

УДК 622.33:681.5

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ДОБЫВАЕМОГО УГЛЯ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Е. А. Хоютанов¹, В. Л. Гаврилов^{1,2}

¹*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: khoiutanov@igds.usn.ru, проспект Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: gvlugorsk@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена целесообразность учета звеньев цепочки “георесурс – разрез – обогатительная фабрика” как единого информационного, технологического и организационного пространства. Обоснованы методические подходы к совершенствованию управления потребительскими свойствами добываемого угля, в первую очередь его зольности, дифференцированной на ряд составляющих. На примере Эльгинского месторождения в Южной Якутии показаны возможности повышения полноты и качества отработки запасов угля на основе изучения структуры и приконтактных зон пластов. Предложены схемы управления зольностью при добыче угля за счет извлечения породных и высокозольных прослоев разной мощности. Представлены технологические схемы выемки угля или породных прослоев при разработке пластов малой мощности. Приведены рекомендации по отработке пластов, состоящих из угольных пачек с различной зольностью и обогатимостью.

Уголь, зольность, управление, Эльгинское месторождение, качество, резервы, оценка

DOI: 10.15372/FTPRPI20190308

Существует объективная необходимость отработки в сложных горно-геологических условиях неоднородных по строению и потребительским свойствам угля месторождений Южной Якутии (Эльгинское, Нерюнгринское), Забайкалья (Апсатское, Харанорское), Сибири и других регионов. Рост внимания к таким объектам и потребности повышения уровня использования их геологического потенциала способствовали постановке и решению различных задач квалитметрии недр и менеджмента качества на предприятиях, добывающих и обогащающих твердое топливо [1–3; и др.]. В то же время технологическое преобразование полезного ископаемого, находящегося в запасах, в готовую продукцию нередко осуществляется без должного учета всего комплекса природных свойств угля. Это касается и форм нахождения неорганического вещества в пластах, их потенциального влияния на уровень формируемой зольности.

Между геологической разведкой и эксплуатационной доразведкой месторождений, планированием и ведением горных работ, предварительной углеподготовкой на складах и в транспортных потоках, усреднением, обогащением имеется тесная информационная, технологическая и организационная связь. Рассмотрим существующие подходы к процессам управления качеством угля, в первую очередь его зольностью, как одного из основных потребительских свойств, на ряде примеров из различных регионов России и мира.

По сравнению с традиционной схемой валовой добычи и тотального обогащения угля применение новых технологических схем способствует повышению уровня использования потенциала различных участков Талдинского месторождения в Кузбассе [4]. Это достигается путем формирования в забоях отдельных угольных потоков и их последующего качественно-количественного изменения с учетом требований целевых групп потребителей.

Для бурогольных месторождений Красноярского края установлены обобщающие зависимости характера изменения зольности и теплоты сгорания, доказывающие возможность управления за счет изменения параметров технологии и порядка разработки пластов [5]. Получать уголь требуемого качества предлагается с помощью создания отдельных потоков для дробильно-сортировочных установок, накопительных и усреднительных складов или непосредственной отгрузки потребителям.

Система управления качеством угля на Уртуйском бурогольном разрезе включает: планирование добычи с помощью карт качества; оперативный радиационно-гигиенический контроль свойств угля на этапах детальной и эксплуатационной разведок, опробования забоев экскаваторов, угля в отбитой массе, на складах, в автосамосвалах; оперативный контроль зольности твердого топлива методом рентгенорадиометрического опробования; расчетный метод определения низшей теплоты сгорания [6]. Применение системы позволяет контролировать свойства добываемого угля от забоя до отгрузки покупателям, нормализовать его качество до необходимых требований.

Основные источники разубоживания угля на карьерах при разработке месторождений в Олтении (Румыния) и их влияние на качество продукции проанализированы в [7]. Добыча угля из сложных по строению пластов на разрезе “Ангренский” (Узбекистан) проводится селективным способом экскаваторами с зачисткой пластов. Совершенствование технологии усреднения и шихтовки качества угля достигается путем исследования ситового, фракционного и вещественного составов угля; регулирования долевого участия угля разного качества при добыче и поставках на ТЭЦ; сухого обогащения угольной массы для снижения зольности на 10–15% [8].

Разработка сложных по структуре и свойствам угольных месторождений предопределяет необходимость выделения в системах управления качеством стадии предварительной подготовки сырья к обогащению или отгрузке потребителю как дополнительного технологического процесса. Его цель — повышение суммарного выхода концентрата. Элементами управления при добыче труднообогатимых высокозольных углей могут быть: картирование показателей качества топлива в пространстве пластов с целью планирования на разных уровнях; оптимизация гранулометрического состава подаваемого на вход обогатительной фабрики угля различными способами, включая применение комбайнов послыйного фрезерования; предварительная вакуумно-пневматическая сепарация в установках СЕПАИР, крутонаклонных сепараторах с противоточным разделением по плотности с перечисткой разделяемых продуктов, вибропневматических мобильных комплексах [9–14].

Комплексное управление качеством угля предусматривает анализ его ключевых показателей при разведке и разработке месторождений, изучение основных процессов менеджмента качества на стадиях выемки угля в забое, при погрузке и транспортировке [15]. В ее основе лежит промышленный инжиниринг — вид деятельности, связанной с разработкой, улучшением и внедрением производственных систем, позволяющих наилучшим образом объединять человеческие и материальные ресурсы.

В одной из крупнейших мировых компаний “Tata Steel” (Индия) при управлении качеством угля и руд применяется многоступенчатое управление [16]. Оно начинается на стадии “pre-mining” и включает всестороннее изучение сырья в недрах, создание баз данных, каркасное и блочное моделирование месторождений, долго-, среднесрочное и оперативное планирование добычи, постоянный мониторинг всех процессов.

При исследовании месторождений со сложными геологическими условиями залегания и высокой изменчивостью показателей качества и геометрии пластов используются различные методы геостатистики [17, 18; и др.], включая возможности, вытекающие из развития понятия “углеминеральная однородность” и подходов к оценке ее эффективности [19]. Сочетая реализацию этих методов с моделями процессов предварительной углеподготовки, можно более точно организовать проектирование и планирование горных работ.

Апробированная для условий крупного месторождения в Восточной Европе методика [20] обеспечивает удовлетворение требований покупателей к качеству полезного ископаемого, в первую очередь теплоте сгорания угля. Она используется при добыче, транспортировке и усреднении, выборе оборудования и оптимизации технологических схем и их параметров.

К новейшим подходам в менеджменте качества относятся [21 – 24]:

- применение методов искусственного разума и распознавания образов при решении задач разделения угля и породы;
- использование имитационного моделирования, изометрического лог-отношения;
- конструирование интерактивной модели запасов на основе онлайн данных с различных датчиков.

При значительном количестве выполненных работ по управлению качеством добываемого угля ряд вопросов остается открытым. Выделим две причины такого положения: широко используемый подход к научно-техническому обеспечению функционирования уникальных объектов, когда из-за отсутствия системного взгляда отдельные технологические и бизнес-процессы не связываются между собой общими целями; традиционно недостаточный для принятия более рациональных решений уровень знаний о сложных угольных месторождениях как объектах управления, несмотря на то, что затраты на дополнительное изучение свойств угольных пластов в разы меньше потерь, которые несут при реализации проектов добывающие предприятия.

Разработку и реализацию мероприятий по управлению зольностью добываемого угля целесообразно осуществлять в рамках рассмотрения цепочки “георесурс – разрез – обогатительная фабрика” как единого информационного, технологического и организационного пространства [25]. В его пределах протекают разнообразные по сложности процессы, включающие: эксплуатационную доразведку и опережающее опробование месторождения; перспективное и текущее планирование горных работ; добычу угля с различным качеством из разных по производительности и условиям отработки забоев; подготовку угля к обогащению путем деления, объединения, смешивания; мониторинг качества. Цель их использования — создание условий для формирования более однородных качественно-количественных характеристик в угольных потоках перед подачей их на переработку или при отгрузке потребителям.

Для выявления дополнительных резервов совершенствования управления зольностью предложено оценивать зольность добываемого угля A^d по пяти составляющим: вмещающие породы кровли и почвы пластов A_1^d ; извлекаемые внутрипластовые породные и высокозольные прослойки A_2^d ; не извлекаемые по различным причинам породные и высокозольные прослойки A_3^d ; минеральные частицы, заполняющие часть трещин и порового пространства или вкрапленные по всей массе угля A_4^d ; материнские неорганические минеральные примеси A_5^d [26]. Такая дифференциация, учитывающая природное разубоживание угля минеральными примесями и образующееся при ведении горных работ технологическое разубоживание, позволяет повысить точность и достоверность оценки запасов угля. Это может способствовать улучшению процессов управления зольностью на основе применения широкого спектра решений, способов

и методов [25]. Данный комплекс сформирован путем анализа опубликованных и фондовых материалов, патентного поиска, разработанных подходов по рациональному планированию и ведению добычных работ на месторождениях. Рассмотрим на примере Эльгинского месторождения в Южной Якутии часть таких резервов, направленных на совершенствование процессов управления качеством угля на стадиях добычи и подготовки к обогащению.

Повышение полноты извлечения запасов угля с учетом зольности в приконтактных слоях сложных по строению пластов. Исследование характера распределения зольности угля в районах контактов вмещающих пород с кровлей и почвой четырех основных пластов месторождения показало, что средняя зольность метровых прикровельных частей пластов Н₁₅, Н₁₆, У₄ на 2.9–3.1 % ниже, чем в целом по этим же пластам [27]. Зольность таких же припочвенных частей Н₁₅ и У₄ ниже на 2.3–3.3 %, а по пласту Н₁₆ выше на 3.3 %. По пласту У₅ различий в значениях средней зольности в разных слоях по вертикали не установлено. Рассчитанные коэффициенты вариации (17.1–42.2 %) показывают высокий уровень изменчивости содержания минеральных примесей в угле по площади анализируемого участка в зоне первоочередной отработки месторождения, что хорошо иллюстрируется построенными картами зольности (рис. 1).

Наложение контуров границ отработки пластов на такие карты позволило рассмотреть и предварительно оценить возможности корректировки технологических и организационных процедур формирования потоков угольной массы с учетом наличия на участках зон с различной зольностью. По проекту при отработке месторождения и нормировании потерь и разубоживания различия пластов по зольности угля в приконтактных слоях не учитываются. При зачистке почвы мощных пластов и кровли с почвой остальных вместе с породой в отвалы вывозятся дефицитные марки коксующегося угля, формируя значительную часть эксплуатационных потерь. Рассчитано, что при срезании в кровле и почве основных пластов слоев угля мощностью 10 см теряется до 3.5 млн т балансовых запасов. Срезание такого же слоя вмещающих пород ведет к дополнительному разубоживанию угольной массы и увеличению общей зольности добываемого топлива на 1.4–3.1 %, что сопоставимо с диапазоном уменьшения зольности в приконтактных зонах. После технико-экономической оценки технологически разубоженную массу из областей с пониженной зольностью можно включать (или исключать) в общие потоки, направляемые на предварительное или основное обогащение.

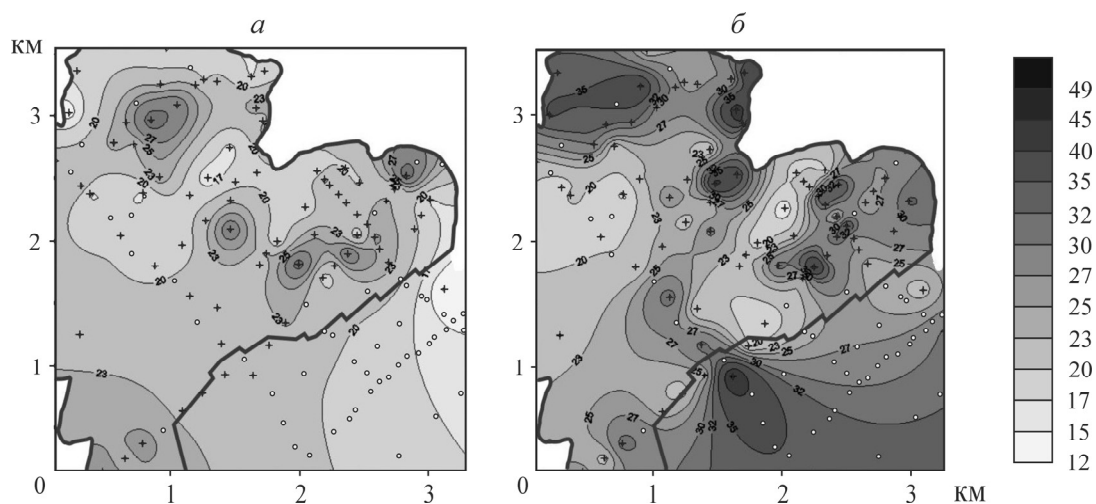


Рис. 1. Карты зольности прикровельного (а) и припочвенного (б) слоя пласта Н₁₆: +, о — скважины, участвовавшие и не участвовавшие в построении изолиний, соответственно. Жирной линией показана граница западного участка

Извлечение угля из пластов малой мощности или породных прослоев. Для большинства угольных месторождений Южно-Якутского бассейна при ведении открытых горных работ граничным условием для включения запасов в разряд балансовых является мощность в 1 м. Пласты меньшей средней мощности не подлежат самостоятельной выемке и вместе со вскрышными породами размещаются в отвалах. Анализ показывает, что за счет использования современной техники (бульдозеры, гидравлические экскаваторы, комбайны послойного фрезерования, комплексы глубокой разработки пластов) часть дефицитных марок К, КЖ и Ж коксующегося угля из этих пластов может быть извлечена.

Один из вариантов — способ, позволяющий извлекать часть забалансовых запасов практически без изменения порядка ведения открытых горных работ [28]. На участке угольного месторождения 1, представленном свитой пологопадающих пластов 2, имеется пласт 3 с запасами, относящимися к забалансовым из-за малой мощности пласта и/или высокой зольности (рис. 2). Такие пласты извлекаются вместе с породой вскрыши и могут являться причиной горения породных отвалов. Горные работы ведут при высоте уступа от почвы верхнего пласта до кровли нижнего. Пласт 3 находится в средней части уступа. При ведении буровзрывных работ скважины бурят на всю его высоту с перебуриванием пласта 3. Во время взрывных работ происходит рыхление массива горных пород и пласта 3 с частичным перемешиванием. Далее породу грузят с помощью экскаватора 4 в самосвалы 5, обрабатывая слои I и II. Верхнюю границу слоя III определяют по появлению в породе угольной мелочи в количестве 10–15%. Так же определяют и нижнюю границу этого слоя. При выемке слоя III смесь породы и угля пропускают через устройство 6 для отделения кусков породы от угольной мелочи. Порода попадает в самосвалы 5, а высокозольный уголь грузится в самосвалы 7, которыми вывозится на мобильную или стационарную обогатительную фабрику. Слои IV и V обрабатываются с погрузкой породы в самосвалы 5.

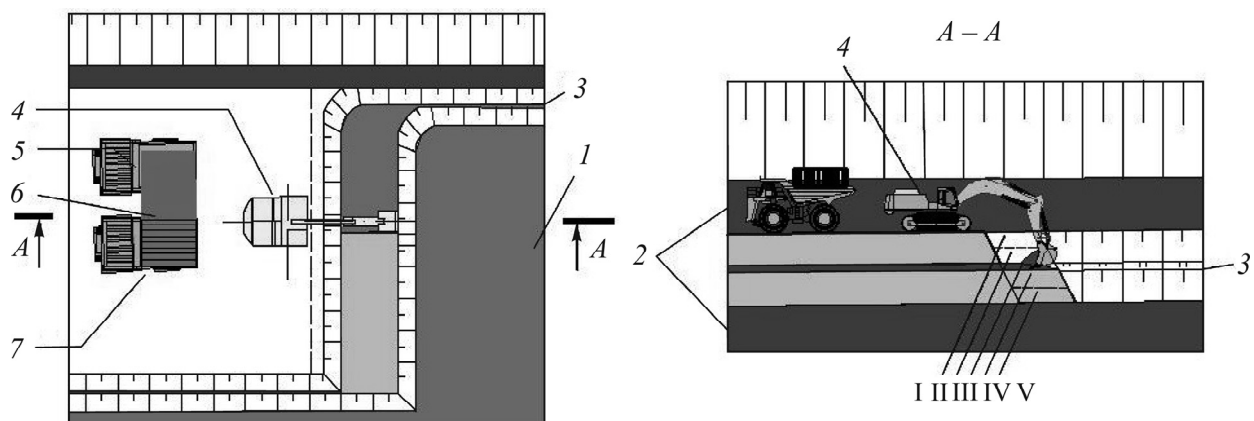


Рис. 2. Способ выемки угля из пластов малой мощности или некондиционных по зольности прослоев (зон) из угольных пластов: 1 — участок угольного месторождения; 2 — свита пластов; 3 — пласт угля с забалансовыми запасами; 4 — экскаватор; 5 — самосвалы для породы; 6 — устройство для отделения кусков породы от угля; 7 — самосвалы для угля

Селективное извлечение породных прослоев из пластов или раздельная выемка из зон с различной минерализацией. На Эльгинском месторождении по проекту используется валовый способ обработки угольных пластов с применением гидравлических экскаваторов, предполагающий выемку внутрипластовых породных прослоев совместно с чистыми угольными пачками.

Проведенные исследования [29] показали возможность организации простой (площадной) и сложной (по высоте добычного уступа горизонтальными или слабонаклонными слоями) раздельной выемки угля и породных прослоев из пластов со сложной структурой, сближенных и тонких мощностью более 0.2 м. Из изучения первичной геолого-маркшейдерской информации следует, что существуют устойчивые различия между общей пластовой зольностью угля A_n^d и зольностью без учета породных прослоев разной мощности, связанных с A_2^d и A_3^d . Разница средних значений между A_n^d и A_2^d по пластам Н₁₅, У₄, У₆, У₁₂–У₁₄, У₁₇ достигает 7.9–12.4%, а в отдельных зонах суммарные значения $A_2^d + A_3^d$ могут быть еще выше. Даже в более простых по строению пластах при средних значениях составляющей A_2^d на уровне 3.5–5.6% они могут превышать 10%.

При оценке перспектив применения того или иного вида селекции необходимо учитывать структуру мощностей породных прослоев в пластах совместно с характером их распределения по мощности. В среднем на 1 м мощности приходится от 0.3 (пласты Н₁₆ и У₅) до 1.1 (пласт Н₁₅) прослоев при среднем количестве на пластопересечение 3.0, 3.4 и 5.0 соответственно. В пластах нерюнгринской свиты на долю породных прослоев мощностью до 0.1 м приходится более 50% от их количества, ундытканской свиты — более 30% прослоев имеют мощности > 0.2 м (рис. 3).

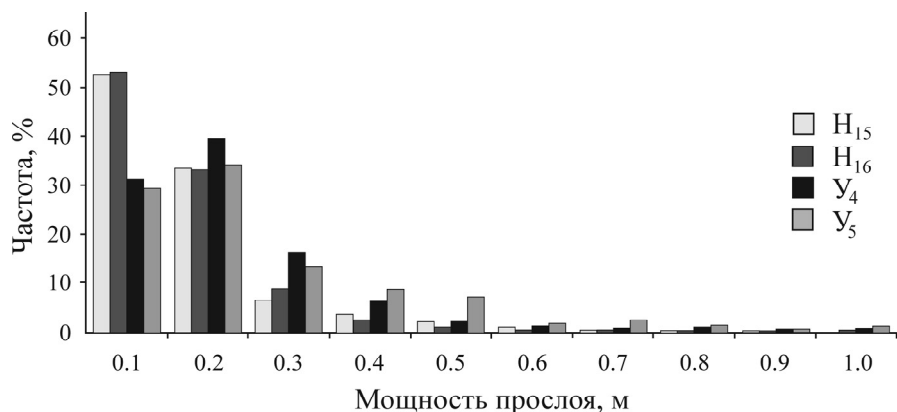


Рис. 3. Распределение мощности породных прослоев в основных пластах

Доступные для практического применения различные комбинации видов выемочной техники и технологических схем позволяют выполнять добычу угля с уровнем селекции от 0.05 до 0.2 м, причем по верхней границе без существенного снижения производительности. Учитывая, что основное количество породных прослоев рабочих пластов Эльгинского месторождения имеют мощность менее 0.1 м, их самостоятельная эффективная выемка затруднена. В этой ситуации следует дополнительно дифференцировать запасы угля в пластах на более однородные технологические зоны с повышенным или пониженным количеством прослоев для организации простой, сложной или комбинированной раздельной выемки и формирования, в случае необходимости, самостоятельных или объединенных угольных потоков.

При селективной выемке из пластов породных и высокозольных прослоев мощностью более 0.2–0.3 м, связанных с составляющей зольности A_2^d , отработке зон с повышенным количеством тонких прослоев, связанных с A_2^d и A_3^d , или локальных участков повышенной минерализации внутри пластов A_4^d может использоваться технологическая схема, показанная на рис. 4.

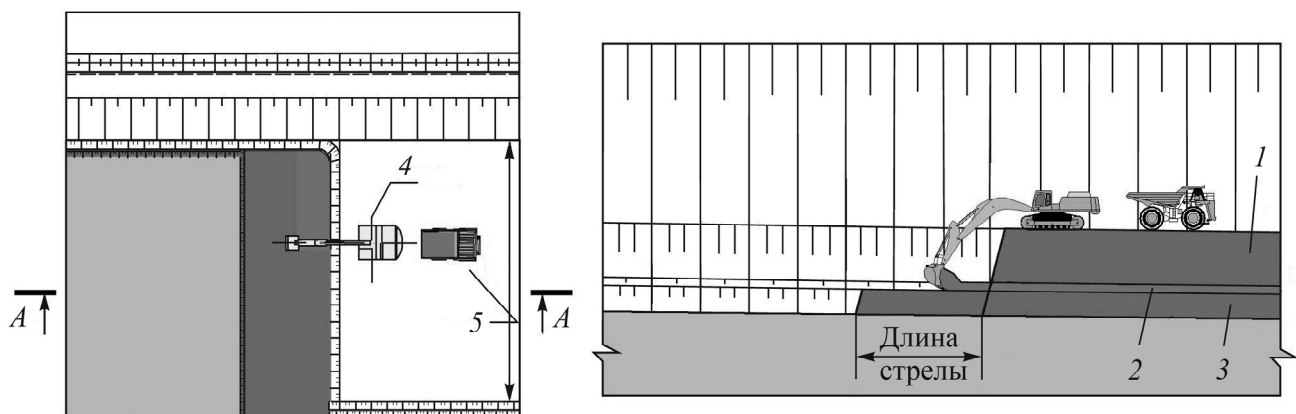


Рис. 4. Технологическая схема ведения отработки пласта с породным прослоем: 1 — верхняя угольная пачка пласта; 2 — породный прослой; 3 — нижняя угольная пачка пласта; 4 — экскаватор; 5 — самосвал

Способ подготовки к обогащению труднообогатимых углей. Особенностью районов криолитозоны с резко континентальным климатом, в том числе Южной Якутии, является то, что для весенне-осеннего периода здесь характерны многочисленные внутрисуточные циклы оттайки–заморозки. Возникающие в горных породах при фазовом переходе воды в лед внутренние напряжения могут приводить к существенному снижению энергоемкости их разрушения [29]. Это способствует изменениям гранулометрического состава углепородной смеси в сторону уменьшения крупных классов и увеличения степени раскрытия сростков угля с породой.

При разработке способа предварительной подготовки к процессам тяжелосредной сепарации и флотации добытых труднообогатимых углей, часть зольности которых связана со сростками угля с породой, легко сцементированными минеральными частицами по трещинам кусков угля и порам A_4^d [30], был учтен данный природный эффект. Добытый уголь для раскрытия его сростков с породой размещается слоями на промежуточном складе, расположенном на ориентированном на солнце склоне сопки (холма) или породном отвале, площадка которых имеет угол наклона $10–25^\circ$. Сырье подвергается в весенне-осенние периоды воздействию солнечной радиации с неоднократным числом циклов оттайки–заморозки и переходом температуры через 0°C . Мощность слоев угля принимают из расчета таким образом, чтобы было достаточно для суточного прогрева–охлаждения. После термической обработки и механического воздействия горных машин уголь отгружают со склада для последующей деминерализации на обогатительной фабрике.

Раздельная выемка угольных пачек пластов с разной зольностью. Анализ пространственного распределения породных прослоев внутри пласта Н₁₆ Эльгинского месторождения показал, что из-за повышенной концентрации в нижней области практически по всей площади зольность на 9.4% (8.3–11.4% по условно выделенным блокам) больше, чем в верхней. Руководствуясь этими данными, рекомендовано отработку данного пласта осуществлять с делением на подступы (для Н₁₆ на два) с формированием самостоятельных угольных потоков разной зольности и обогатимости [31].

Дополнительное изучение характера распределения породных и высокозольных прослоев в запасах месторождения, выполненное с применением горно-геологических информационных систем Mineframe и Micromine, позволило установить их повышенную или пониженную концентрацию в различных зонах и участках других пластов. Определена концентрация прослоев в нижней области практически по всей площади распространения пласта Н₁₆ и в сред-

ней части пласта У₅ (таблица). По пласту У₄ явного разделения не обнаружено, поскольку мощности зон сопоставимы с приконтактными областями угля в кровле и почве. Для более точной дифференциации и оценки различий по зольности пласты разделены по вертикали на 2–3 области и на 4–5 блоков по большой оси месторождения в направлении с северо-запада на юго-восток. В верхнюю часть включены данные интервального опробования по скважинам от кровли пласта до первого породного прослойка, в нижнюю — от последнего прослоя до почвы соответственно.

Характеристики выделенных частей пластов

Часть пласта	Н ₁₆		У ₄		У ₅	
	Мощность, м	Зольность, %	Мощность, м	Зольность, %	Мощность, м	Зольность, %
Верхняя	5.7	20.9	2.10	24.90	2.2	24.4
Средняя	—	—	5.00	37.40	5.9	30.1
Нижняя	3.9	30.3	1.35	23.42	2.5	20.2

Результаты анализа показали, что технологические процессы в цепочке “георесурс – разрез – обогатительная фабрика” в рамках единого технологического пространства открывают дополнительные резервы для управления составляющими зольности на этапах планирования и углеподготовки перед обогащением. Руководствуясь полученными данными, отработку сложных по строению пластов или их участков целесообразно осуществлять с делением на подступы и формированием самостоятельных угольных потоков разной зольности и обогатимости. При производственной необходимости возможно аккумулирование и временное хранение угля на промежуточных складах или на складах обогатительного производства с последующим формированием схожих по свойствам потоков полезного ископаемого и обогащением по скорректированным технологическим режимам для повышения выхода концентрата или достижения требуемого уровня зольности.

ВЫВОДЫ

Обоснована необходимость учета выявленных в прикровельных и припочвенных частях пластов зон с пониженной (повышенной) зольностью для более точной дифференциации этих участков по степени пригодности к отработке валовым или селективным способами и последующего формирования основных и вспомогательных угольных потоков с более однородным уровнем качества угля.

Показано, что при оценке перспектив простых (по площади) и/или сложных (по мощности) схем селективной выемки угля разного качества целесообразно учитывать вместе с потенциалом снижения зольности за счет отдельного извлечения породных прослоев потенциал, связанный со структурой, пространственным распределением и суммарными мощностями всех породных прослоев в пластах.

Разработаны способы, позволяющие повысить полноту и качество извлечения балансовых и забалансовых запасов: добычи угля из пластов малой мощности или некондиционных по зольности углепородных пропластков и предварительной подготовки труднообогатимых углей к обогащению с использованием природно-климатических особенностей районов ведения горных работ. Рекомендовано пласты и участки с устойчивыми различиями по структуре и зольности обрабатывать с делением на подступы с высотой, совпадающей с условными границами этих зон, и формированием самостоятельных угольных потоков разной зольности и обогатимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щадов М. И., Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений // Уголь. — 2003. — № 2. — С. 15–20.
2. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Метод и оценка эффективности дифференциации запасов ископаемых углей по свойствам обогатимости // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 94–108.
3. Колесников В. Ф., Корякин А. И., Стрельников А. В. Технология ведения выемочных работ с применением гидравлических экскаваторов. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009. — 143 с.
4. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. К выбору критерия соответствия качества угольной продукции требованиям потребителя // ГИАБ. — 2009. — № S5. — С. 90–101.
5. Косолапов А. И., Снетков Д. С. К вопросу управления качеством угля при разработке бурого углей месторождений Красноярского края // ГИАБ. — 2009. — № 8. — С. 110–116.
6. Сидорова Г. П. Методы оперативного контроля качества угля на Уртуйском бурого угельном разрезе // ГИАБ. — 2006. — № 12. — С. 141–145.
7. Lazăr M. and Faur F. Considerations on the influence of extraction technology of lignite in open pits over the production quality, SGEM, 2012, Vol. 1. — P. 503–510.
8. Земсков А. Н., Вишняк Б. А. К вопросу о создании автоматизированной системы усреднения качества угля на разрезе “Ангренский” ОАО “Узбекуголь” // Горн. вестн. Узбекистана. — 2008. — № 1 (32). — С. 41–42.
9. Kayabasi Ali, Turer D., Yesiloglu-Gultekin N., and Gokceoglu Candan. Spatial distribution of coal quality parameters with respect to production requirements: an adaptive neuro-fuzzy application for the Can coal field (Turkey), Geocarto Int., 2016, Vol. 31. — P. 193–209.
10. Badani-Prado M. A., Kecojevic V., and Bogunovic D. Coal quality management model for dome storage (DS-CQMM), J. of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2016, Vol. 116, No. 7. — P. 699–708.
11. Козлов В. А. Исследование значений показателя обогатимости для различных классов крупности угля Эльгинского месторождения // ГИАБ. — 2011. — № 5. — С. 127–130.
12. Авдохин В. М., Морозов В. В., Кузьмин А. В. Вакуумно-пневматическая сепарация труднообогатимых углей // Горн. журн. — 2008. — № 12. — С. 56–60.
13. Рубинштейн Ю. Б., Свонсон Э., Холужко М. Е., Шаоцян Ч., Цайя Д., Анастассакис Г., Боканьи Л., Сачдев Р. К., Бектурганов Н. С., Айбульдинов Е. К., Блашке В., Баик И., Де Корте Й. Д., Озбайоглы Г., Лорила М., Дженкинсон Д., Воробьев С. А. Современное состояние и тенденции развития углеобогащения в мире (обзор) // Горн. журн. — 2016. — № 6. — С. 4–55.
14. Корчевский А. Н. Исследование работы обогатительного комплекса на базе сепаратора СВП-5,5*1 на различных углях // Збагачення корисних копалин: научн.-техн. сб. — 2012. — № 51. — С. 108–113.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Oliver M. A. and Webster R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging, Catena, 2014, Vol. 113. — P. 56–69.
19. Секисов Г. В., Якимов А. А., Чебан А. Ю. Технологическая углеминеральная однородность // Вестн. ЗабГУ. — 2017. — Т. 23. — № 9. — С. 32–44.

20. **Benndorf J.** Application of efficient methods of conditional simulation for optimising coal blending strategies in large continuous open pit mining operations, *Int. J. of Coal Geology*, 2013, Vol. 112. — P. 141–153.
21. **Sun Z., Lu W., Xuan P., Li H., Zhang S., Niu S., and Jia R.** Separation of gangue from coal based on supplementary texture by morphology, *Int. J. of Coal Preparation and Utilization*, 2019.
22. **Karacan C. Ö. and Olea R. A.** Mapping of compositional properties of coal using isometric log-ratio transformation and sequential Gaussian simulation — a comparative study for spatial ultimate analyses data, *J. of Geochemical Exploration*, 2018, Vol. 186. — P. 36–49.
23. **Olea R. A. and Luppens J. A.** Mapping of coal quality using stochastic simulation and isometric logratio transformation with an application to a Texas lignite, *Int. J. of Coal Geology*, 2015, Vol. 152, Part B. — P. 80–93.
24. **Yüksel C., Thielemann T., Wambeke T., and Benndorf J.** Real-time resource model updating for improved coal quality control using online data, *Int. J. of Coal Geology*, 2016, Vol. 162. — P. 61–73.
25. **Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л.** Методика оценки природной и технологической составляющих зольности добываемого угля // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 88–100.
26. **Батугин С. А., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А.** Геотехнологические подходы к управлению составляющими зольности угля при разработке сложноструктурных месторождений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — Т. 3. — № 1. — С. 12–17.
27. **Батугин С. А., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А.** Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // Вестн. ЗабГУ. — 2016. — Т. 22. — № 10. — С. 20–29.
28. **Пат. 2514252 РФ.** Способ извлечения забалансовых запасов при разработке угольных пластов / П. Н. Васильев, В. Л. Гаврилов, Е. А. Хоютанов // Оpubл. в БИ. — 2014. — Бюл. № 12. — 5 с.
29. **Zakharov E. V. and Kurilko A. S.** Local minimum of energy consumption in hard rock failure in negative temperature range, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 284–287.
30. **Пат. 2514248 РФ.** Способ подготовки к обогащению труднообогатимых углей / С. М. Ткач, П. Н. Васильев, В. Л. Гаврилов // Оpubл. в БИ. — 2014. — Бюл. № 12. — 5 с.
31. **Хоютанов Е. А., Батугин С. А., Гаврилов В. Л.** Резервы управления природными и технологическими составляющими зольности угля сложноструктурных месторождений // Вестн. ЗабГУ. — 2017. — № 8. — С. 83–90.

Поступила в редакцию 22/V 2019

После доработки 28/V 2019

Принята к публикации 28/V 2019