

УДК 658 : 622.33

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРИРОДНОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗОЛЬНОСТИ ДОБЫВАЕМОГО УГЛЯ**

Е. А. Хоютанов, В. Л. Гаврилов

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: gvlugorsk@mail.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

На основе дифференциации зольности угля на составные части разработана методика оценки его общего (технологического и природного) разубоживания. Описана сформированная база данных неоднородного по качеству и строению Эльгинского угольного месторождения (Южная Якутия), использованная для построения моделей пластов, изучения изменчивости их параметров и свойств ископаемого в запасах. Приведены результаты оценки зольности, связанной с ведением горных работ и с выделенными природными группами минеральных примесей. Показана высокая изменчивость общей зольности угля и ее составляющих по площади пластов и в разрезе. Доля внутрипластовых прослоев разной мощности в структуре зольности в среднем может составлять 14–27 % и более. Угольные предприятия учитывают данный факт в недостаточной степени, что ведет к неполному использованию геологического потенциала сложнопостроенных месторождений. Отмечено, что ресурсосберегающее управление зольностью угля может осуществляться не только с акцентом на обогащение. На основе дополнительного изучения запасов возможно формирование новых резервов управления на стадиях планирования и ведения добычных работ, предварительной углеподготовки.

Уголь, зольность, разубоживание, Эльгинское месторождение, качество, изменчивость, оценка

DOI: 10.15372/FTPRPI20180509

Предприятия угольной отрасли в условиях высокой конкуренции между марками и сортами твердого топлива сталкиваются с необходимостью совершенствования своей работы для повышения эффективности производства. Необходимость улучшения уровня качества добываемого и отгружаемого угля постоянно возрастает. Успешному решению этой задачи противодействует ряд факторов, связанных с необходимостью вовлечения в эксплуатацию более сложных по строению и неоднородных по качеству месторождений, к которым относится и Эльгинское (Южная Якутия).

Мерой содержания в угле минеральных примесей (неорганического вещества) является величина зольности (индекс A), которая характеризует количество остатков после сжигания топлива в стандартных условиях и представляет одно из его основных потребительских свойств.

Обеспечение регламентируемой зольности коксующихся углей и значительной части энергетических достигается путем обогащения. При ведении добычных работ возможности предварительной подготовки угля к его переработке с целью повышения эффективности процессов

обогащения путем формирования более однородных по технологическим свойствам угольных потоков часто недооцениваются. Такой подход, допустимый при отработке простых по строению залежей, неприемлем для сложных месторождений из-за значительных количественных и качественных потерь сырья, возникающих в отдельных звеньях цепочек добычи, обогащения и поставок угля потребителям. В этой ситуации возникают объективные предпосылки для получения дополнительных знаний о природном и традиционном технологическом разубоживании (составляющие зольности) добываемого угля и разработки на этой основе способов совершенствования процессов управления его качеством.

Объектом исследования выбрано сложноструктурное Эльгинское месторождение коксующихся и энергетических углей, расположенное в Токинском районе Южно-Якутского бассейна. В частности детально разведанный «Южякутгеологией» участок «Северо-Западный» (площадь 62 км², запасы для открытых горных работ (ОГР) более 2.1 млрд т) и зона его первоочередной отработки, дополнительно оцененная при эксплуатационной доразведке «Мечел-Инжинирингом». При необходимости для более точного понимания вопроса, сравнения и сопоставления данных использовалась информация и по другим месторождениям России (Нерюнгринское, Апсатское, Элегесткое, ряда залежей Кузбасса) и мира.

Сведения об Эльгинском месторождении, полученные путем анализа основных материалов его геологического изучения, свидетельствуют о том, что по совокупности свойств коксуюемости и спекаемости и низкому содержанию вредных компонентов твердое топливо залежи относится к разряду одних из самых дефицитных на рынке коксующихся углей. Однако природная вариативность этих свойств в большинстве пластов, дополняемая высокой и очень высокой зольностью, трудной и очень трудной обогатимостью угля, оказывает негативное влияние на общую технологическую и экономическую ценность как рядового топлива, так и получаемого из него концентрата.

Эльгинское месторождение по совокупности горно-геологических условий, сложности строения и неоднородности качества угля в недрах является одним из наиболее сложных. Характер залегания пластов и высокая насыщенность углем продуктивной толщи определили возможность разработки месторождения открытым способом до пласта Н₁₅. Предназначенная для ОГР часть залежи мощностью более 200 м содержит 22 пласта и их самостоятельных пачек, в основном пологого залегания (2–5°). Пласты относятся к ундытканской (У) и нерюнгринской (Н) свитам, большинство из них включают от 1–2 до 10–12 породных и некондиционных по зольности прослоев различной мощности. До 90 % угля находится в пяти мощных пластах. Остальные относятся к тонким и средним (1–3 м).

Зольность угля по пластопересечениям варьирует в пределах от 7–8 до 40–45 % при преобладающих значениях в диапазоне 15–35 % и связана с высокой минерализацией самого угольного вещества и наличием в нем породных прослоев. Наличие на месторождении в основном высокозольных углей свидетельствует о невозможности их использования для технологических целей без обогащения. Богатимость угля различных классов крупности — от средней до очень трудной. Теоретический выход концентрата при плотности разделения 1400 кг/м³ по мощным пластам месторождения составляет по неокисленному углю 44.6–69.2 % при зольности 9.7–12.6 %. По мощным пластам Н₁₅ и У₄ выход концентрата 39–46 % при зольности 11–12 %. Отходы составляют 11.2–30.8 % с зольностью 77.7–83.8 %.

При подсчете запасов угля, пригодных для открытой добычи, использовались следующие условия: минимальная мощность пластов простого и сложного строения — 1.0 м; максимальная зольность угля с учетом 100 % засорения внутрипластовыми породными прослоями — 45 %; максимальная мощность единичного породного прослоя, включаемого в пласт для валового

вой выемки, — 1.0 м. Данные критерии, учитывающие окисленность пластов, их мощность, общую зольность угля в пластах без породных прослоев и с учетом их с мощностью 0.05 м, применяются при эксплуатационной доразведке. В условиях ужесточения требований потребителей к качеству угля, происходящих изменений в технологии и организации горных работ, введения в практику работы новых показателей целесообразна более точная дифференциация запасов по маркам и сортам с разной технологической и рыночной ценностью, в том числе и по зольности.

Горнодобывающая промышленность отличается от других отраслей тем, что изменчивость характеристик конечного продукта сильно зависит от природы исходного минерального сырья, реальные характеристики которого никогда не известны в точности и основаны лишь на данных опробования [1]. Эти данные часто бывают непредставительными, что ведет к дополнительным ошибкам при оконтуривании, подсчете и геометризации запасов [2]. В такой ситуации уровень обоснованности принимаемых технологических и организационных решений по управлению запасами минерального сырья и его потребительскими свойствами в процессе добычи и первичной переработки зависит от правильной интерпретации первичных геологических данных и адекватности используемых геологических моделей [2, 3].

Современные методы геостатистики при моделировании угольных месторождений со сложными геологическими условиями залегания и высокой изменчивостью показателей качества и геометрии пластов могут использоваться для изучения показателей качества угля в естественном залегании [4, 5]. Сочетая их реализацию с моделями процессов транспортировки и усреднения, можно адекватно подойти к планированию горных работ. Например, методика [6], апробированная на примере крупной угольной залежи в Восточной Европе, используется для изучения вариативности теплоты сгорания угля в процессе добычи, транспортировки и усреднения при оптимизации выбора оборудования и параметров геотехнологий с целью удовлетворения требований потребителей к качеству угля. Изучение проблемы получения шахтой штрафов из-за отсутствия менеджмента квалиметрических характеристик угля [7] показало, что отношение средних значений теплоты сгорания по добычным блокам, оцененных на этапе планирования с помощью кригинга, и реальных, полученных после добычи угля, в среднем совпадают на 70–75 %. Расхождения объясняются влиянием на качество рядового угля процессов разубоживания при ведении горных работ. Угольные компании США с целью повышения эффективности производственных процессов [8] используют метод “Шести сигм” [9], в основе которого лежат статистические данные максимального приближения к совершенству, целевым уровнем которого является достижение такого предела, когда число дефектов минимизируется до технологически возможного уровня. В рамках данной концепции предприятия разработали набор инструментов для решения задач повышения качества угля.

При выборе рациональных способов обогащения учитывается то, что показатель зольности формируется с участием минеральных включений вмещающих пласты пород и связанных с угольным веществом минеральных компонентов. Внешняя зола привносится путем намеренного или случайного включения пород кровли и почвы пластов при их разработке и отличается по физико-механическим свойствам от золы, связанной с минеральными включениями в самом угле. Для первой требуются относительно простые способы отделения. Характеристики поступающей угольной массы зависят от параметров добычных участков, очередности и порядка их отработки. При ограниченных возможностях обеспечения требуемого уровня качества непосредственно в забоях важным способом является межзабойное управление с усреднением на “колесах” и/или в штабелях [10, 11].

Дифференциация запасов основных пластов Эльгинского месторождения подтвердила природные различия сырья с крупностью более 13 мм по свойствам обогатимости и целесообразность его отнесения к категории труднообогащаемого, требующего отдельной переработки [12]. По сравнению с проектными решениями повышение выхода концентрата углей рассматриваемой залежи может быть достигнуто за счет дополнительного дробления при подготовке сырья к обогащению [13]. Из-за высокой сложности отдельных месторождений для улучшения используемых на практике процессов управления качеством целесообразна корректировка ГОСТ 10100-84 “Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости” [13, 14].

Изучение вопросов управления качеством коксующегося и энергетического угля сложноструктурных месторождений, в первую очередь Южной Якутии, показывает, что, несмотря на значительное количество выполненных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, ряд актуальных задач по выявлению резервов совершенствования процессов управления зольностью угля не рассмотрен, а ряд дублируется. Одной из причин сложившегося положения является такой подход к научному обеспечению уникальных объектов, когда отдельные технологические и бизнес-процессы не увязаны между собой общими целями. Более рациональному планированию и управлению препятствует недостаточный уровень знаний об особенностях эксплуатации сложнопостроенных и неоднородных по качеству месторождений. Несистемный подход к решению стоящих задач часто препятствует целостной оценке имеющихся в цепочке “месторождение – разрез – обогатительная фабрика” резервов для более рационального перераспределения управляющих воздействий между отдельными подсистемами и их элементами.

В основе такой оценки может лежать дополнительное изучение внутреннего строения пластов угля и выявление характерных особенностей распределения минеральных примесей в них. Понесенные затраты при этом, как правило, в разы меньше тех потерь, которые возникают у угледобывающих предприятий из-за принимаемых нерациональных геотехнологических и организационных решений.

При обработке больших объемов информации используются базы данных (БД), в которых формализуются и структурируются различные показатели и параметры для анализа, синтеза, обоснования и принятия решений. На основе материалов предварительной разведки Эльгинского месторождения для оценки и картирования его запасов сформированы специальные БД. На их основе с применением различных горно-геологических информационных систем (ГГИС) рядом организаций (Джон Т. “Бойд компани”, США, ООО “МикроМайн Раша”, Санкт-Петербург, ОАО “Мечел”, Москва, ИГД СО РАН, Новосибирск, ИГД УрО РАН, Екатеринбург) построены цифровые модели залежи, изучено ее строение и качество угля в пластах, рассмотрены различные аспекты их освоения [15 – 18].

Постановка задач, связанных с поиском дополнительных резервов повышения качества добываемого угля на основе более точной дифференциации запасов по типам и сортам, в том числе по зольности, потребовала использования максимально полного количества первичной геологической информации. Сформированная и зарегистрированная в Роспатенте “База данных по геологическому опробованию Эльгинского угольного месторождения” включает информацию по предварительной и детальной разведке по более 500 скважинам и 250 разведочным канавам (таблица). БД состоит из 6 основных взаимосвязанных таблиц, созданных в Microsoft Excel, в которых хранятся верифицированные данные о местонахождении разведочных выработок в пространстве и данные их интервального опробования по ряду показателей качества. БД пополняется материалами проводимой в настоящее время эксплуатационной доразведки и опережающего опробования, а ее структура разработана таким образом, чтобы данные можно было без особых затруднений импортировать в ГГИС и другие программные продукты.

Мощность и зольность основных пластов Эльгинского месторождения

Показатель		H ₁₅	H ₁₆	У ₄	У ₅
Всего скважин, шт.	Месторождение	496	423	357	319
	Первоочередный участок	110/76	94/76	72/61	65/56
Средняя мощность пласта, м	Месторождение	4.8	9.8	8.1	9.9
	Первоочередный участок	4.0/4.0	10.3/10.5	10.4/10.5	8.7/8.9
Коэффициент вариации мощности, %	Месторождение	24.5	26.0	43.3	34.1
	Первоочередный участок	11.7/10.5	18.1/18.0	13.3/13.6	41.1/42.0
Средняя зольность по пласту, %	Месторождение	36.3	25.5	31.6	26.6
	Первоочередный участок	37.0/37.4	24.3/24.7	27.8/27.6	26.6/26.1
Коэффициент вариации зольности, %	Месторождение	13.1	25.2	22.1	27.0
	Первоочередный участок	15.4/15.6	14.8/15.2	15.0/13.8	25.6/22.4

Для выявления и устранения ошибок при формировании БД использован экспертный и машинный анализ данных, на основе которого принимаются решения об исключении записей, внесении недостающей информации и т. д. Проверка сведений на присутствие различных ошибок осуществляется на разных этапах использования БД: при вводе информации; средствами системы управления БД; при манипуляциях с данными (расчеты, построение графиков и диаграмм, создание визуальной модели и др.).

При разведке, проектировании и эксплуатации месторождения одним из основных документов для принятия технических и технологических решений является его геологическая модель, описывающая закономерности размещения вмещающих пород и угля, их свойств в пространстве. С применением использованных при исследовании ГГИС Mineframe [19] и Micromine [20] построены базовые каркасные, векторные и блочные трехмерные модели всех угольных пластов и их самостоятельных пачек. Выполнен ряд процедур геотехнологического картирования, учитывающих особенности распределения полезных и вредных компонентов.

Для более глубокого изучения характера, неоднородности и особенностей распределения зольности угля в запасах в зоне первых лет отработки Эльгинского месторождения, включающей основные рабочие пласты H₁₅, H₁₆, У₄, У₅, имеющей наиболее плотную сеть разведочных выработок и содержащей наибольшее количество информации, выделен участок площадью 2.5 × 3.0 км (рис. 1). БД после оцифровки бумажных носителей дополнена предоставленными ОАО ХК «Якутуголь» схемами с данными скважинного колонкового опробования и каротажными диаграммами по комплексу геофизических методов, использованных «Южякутгеологией» при детальной разведке. На выбранном участке расположено 110 скважин, пересекающих каждый из четырех пластов в 65 – 110 случаях.

Поиск резервов улучшения управления зольностью угля привел к тому, что было сделано предположение о целесообразности учета при планировании и организации работ не только технологического разубоживания, формируемого в основном в забоях, но и природного. Природное разубоживание угля — это разубоживание оцененных запасов минеральными компонентами в массиве, обусловленное условиями угленакопления, дальнейшего образования угольных месторождений, пространственной изменчивостью морфологии, мощностей и внутреннего строения угольных пластов, требованиями подсчета и оконтуривания запасов.

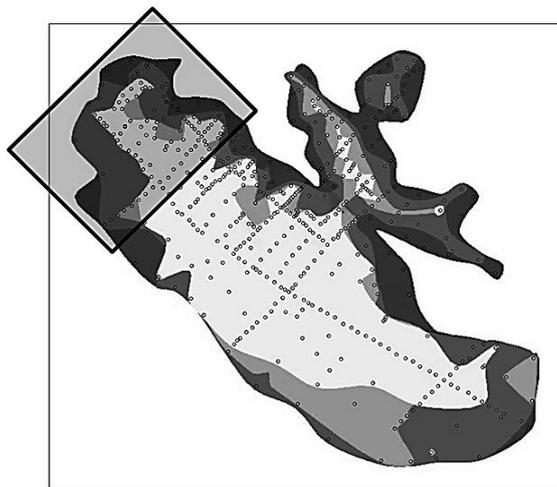


Рис. 1. План Эльгинского месторождения (прямоугольником выделен первоочередной участок)

Учитывая особенности образования природного разубоживания угля, накопленные знания по изучению угольных месторождений Южной Якутии в целом и Эльгинского в частности, тенденции развития техники и технологий добычи и обогащения угля, объективную необходимость повышения качества добываемого угля, предлагается формализовать его зольность в оконтуренных и оцененных запасах [21] с введением следующих обозначений: A^d — зольность планируемого к добыче или добываемого угля, %; A_{Π}^d — зольность угля в балансовых запасах по пластопересечениям, %; A_1^d — составляющая зольности, связанная с влиянием примешиваемых вмещающих пород кровли и почвы пластов (в первую очередь относится к технологическому разубоживанию), %; A_2^d — составляющая зольности, связанная с извлекаемыми внутрипластовыми породными и высокозольными прослойками, %; A_3^d — составляющая зольности, связанная с породными и высокозольными прослойками, не извлекаемыми по различным причинам, в том числе из-за ограничений по селективному извлечению современными технологиями, %; A_4^d — составляющая зольности, связанная с минеральными частицами песка, глины и пыли, вкрапленными по всей массе угля, заполняющими часть трещин и порового пространства, %; A_5^d — составляющая зольности, связанная с минеральными примесями в материнском органическом веществе.

Зольность в пласте A_{Π}^d , относящуюся к природной (природное разубоживание), представим формализовано в виде

$$A_{\Pi}^d = A_2^d + A_3^d + A_4^d + A_5^d .$$

Исходя из этого, для зольности планируемого к добыче или добываемого угля A^d по составляющим природного и технологического разубоживания справедливо следующее выражение:

$$A^d = A_1^d + A_{\Pi}^d = A_1^d + (A_2^d + A_3^d + A_4^d + A_5^d) .$$

Приведенные символические выражения не являются строго математическими. Это связано с тем, что угольное вещество в пластах представлено большим числом разнообразных форм и их сочетаний. Оценка составляющих минеральных примесей, условно характеризуемых зольностью, связана с особенностями оконтуривания, выбора параметров бурения и извлече-

ния керна, методики опробования, отбора, деления, сокращения и подготовки проб, проведения лабораторных исследований. Данная методическая дифференциация зольности включает ряд последовательно-параллельно реализуемых этапов (рис. 2) и является логической основой для изучения характера распределения минеральных примесей в угле на разных участках и пластах месторождения, построения технологических карт качества, более точной дифференциации запасов по типам и сортам, решения других задач по управлению качеством.

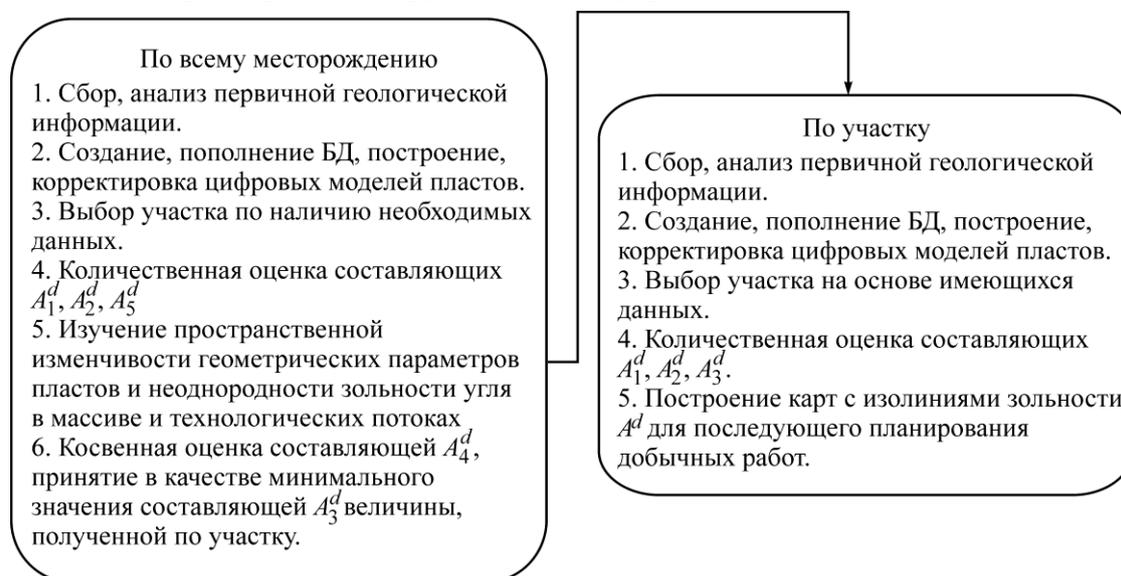


Рис. 2. Порядок оценки природного и технологического разубоживания добываемого угля

Рассмотрим подробнее каждую из составляющих природного и технологического разубоживания и использованные методы их оценки.

Вмещающие породы кровли, почвы пластов (A_1^d) [22]. Данная составляющая связана с традиционным понятием засорения некондиционным топливом и пустой породой добываемого угля. С помощью ГИС Mineframe проведена оценка влияния A_1^d на общую A^d и уровень потерь при добыче по пяти вариантам отработки зон контактов угля с породой [23]. Наименьшее разубоживание (3.7 – 16.4 %) возникает при селективной отработке пластов. При этом же варианте и самая низкая зольность. Разубоживание угля при валовой выемке варьирует от 4.9 до 25.8 %. Для пластов характерна площадная дифференциация зольности. При средней A_{Π}^d по пластам H_{15} — 37.4 %, H_{16} — 24.7, $У_4$ — 27.6 и $У_5$ — 26.1 % коэффициенты вариации зольности составляют 15.5, 15.1, 13.7 и 22.2 %. Применение Micromine и Golden Software Surfer 8 с использованием различных методов геостатистики позволило подробнее изучить различия по зольности угля и визуализировать их в виде карт (рис. 3). В рамках локальной задачи достоверность и сопоставимость построений, полученных разными методами, не определялись, предполагалось показать лишь наличие или отсутствие различий, которые можно использовать при принятии решений, связанных с управлением качеством угля при добыче.

Извлекаемые внутрислоевые породные и высокозольные прослойки (A_2^d). Пласты Эльгинского месторождения характеризуются наличием различного количества прослоев мощностью 0.05 – 1.00 м. Существующими геотехнологиями они могут быть извлечены с разным уровнем эффективности [23 – 25]. A_2^d рассчитывается напрямую по данным интервального скважинного опробования как разница между зольностью общей и без учета засорения просло-

ями. Оценка A_2^d в ряде случаев затруднена из-за сложной структуры пластов и погрешностей, возникающих при изучении маломощных прослоев и ограниченных по площади линз. Из-за этого возникает необходимость учета не только зольности самих прослоев, их мощности (рис. 4), стратиграфии, количества, концентрации, но и ее увязки с другими составляющими при управлении. A_2^d на выделенном участке по основным пластам в целом оценена в 1.9–6.2%. Аналогично A_1^d построены карты зольности составляющей A_2^d , свидетельствующие о различиях между пластами и по площади пластов (рис. 5).

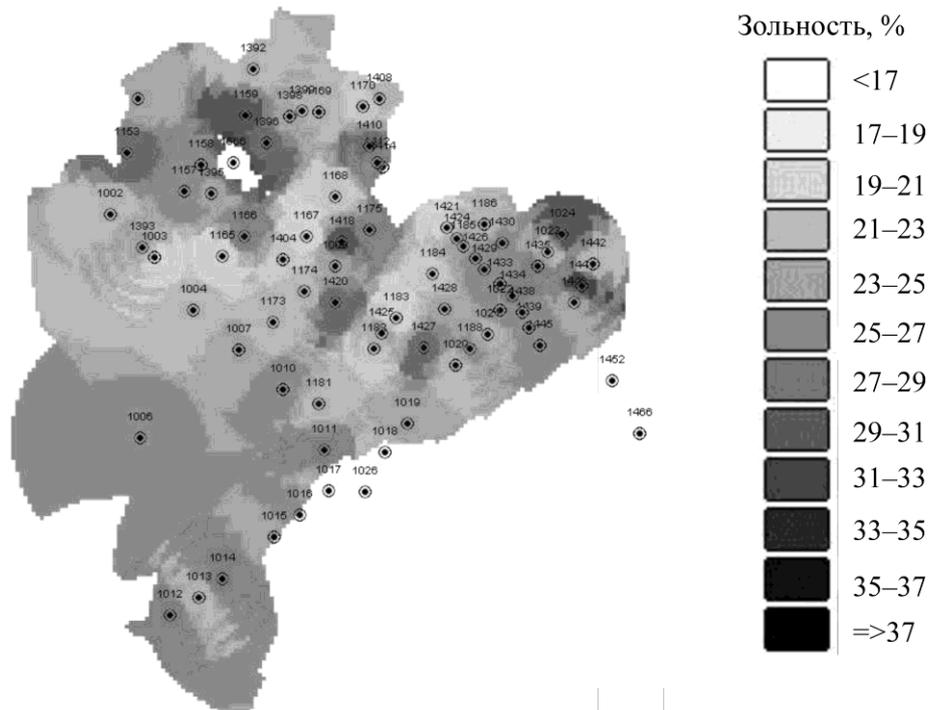


Рис. 3. Зольность угля A_{II}^d (по пласту N_{16} на первоочередном участке Эльгинского месторождения)

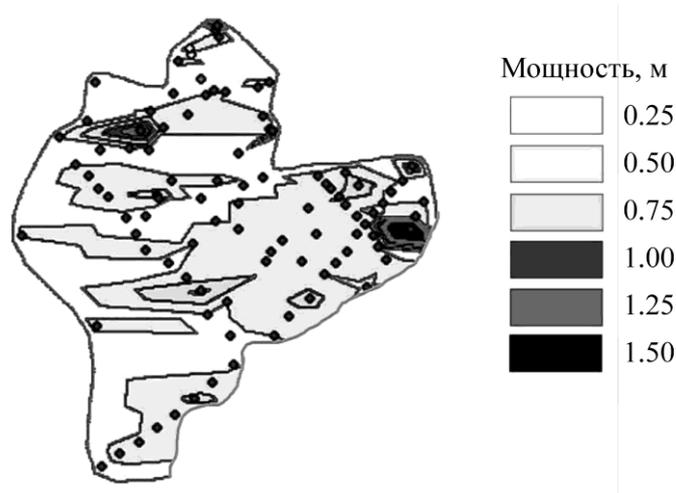


Рис. 4. Изолинии мощности породных прослоев по пласту N_{16} на первоочередном участке

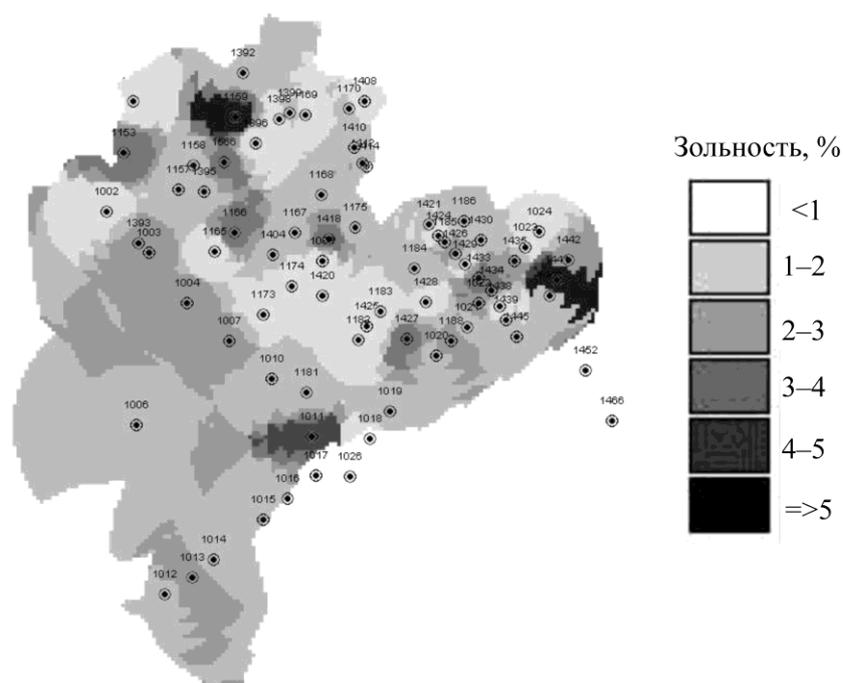


Рис. 5. Зольность угля A_2^d по пласту N_{16} на первоочередном участке

Породные и высокозольные прослойки, не извлекаемые по различным причинам (A_3^d) [26]. Составляющая практически не учитывается при подсчете запасов и выпадает из поля зрения при планировании добычи в режиме управления качеством. Из практики известно, что тонкие прослойки могут оказывать влияние на качество извлекаемого угля и процессы обогащения. Способом, позволяющим косвенно оценить количество и мощность таких прослоев в пластах и степень их влияния на общую зольность угля, является использование информации, получаемой при разведке залежей комплексом геофизических методов, включающих селективный гамма-гамма каротаж (мГГК) и его усовершенствованную модификацию (мГГК-С_{одн}), использующую геометрию однократного рассеяния. Для изучения A_3^d и подсчета неучитываемых породных прослоев и линз мощностью менее 5 см оцифрованы и проанализированы геофизические диаграммы по скважинам. Зольность прослоев принималась за 100 %. Не учитывались прослойки с неоднозначными исходными данными. A_3^d по основным пластам месторождения оценивается в диапазоне 1.5–3.4 %. Реальная картина, вероятнее всего, отличается в сторону увеличения и будет сопоставима с A_2^d . Построенные карты изолиний свидетельствуют о том, что по каждому пласту имеется неравномерное распределение A_3^d по площади участка. Есть зоны, где составляющая практически равна нулю и ею можно пренебречь, а есть участки, где ее вклад в общую зольность равен 3–5 %.

Минеральные частицы, заполняющие часть трещин и порового пространства, вкрапленные по всей массе угля (A_4^d) [27]. По сравнению с A_1^d , A_2^d , A_3^d корректная оценка A_4^d требует глубокого понимания природной сути самого угольного вещества, форм, видов нахождения в нем минеральных примесей, учета их взаимного проникновения. Это может быть достигнуто за счет применения различных методов исследований: термической обработки проб угля [28],

микроструктурного анализа [29]; исследования связей зольности с химическим и минеральным составом угля [30], привнесенной биомассой [31]; сканирующей электронной микроскопии [32] и др. Теоретические подходы к оценке A_4^d должны учитывать: природу образования в угле и вмещающих породах трещин и пор, их заполнения минеральным веществом; трансформацию в процессах углеобразования; данные по другим составляющим природной зольности. Продолжая использование формализмов для описания зольности, можно говорить о некоторой сумме составляющих A_4^d , изучение которых затруднено ввиду сложности оценки всех параметров дисперсной системы. Понимание природы формирования A_4^d позволит расширить знания о природном разубоживании угля. Содержание минеральных примесей в углях по трещинам, порам и вкраплениям может колебаться в широких пределах даже на смежных участках пластов. На данном этапе исследования имеется лишь косвенная оценка этой составляющей на основе учета влияния других составляющих зольности угля.

Материнские неорганические примеси (A_5^d) представляют собой срастания зерен минералов с органическими компонентами и неорганическую компоненту в образующих уголь растениях. Избавиться от них современными технологиями обогащения угля очень сложно. По оценкам ряда авторов, A_5^d для углей может составлять от 1–2 до 4.7–6.5 %. Для 20 месторождений мира, схожих с Эльгинским по геологическому возрасту и условиям угленакопления, установлена корреляционная связь между содержанием Al_2O_3 и SiO_2 в составе золы и зольностью угля [33]. Свободные члены уравнений регрессии могут характеризовать теоретический предел по золе при обогащении средне- и высокзолного угля традиционными физическими методами. По имеющимся данным о составе золы Эльгинского месторождения выполнен аналогичный анализ; A_5^d может находиться на уровне 2–3 % (по нерюнгринской свите до 1 %, по ундытканской до 3 %).

Оценка реального вклада каждой составляющей в общую зольность существенно затруднена по следующим причинам. Разные участки пластов и сами пласты заметно различаются по данному показателю качества. Долевое участие в запасах изученных составляющих зольности имеет широкий диапазон колебаний, причем не только междупластовых, но и в пределах одного пласта, его отдельных выемочных участков. Разные части одного и того же пласта существенно различаются по количеству, мощности и составу прослоев, линз и вкраплений.

Наряду с A_1^d учет особенностей и закономерностей образования составляющих A_2^d и A_3^d , детализируемых в пределах участков и пластов месторождения, ведет к снижению неопределенности исходной геологической информации, улучшению уровня изученности планируемых к отработке запасов для выявления резервов повышения эффективности их освоения. Результат предварительной оценки свидетельствует о том, что на долю A_2^d и A_3^d в структуре зольности приходится 14.0–27.4 % (3.7–9.2 % абс.). Составляющими A_1^d , A_2^d и A_3^d можно управлять с применением различных видов техники и технологий при планировании и ведении добычных работ, предварительной подготовке угля к обогащению в разрезе. Оценка составляющей зольности A_4^d по причине множества затруднений ее определения в настоящее время дана только теоретически. Основная нагрузка на управление данной составляющей переносится на стадию обогащения угля. В то же время при ведении добычи и предварительной углеподготовке в разрезе возможно проведение работ, связанных с изменением гранулометрического состава угля

в сторону его уменьшения для дополнительного раскрытия трещин и пор угольного вещества. Возможными вариантами при этом могут быть использование более плотной взрывной сети для рыхления угля, применение комбайнов послойного фрезерования. Управление составляющей A_5^d с применением существующих физико-механических технологий обогащения в настоящее время практически невозможно, а физико-химических затруднено по технико-экономическим причинам.

ВЫВОДЫ

Предложен подход к дифференциации зольности угля сложноструктурных месторождений типа Эльгинского, учитывающий его природное и технологическое разубоживание, особенности углеобразования, структуру и формы нахождения неорганического вещества в угле, расширенное понимание механизмов изменения его качества при переходе от запасов к потокам, формируемым при добыче и обогащении угля.

Разработана методика оценки зольности угля по пяти составляющим: A_1^d — пустые породы кровли и почвы пласта, зон нарушенности; A_2^d — извлекаемые внутрипластовые породные и высокозольные прослойки; A_3^d — не извлекаемые по различным причинам прослойки; A_4^d — минеральные частицы, вкрапленные по всей массе угля, заполняющие часть трещин и пор; A_5^d — материнские неорганические минеральные примеси. Оценка составляющих технологического и природного разубоживания добываемого угля Эльгинского месторождения показала, что на долю породных и высокозольных прослоев разной мощности в структуре его зольности приходится в среднем 14.0–27.4 % при высокой изменчивости общей зольности угля и ее составляющих по площади пластов и в их разрезе.

Полученные знания о качестве и структуре запасов сложнопостроенного и неоднородного по потребительским свойствам месторождения являются основой для разработки дополнительных мероприятий, повышающих качество добываемого и поставляемого на конкурентные рынки угля, полноту его извлечения и ресурсосберегающего использования.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность д-ру техн. наук профессору С. А. Батугину за поддержку, советы, помощь и замечания при выполнении исследований, результаты которых частично изложены выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Snowden D. V., Glacken I., and Noppe M.** Dealing with demands of technical variability and uncertainty along the mine value chain, Publication Series, Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2002, No. 8. — P. 93–100.
2. **Батугин С. А., Черный Е. Д.** Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. — Новосибирск: Наука, 1998. — 344 с.
3. **Vann J.** Turning geological data into reliable mineral resource estimates. In: Davies, T., and Vann J., The Estimation and Reporting of Resources and JORC: The Role of Structural Geology, AIG Bulletin 42m The Australian Institute of Geoscientists (Perth), 2005. — P. 9–16.
4. **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.

5. **Oliver M. A., Webster R.** A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging, Catena, 2014, Vol. 113. — P. 56–69.
6. **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.
7. **Hindistan M. A., Tercan A. E., and Ünver B.** Geostatistical coal quality control in longwall mining, Int. J. of Coal Geology, 2010, Vol. 81, Issue 3. — P. 139–150.
8. **Розгоний Т. Г., Оздемир Л., Харджитай Р. и др.** Угольная промышленность США в 2006 г. — от добычи угля до его использования // Глюкауф. — 2007. — № 1. — С. 64–72.
9. **Джордж Л. Майкл.** Бережливое производство + шесть сигм: Комбинируя качество шести сигм со скоростью бережливого производства: пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. — 360 с.
10. **Ботвинник А. А.** Интегрированная модель управления качеством выходного потока угля при открытой разработке свиты пластов // ФТПРПИ. — 2010. — № 3. — С. 63–72.
11. **Beretta F. S., Costa J. F., and Koppe J. C.** Reducing coal quality attributes variability using properly designed blending piles helped by geostatistical simulation, Int. J. of Coal Geology, 2010, Vol. 84, Issue 2. — P. 83–93.
12. **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.
13. **Козлов В. А.** Показатель обогатимости, как инструмент исследования фракционного состава угля // ГИАБ. — 2010. — № 9. — С. 13–18.
14. **Антипенко Л. А.** Методы оценки обогатимости углей // Уголь. — 2018. — № 4. — С. 69–74.
15. **Гончарова Н. В.** Структурирование запасов угольных месторождений сложного строения по уровням качества // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 165–172.
16. **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.
17. **Ботвинник А. А.** Компьютерное картирование угольного пласта по векторному показателю качества // ГИАБ. — 2004. — № 9. — С. 229–232.
18. **Лаптев Ю. В., Яковлев А. М.** Перспективы управления качеством сырья на Эльгинском месторождении каменного угля // ГИАБ. — 2010. — № 12. — Вып. 4. — С. 83–95.
19. **Лукичев С. В.** Опыт института в создании программных средств решения задач горной технологии // ГИАБ. — 2017. — № S23. — С. 19–31.
20. **Сапронова Н. П., Федотов Г. С.** Особенности моделирования пластовых месторождений в среде ГГИС Micromine // ГИАБ. — 2018. — № S1. — С. 38–45.
21. **Батугин С. А., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А.** Зольность как фактор управления качеством угля при разработке сложноструктурных месторождений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — № 1. — Т. 1. — С. 56–62.
22. **Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л.** Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // Вестн. ЗабГУ. — 2016. — Том 22. — № 10. — С. 20–29.
23. **Ермаков С. А., Хосоев Д. В., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А.** Оценка разубоживания и потерь угля при валовой и селективной разработке сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения // Горн. пром-сть. — 2012. — № 6. — С. 50–52.

24. **Геотехнологии** открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / отв. ред. С. М. Ткач. — Новосибирск: Гео, 2013.
25. **Чебан А. Ю.** Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Изв. Тульского ГУ. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 247–254.
26. **Батугин С. А., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А.** Оценка влияния тонких породных прослоев на зольность угля Эльгинского месторождения // Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 4. — С. 1–15.
27. **Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л., Батугина Н. С.** О влиянии трещиноватости на зольность южно-якутских углей // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск, 2017. — Т. 2. — С. 596–602.
28. **Fallavena V. L. V., de Abreu C. S., Inácio T. D., Azevedo C. M. N., Pires M., Ferret L. S., Fernandes I. D., and Tarazona R. M.** Determination of mineral matter in Brazilian coals by thermal treatments, *Fuel Proc. Technology*, 2014, Vol. 125. — P. 41–50.
29. **Mares T. E., Radliński A. P., Moore T. A., Cookson D., Thiyagarajan P., Pavsky J., Klepp J.** Location and distribution of inorganic material in a low ash yield, subbituminous coal, *Int. J. of Coal Geology*, 2012, Vol. 94. — P. 173–181.
30. **Vassilev S. V., Kitano K., and Vassileva C. G.** Relations between ash yield and chemical and mineral composition of coals, *Fuel*, 1997, Vol. 76, No. 1. — P. 3–8.
31. **Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., and Vassileva C. G.** An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, 2013, Vol. 105. — P. 40–76.
32. **Liu Y., Gupta R., Sharma A., Wall T., Butcher A., Miller G., Gottlieb P., and French D.** Mineral matter-organic matter association characterisation by QEMSCAN and applications in coal utilisation, *Fuel*, 2005, Vol. 84. — P. 1259–1267.
33. **Wang W., Hao W., Xu S., Qian F., Sang S., Qin Y.** Ash limitation of physical coal beneficiation for medium-high ash coal — a geochemistry perspective, *Fuel*, 2014, Vol. 135. — P. 83–90.

Поступила в редакцию 13/VII 2018