	1370	47.59	1350	52.02	1380	53.39
10	1360	38.74	1340	49.02	1400	56.77	1390	59.44	1420	60.67
11	1390	44.62	1370	59.39	1440	64.96	1450	65.68	1450	64.86
12	1430	49.74	1390	66.31	1470	71.26	1490	69.51	1480	69.14
13	1460	53.15	1420	71.78	1490	75.53	1600	73.24	1540	73.86
14	1490	56.62	1470	76.91	1560	81.06	1800	75.45	1610	76.89
15	1520	59.28	1560	82.47	1670	84.52	2200	77.00	1720	79.32
16	1570	63.05	1700	86.08	1850	87.12	—	—	1840	81.57
17	1620	66.01	1850	89.08	—	—	—	—	—	—
18	1700	68.59	—	—	—	—	—	—	—	—
19	1770	70.95	—	—	—	—	—	—	—	—
20	1830	72.87	—	—	—	—	—	—	—	—
Доля пласта в объеме добычи (9-й год эксплуатации)	0.273		0.189		0.243		0.172		0.123	
Доля пласта в объеме добычи (13-й год эксплуатации)	0.233		0.207		0.262		0.196		0.102	

Подобным образом, задавшись уровнем зольности концентрата для разных режимов обогащения (плотностей разделения), можно подобрать состав пластов и классов крупности, угли которых предполагается обогащать совместно, и рассчитать зольность и объемы готовых продуктов.

ВЫВОДЫ

Установлено, что запасы коксующихся углей в контурах основных месторождений Южной Якутии разделяются на легко-, средне- и труднообогатимые. Дифференциация запасов создает

новые возможности для управления использованием запасов месторождения, цель которого состоит в максимизации выхода концентрата заданного качества.

Для осуществления поставленной цели разработана процедура представления информационной модели обогатимости углей с малым шагом изменения плотности разделения фракций. Для изучаемых месторождений определены значения критериев выделения однородных по обогатимости зон и разработана модель оптимизации управления формируемыми из разных зон потоками углей и процессом обогащения как единой технологической системой.

Оценка управления потоками углей различной категории обогатимости, реализующего такие цели, как максимизация выхода концентрата с заданной зольностью, стабилизация зольности концентрата, максимизация выхода концентрата на постоянной плотности разделения, показала, что дифференциацией запасов углей по свойствам обогатимости создается возможность для принятия обоснованного решения по управлению процессом обогащения.

Использование матрицы состава товарной продукции для обоснования объемов и качества получаемых при обогащении концентратов обеспечивает гибкое реагирование угледобывающего предприятия на требования рынка, что повышает его конкурентоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 10100-84.** Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 4 с.
2. **Соколов В. Г.** Кривые обогатимости углей. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 90 с.
3. **Земляков Б. А.** Прогнозирование характеристик обогатимости углей. — М.: Недра, 1978. — 128 с.
4. **ГОСТ 4790-80.** Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод фракционного анализа. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 22 с.
5. **Фрейдина Е. В., Дворникова А. Н., Третьяков С. А.** Структура и модели автоматизированного текущего планирования добычных работ в режиме оптимизации состава шихты с расчетом выхода продуктов обогащения коксующихся углей // Вопросы совершенствования горных работ на шахтах и карьерах Сибири. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — С. 121–138.
6. **Дворникова А. Н., Третьяков С. А.** Методические основы оценки обогатимости углей при формировании шихты на карьерах // Освоение топливно-энергетических комплексов восточных районов страны. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. — С. 147–159.
7. **Фрейдина Е. В., Дворникова А. Н., Третьяков С. А.** Товарно-технологическая оценка запасов месторождений коксующихся углей // ФТПРПИ. — 1997. — № 5. — С. 90–99.
8. **Антипенко Л. А.** К вопросу о современных технологиях переработки и обогащения угля // Уголь. — 2015. — № 12. — С. 68–72.
9. **Коткин А. М., Ямпольский М. Н., Геращенко К. Д.** Оценка обогатимости угля и эффективности процессов обогащения. — М.: Недра, 1982. — 200 с.
10. **Козлов В. А.** Изменение выхода концентрата для различных классов крупности коксующихся углей Эльгинского месторождения // ГИАБ. — 2011. — № 5. — С. 131–134.
11. **Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Основы управления качеством добываемых углей в контексте международных стандартов ISO 9000–2000 // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 67–85.

Поступила в редакцию 3/VI 2016