

УДК 622.271.3; 622.7.017

**К РАЗВИТИЮ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ
ЗАПАСОВ УГЛЕЙ ПО УРОВНЯМ КАЧЕСТВА**

Е. В. Фрейдина^{1,2}, А. А. Ботвинник², А. Н. Дворникова²

¹Новосибирский государственный университет экономики и управления,
E-mail: evfreydina@socio.pro, ул. Каменская, 52, 630099, г. Новосибирск, Россия

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

Обоснован подход к развитию геолого-технологического картирования запасов по уровням качества на основе геоинформационной модели месторождения. Изложены алгоритм и методы выделения на площади пласта кластеров с применением векторного показателя, состоящего из единичных показателей, определяющих полезные и вредные свойства углей. Приведены результаты апробации разработанного программного обеспечения: распределение запасов углей для коксования и энергетики по уровням качества и визуализация выделенных кластеров путем построения карт качества.

Уровень качества, тип показателя качества, кластер запасов месторождения, карта качества, метод “жесткой” и “гибкой” кластеризации

DOI: 10.15372/FTPRPI20180308

В условиях высокой конкуренции на рынке органического топлива и требований к качеству энергетических и коксующихся углей геолого-технологическое картирование запасов месторождений следует рассматривать как необходимую информационную основу для принятия решений на стадиях проектирования, планирования и управления производством угольной продукции. Изучение и графическое отображение пространственной изменчивости вещественного состава, физико-механических и технологических свойств полезных ископаемых с последующим выделением и отстройкой на площади залежи контуров запасов, отличающихся качеством, сложностью структуры и крепостью пород, входит в его функции [1, 2]. Логика выбора основного свойства качества ископаемых углей для картирования запасов месторождения определяется критериями, обоснованными несколькими подходами к оценке качества углей как топливно-технологической продукции. Так, обязательным условием для геолого-технологического картирования запасов ископаемых углей является определение их принадлежности к маркам и технологическим группам. Стандартная маркировка углей установлена с целью их рационального промышленного использования. В основу такого разделения углей положены показатели, характеризующие изменение свойств углей в процессе термического воздействия на них [1].

Работа выполнена в соответствии с Планом НИР ИГД СО РАН на 2017–2019 гг. (проект № 0321-2016-000).

Так, на основе картирования каменноугольных запасов по марочной принадлежности, начиная от антрацита (марки А) до длиннопламенных (марки Д), выстроена классификация углей. Разделительными признаками в ней выступают выход летучих веществ на сухое беззольное топливо V^{daf} и высшая теплота сгорания на сухое беззольное топливо Q_s^{daf} . Классификация углей по маркам отражает природу их генезиса и степень метаморфизма.

К стандартной процедуре геолого-технологического картирования запасов углей относится и выделение технологических групп, отличающихся по спекающейся способности, определяемой толщиной пластического слоя y и величиной усадки x углей. К буквенному обозначению марки прибавляется цифра, указывающая низшее значение толщины пластического слоя в данных углях, например Г6, Ж21, К9, К6 и др. На месторождениях каменных углей, как правило, выделяется две-три марки углей, с последующим разделением каждой марки по технологическим группам [3, 4].

Наряду с общепринятым подходом к геолого-технологическому картированию запасов в связи с высокой изменчивостью содержания минеральной составляющей в углях (зольность A^d) в пределах выделенных технологических групп, распространена дифференциация запасов с определением зон с низко-, средне- и высокозольными углями. Такой подход вызван, с одной стороны, целями повышения эффективности обогащения, а с другой — снижением объемов обогащения за счет выделения малозольных углей в отдельный поток. Дифференциация запасов по уровням зольности позволяет соизмерить качество выходящего из карьера потока углей с возможностями технологии обогащения для получения малозольного концентрата, а также оценить целесообразность введения селективной выемки углей для исключения из добываемой угольной массы внутренних прослоев породы в угольной залежи. К развитию геолого-технологического картирования следует отнести дифференциацию запасов углей в контурах месторождения по категориям обогатимости на легко-, средне- и труднообогатимые [5, 6]. Установление пространственного скопления углей с разными свойствами обогатимости предполагает их селективную обработку и раздельное обогащение. Следствием такой организации добычных работ и обогащения является доказанное теорией и практикой повышение выхода концентрата [7].

Для оценки качества углей с позиции использования их как ресурсов для энергетики или коксохимии немаловажен характер связи между их полезными (позитивными) и вредными (негативными) свойствами [3]. К позитивным свойствам для коксующихся углей относится спекаемость, выраженная толщиной пластического слоя, для энергетических — теплота сгорания углей, а негативными для обоих видов углей является содержание вредных примесей (зола, серы и т. д.), влажность и др. Проведено исследование связей между спекаемостью и зольностью для коксующихся и между теплотой сгорания и зольностью — для энергетических углей. Принятие позитивного и негативного показателей позволяет перейти к установлению уровней качества сырьевой продукции. К первому уровню относятся наилучшие угли из имеющихся в запасах месторождения. Они имеют наибольшее значение позитивного (например, толщина пластического слоя) и наименьшее значение негативного (например, зольность) показателей качества. На каждом следующем по иерархии уровне качества значение позитивного показателя снижается, а негативного возрастает. Для каждого угольного месторождения выстраивается иерархия уровней качества [6]. При выходе товарных углей на рынок уровень качества оценивается сопоставлением показателей качества с образцами продукции, облада-

ющей наибольшей конкурентоспособностью. Для готовой угольной продукции уровень ее качества определяется как “относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей” [8].

Для обозначения выделяемых участков разного уровня качества введем понятие кластер, означающее некоторое локальное скопление в контурах пласта ископаемых углей одинакового качества, обладающих сходными свойствами и ценностью. Дифференциация запасов по уровням качества, для оценки которых должны рассматриваться как минимум два управляемых показателя, определяющих полезное и вредное свойство, обуславливает переход от геолого-технологического картирования по единичному показателю качества (скалярной величины) к векторному показателю.

Решение поставленной задачи проводится на основе созданной геоинформационной модели месторождения, выстроенного алгоритма и разработанных методов “жесткой” и “гибкой” кластеризации. Базой для апробации созданного математического и программного обеспечения послужили геологические условия залегания коксующихся углей марки Ж Эльгинского месторождения Южной Якутии и энергетических углей марки ДВ Егозово-Красноярского месторождения Кузбасса.

МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЗАПАСОВ ПО УРОВНЮ КАЧЕСТВА

Качество ископаемых углей определяется некоторой совокупностью единичных показателей по количественной оценке их полезных или вредных свойств. Дифференциация запасов по уровням качества состоит в выделении участков пласта с углями первого, второго и последующих уровней качества, определяемых отношением позитивного и негативного показателей. Число уровней качества обусловлено требованиями промышленного использования углей и существующей дифференциацией цен на угольную продукцию. Первой процедурой для дифференциации запасов является вычисление степени изменчивости и характера связи между рассматриваемыми показателями качества [9]. Для оценки изменчивости единичного показателя качества рассчитываются центральные моменты его выборочного распределения: математическое ожидание μ и среднеквадратичное отклонением σ . Предложенный подход к установлению границ допустимого изменения показателей качества для определения его уровня приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Принцип формирования уровней качества углей

Уровень качества	Негативный показатель		Позитивный показатель	
	Нижнее значение	Верхнее значение	Нижнее значение	Верхнее значение
Первый	Минимальное*	$< (\mu - \sigma)$	$\mu + \sigma$	Максимальное*
Второй	$\mu - \sigma$	$< \mu$	μ	$< (\mu + \sigma)$
Третий	μ	$< (\mu + \sigma)$	$\mu - \sigma$	μ
Четвертый	$\mu + \sigma$	Максимальное	Минимальное	$\mu - \sigma$

*Минимальный или максимальный показатель качества определяется по выборке данных опробования скважин детальной или эксплуатационной разведки

Если необходимо увеличить число уровней качества, например до шести, целесообразно рассмотреть интервал значений показателя $\mu \pm \alpha \sigma$ (где $\alpha < 1$) и задать диапазоны изменения показателей по уровням в соответствии с предложенным в табл. 1.

Алгоритм построения карты качества по скалярному показателю состоит в следующем [9]. Сначала на модели поверхности пласта строится вспомогательная прямоугольная сетка с достаточно малым шагом, узлы которой образуют элементарные прямоугольники-блоки, внутри которых значение показателя качества можно считать постоянным. В геометрическом центре блока вычисляется значение этого показателя, которое распространяется на весь блок. Значение показателя в блоке принадлежит одному из интервалов $[x_k, x_{k+1}]$, тогда весь блок относится к k -му уровню градации по определенному свойству. Процедура графического формирования кластера проводится путем объединения соседних (имеющих общую границу) элементарных блоков, углы в которых принадлежат одному и тому же уровню качества.

При исследовании качества запасов угольных месторождений установлено, что управление качеством по одному из показателей — позитивному или негативному — не всегда приводит к рациональному освоению потенциала месторождения. Это происходит, когда позитивный показатель характеризует запасы наилучшим образом, а негативный — наихудшим. Примером может служить Эльгинское месторождение, где в соответствии со значениями позитивного показателя — толщиной пластического слоя — углы отнесены к наиболее ценным, тогда как значения негативного показателя (зольности) — достаточно высоки. Выявленная особенность управления по одному показателю приводит к недостаточной оценке качества запасов. В связи с этим необходимо оценивать качество по векторному показателю, отражающему позитивное и негативное свойства углей.

Итак, есть единичные показатели (скалярные величины) u и v и выполнена дифференциация запасов по каждому из них на E градаций (уровней качества). Для конкретного элементарного блока геоинформационной модели пласта результаты дифференциации по единичным показателям могут не совпадать, например по показателю u блок может быть отнесен к первому уровню, а по v — к третьему.

Для векторного показателя нельзя ввести отношение больше – меньше и, соответственно, нельзя разбить область их значений на интервалы, как для единичного показателя. Поэтому разработан специальный алгоритм отнесения элементарного блока r к какой-либо градации по качеству для векторного показателя [10, 11]. Вычислительные операции кластеризации запасов углей проводятся по четырем уровням качества ($E = 4$). Пусть r — элементарный блок геоинформационной модели. Обозначим k, m его индексы по показателям u и v соответственно и будем присваивать индекс i для показателя (u, v) . Индекс по показателю определяется тем уровнем качества, к которому относится данный блок r .

На начальном этапе формирования к уровню i относятся блоки, которые принадлежат этому уровню по каждому из единичных показателей ($k = m = i$). Для тех блоков, в которых это равенство не выполняется, конструирование уровней качества будет проводиться двумя методами: “жесткой” и “гибкой” кластеризации. По методу “жесткой” кластеризации блок $r_{k,m}$ относится к i -му уровню по векторному показателю, если этот блок по каждому из единичных показателей относится к уровню не больше i . Формально это означает, что блок $r_{k,m}$, отнесенный по единичным показателям к уровню дифференциации k и m , включается в уровень качества i по векторному показателю, если

$$(k = m = i) \vee ((k = i) \wedge (m \leq i)) \vee ((m = i) \wedge (k \leq i)). \quad (1)$$

В методе “жесткой” кластеризации не допускается ухудшение обоих единичных показателей — выход значений за установленную границу в иерархически нижележащий уровень. Это требование возникает тогда, когда один из показателей является дискретным (категория обогатимости: легко-, средне- и труднообогатимые угли), или в случае, когда значения показателей качества углей строго заданы согласно требованиям к их промышленному использованию.

По методу “гибкой” кластеризации запасов в i -й уровень по векторному показателю попадают блоки $r_{k,m}$, которые по единичным показателям относятся к уровням i или $i+1$, качество в которых не более чем на один уровень ниже по иерархии. Это означает, что в кластер могут вовлекаться блоки со значениями показателя качества, выходящими за предельные для данного кластера ограничения. Следовательно, в целом по кластеру средние значения показателей качества могут оказаться за установленными границами уровня: ниже для позитивного и (или) выше — для негативного.

Здесь операция отнесения блоков к i -му уровню принимает вид:

$$(k = m = i) \vee ((k = i + 1) \wedge (m \leq i)) \vee ((m = i + 1) \wedge (k \leq i)). \tag{2}$$

Логика “жесткой” (1) и “гибкой” (2) кластеризации блоков для конструирования уровней качества по векторному показателю (u, v) показана на рис. 1. Столбцы и строки матрицы отображают градации единичных показателей u и v , а элементы матрицы — уровень качества по векторному показателю (u, v) . Чем больше индекс у показателя, тем ниже уровень качества.

Метод “жесткой” кластеризации					Метод “гибкой” кластеризации				
	u_1	u_2	u_3	u_4		u_1	u_2	u_3	u_4
v_1	$^1(u_1, v_1)$	$^2(u_2, v_1)$	$^3(u_3, v_1)$	$^4(u_4, v_1)$	v_1	$^1(u_1, v_1)$	$^1(u_2, v_1)$	$^2(u_3, v_1)$	$^3(u_4, v_1)$
v_2	$^2(u_1, v_2)$	$^2(u_2, v_2)$	$^3(u_3, v_2)$	$^4(u_4, v_2)$	v_2	$^1(u_1, v_2)$	$^2(u_2, v_2)$	$^2(u_3, v_2)$	$^3(u_4, v_2)$
v_3	$^3(u_1, v_3)$	$^3(u_2, v_3)$	$^3(u_3, v_3)$	$^4(u_4, v_3)$	v_3	$^2(u_1, v_3)$	$^2(u_2, v_3)$	$^3(u_3, v_3)$	$^3(u_4, v_3)$
v_4	$^4(u_1, v_4)$	$^4(u_2, v_4)$	$^4(u_3, v_4)$	$^4(u_4, v_4)$	v_4	$^3(u_1, v_4)$	$^3(u_2, v_4)$	$^3(u_3, v_4)$	$^4(u_4, v_4)$

Рис. 1. Логика кластеризации запасов углей по векторному показателю (u, v)

Элементы матрицы на рис. 1 отражают логику определения уровня качества, к которому относится элементарный блок на поверхности пласта. В них с учетом уровня дифференциации по скалярным показателям u_j, v_i показаны результаты определения класса качества в соответствии с выражениями (1)–(2) (на рис. 1 класс качества помечен в верхнем левом углу). Для более четкой визуализации уровни качества (включенные в них ячейки) на рис. 1 условно разделены жирными линиями.

В разработанной процедуре компьютерного картографирования реализованы оба метода кластеризации. Выбор одного из них осуществляется на основании оценки возможностей технологий для управления качеством обрабатываемых запасов, организации обогащения углей (раздельного или валового), степени различия цен на виды угольной продукции — рядовой уголь, концентрат, промпродукт и др., а также требований потребителей к качеству углей.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЗАПАСОВ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ ПО ВЕКТОРНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЬГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Запасы каменных углей Эльгинского месторождения представлены двумя свитами пластов: Нерюнгринской (N) и Ундытканской (U), содержащих угли двух марок — Ж (технологические группы Ж21 и Ж6) и СС (технологической группы 1СС). Качество углей различается по пластам свит. Запасы углей по верхним пластам Ундытканской свиты: U_{20}, U_{19}, U_{18} и U_{17} почти полностью предназначены для энергетики (технологические группы 1СС и Ж6). Основные по мощности пласты Нерюнгринской свиты N_{15}, N_{16} и пласты U_4, U_{4b}, U_5 Ундытканской свиты содержат до 63 % запасов месторождения, в том числе до 75 % представлены запасами углей техноло-

гической группы Ж21, пригодными для использования в коксохимии. По ГОСТ 10100-84 [5] каменные угли Эльгинского месторождения отнесены к трудной и очень трудной категории обогатимости (по Нерюнгринской свите в размере 87.5 %, по Ундытканской свите — более 60 %) и подлежат валовому обогащению. Особенностью углей месторождения является установленное существенное расхождением между показателями обогатимости углей классов крупности 0–13 мм и +13 мм.

Зольность угольной массы по пластам N_{15} и N_{16} изменяется от 20 до 37 %, по пластам U_4 , U_5 — от 18 до 36 %. Толщина пластического слоя по пластам обеих свит соответствует значениям по технологической группе Ж21, т. е. в основном составляет более 21 мм.

Первой процедурой кластеризации запасов по уровням качества является определение степени изменчивости и характера связи между рассматриваемыми показателями [12, 13]. Для этого на примере пласта N_{16} проведена дифференциация запасов ископаемых углей отдельно по зольности и толщине пластического слоя, т. е. по скалярным показателям. Для них рассчитаны: математическое ожидание μ и среднеквадратичное отклонение σ , составляющее по зольности угольной массы пласта $\mu_{A^d} = 24\%$, $\sigma_{A^d} = 4.1\%$, по толщине пластического слоя $\mu_y = 30$ мм, $\sigma_y = 8$ мм. На основе полученных характеристик изменчивости позитивного и негативного показателей качества заданы граничные значения для уровней качества запасов пласта N_{16} (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Дифференциация запасов пласта N_{16} по единичным показателям качества

Уровень качества	Распределение запасов					
	по зольности угольной массы пласта			по толщине пластического слоя		
	Диапазон изменения зольности угольной массы, %	Расчетная средняя по уровню качества толщина пластического слоя \bar{y} , мм	Доля площади пласта, %	Диапазон изменения толщины пластического слоя, мм	Расчетная средняя по уровню качества зольность угольной массы \bar{A}^d , %	Доля площади пласта, %
Первый	$A^d \leq 20$	26.6	9.1	$38 \leq y$	23.0	2.0
Второй	$20 < A^d \leq 24$	28.2	47.1	$30 \leq y < 38$	24.2	37.9
Третий	$24 < A^d \leq 28$	28.8	36.2	$22 \leq y < 30$	23.9	49.3
Четвертый	$A^d > 28$	32.1	7.6	$y < 22$	21.1	10.8

Сравнение приведенных в табл. 2 расчетных данных по показателям вредных и полезных свойств углей показало, что дифференциация запасов по единичным показателям качества не позволяет объективно выстраивать иерархию уровней качества углей, так как угли с высоким значением толщины пластического слоя отличаются и высокой зольностью. Отмеченная особенность качества углей Эльгинского месторождения (одновременно наилучшие значения позитивного и наихудшие значения негативного показателей качества) определяет целесообразность разработки методов и программных средств кластеризации запасов по векторному показателю для разделения ископаемых углей по уровням качества. Дифференциация запасов и построение карты качества с расположением в контурах пласта различных кластеров качества проводится с целью дать оценку выбранного варианта развития горных работ карьера с точки зрения получения наиболее качественной продукции.

Дифференциация запасов углей пласта N_{16} по векторному показателю с использованием методов “жесткой” и “гибкой” кластеризации выполнена прежде всего в границах изменения показателей толщины пластического слоя и зольности угольной массы пласта (табл. 2) — единичных показателей, составляющих векторный и определяющих его уровень качества. Например, вектор из этих показателей с ограничениями по каждому единичному представлен в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Ограничения по уровням качества для единичных показателей, образующих вектор

Уровень качества	Векторный показатель качества углей	
	Толщина пластического слоя, мм	Зольность угольной массы, %
Первый	$38 \leq y$	$A^d \leq 20$
Второй	$30 \leq y < 38$	$20 < A^d \leq 24$
Третий	$22 \leq y < 30$	$24 < A^d \leq 28$
Четвертый	$y < 22$	$A^d > 28$

Для того чтобы раскрыть возможности разработанных методов дифференциации запасов ископаемых углей, дополнительно заданы варианты с ужесточенными ограничениями по зольности (табл. 4, варианты 2, 3). Отметим, что главным определителем уровня качества углей технологической группы Ж21 в вариантах 2 и 3 остается толщина пластического слоя. Результаты дифференциации запасов по методу “жесткой” кластеризации приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 4. Варианты дифференциации запасов пласта N_{16} с ограничениями по уровням качества для единичных показателей

Уровень качества	Ограничение толщины пластического слоя, мм	Вариант и ограничение зольности угольной массы, %		
		1	2	3
Первый	$38 \leq y$	$A^d \leq 20$	$A^d \leq 19$	$A^d \leq 17$
Второй	$30 \leq y < 38$	$20 < A^d \leq 24$	$19 < A^d \leq 22$	$17 < A^d \leq 21$
Третий	$22 \leq y < 30$	$24 < A^d \leq 28$	$22 < A^d \leq 25$	$21 < A^d \leq 25$
Четвертый	$y < 22$	$A^d > 28$	$A^d > 25$	$A^d > 25$

ТАБЛИЦА 5. Дифференциация запасов углей пласта N_{16} по векторному показателю методом “жесткой” кластеризации

Уровень качества	Вариант изменения ограничения зольности угольной массы								
	1			2			3		
	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %
Первый	18.8	34.4	3.2	18.2	34.5	1.9	0	0	0
Второй	22.4	33.8	18.1	20.9	34.6	7.2	19.6	35.2	5.8
Третий	24.1	27.8	50.8	22.9	28.3	50.2	22.8	28.6	53.5
Четвертый	24.5	24.7	17.9	25.4	27.5	40.7	25.4	27.5	40.7
Уровни (1 + 2)			21.3			9.1			5.8

Как следует из табл. 5, по всем вариантам отнесенные к условно лучшим угли первого и второго уровней качества отличаются высоким значением главного показателя — толщины пластического слоя, которое превышает 21 мм. С ужесточением границ по зольности во втором и третьем вариантах наблюдается переход углей в худший (четвертый) уровень, доля которого увеличивается с 17.9 до 40.7% и одновременно с 18.1 до 5.8% сокращается доля углей второго уровня качества. Как следствие, доли площади пласта с условно лучшими углями снижаются относительно варианта 1 более чем вдвое по варианту 2 и почти в 4 раза по варианту 3. Построенные по данным табл. 5 карты качества показаны на рис. 2.

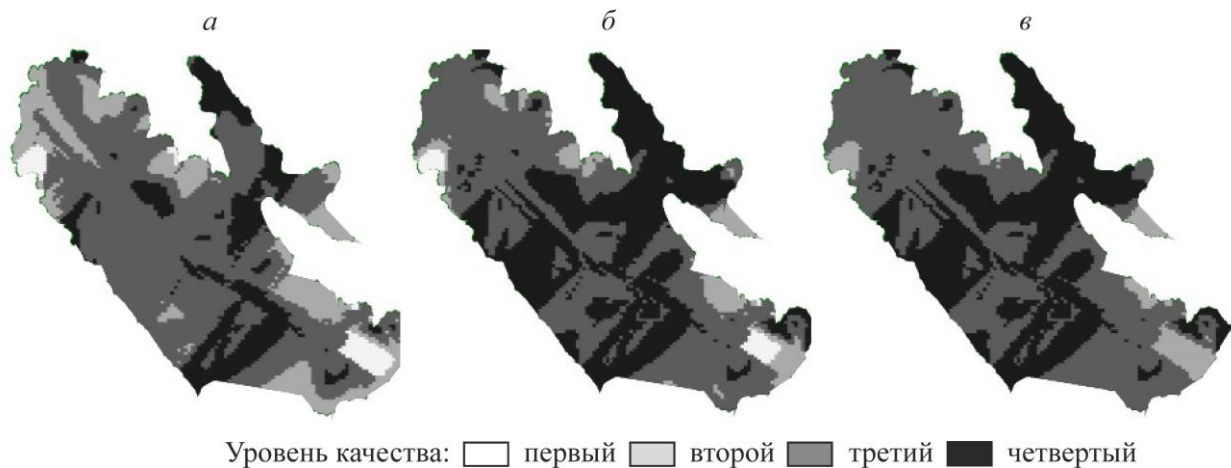


Рис. 2. Карты качества пласта N_{16} , построенные методом “жесткой” кластеризации: а — вариант 1; б — вариант 2; в — вариант 3

Построением карт качества дается расположение кластеров (уровней качества) в контурах пласта. Нанесение на них перспективных или годовых планов горных работ позволит получить информацию для принятия решений по добыче и обогащению угля с целью прогноза качества угольной продукции, конкурентоспособной на современном рынке.

Раскрытие возможностей дифференциации качества углей с использованием метода “гибкой” кластеризации проведено также на запасах пласта N_{16} . Результаты апробации метода “гибкой” кластеризации приведены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. Дифференциация запасов пласта N_{16} по векторному показателю методом “гибкой” кластеризации

Уровень качества	Вариант изменения ограничения зольности угольной массы								
	1			2			3		
	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{y} , мм	Доля площади пласта, %
Первый	19.5	35.3	4.1	18.8	35.2	2.3	19.4	39.0	0.8
Второй	23.0	29.8	56.9	22.0	31.7	31.2	21.9	32.4	29.2
Третий	25.0	26.1	38.5	24.5	27.1	65.2	24.4	27.0	68.7
Четвертый	32.4	17.8	0.5	28.7	17.0	1.3	28.7	17.0	1.3
Уровни (1+2)			61.0			33.5			30.0

Учитывая данные табл. 6, отметим преимущества “гибкой” кластеризации запасов относительно “жесткой”. Сравним результаты дифференциации запасов по варианту 1 из табл. 5, 6. За счет отличия алгоритма “гибкой” кластеризации, а именно допущения включения в рассматриваемый уровень качества углей с худшими значениями показателей (более низкого по иерархии уровня), с 18.1 до 56.9 % увеличилась площадь пласта с углями второго уровня качества. Это позволило к условно лучшим углям отнести запасы на 61.0 % площади пласта, что почти в 3 раза больше, чем при “жесткой” кластеризации. Кроме того, зольность условно лучших углей (22.78 %) мало отличается от значения этого показателя в варианте, рассчитанном по методу “жесткой” кластеризации (21.76 %). И хотя за счет ужесточения границ по зольности доля площади пласта с условно лучшими углями в вариантах 2 и 3 (см. табл. 4) сокращается (табл. 6 — 33.5 и 30.0 % соответственно), тенденция ее увеличения относительно аналогичных значений, полученных методом “жесткой” кластеризации, сохраняется.

Приведенными данными подтверждается, что если есть возможность варьировать ограничения по зольности (см. табл. 4) без ухудшения значений по главному (управляемому) показателю, включенному в векторный (толщина пластического слоя), то для дифференциации запасов следует применять метод “гибкой” кластеризации.

Расположение по площади пласта кластеров качества по вариантам 1–3 из табл. 6 представлено на картах качества (рис. 3).

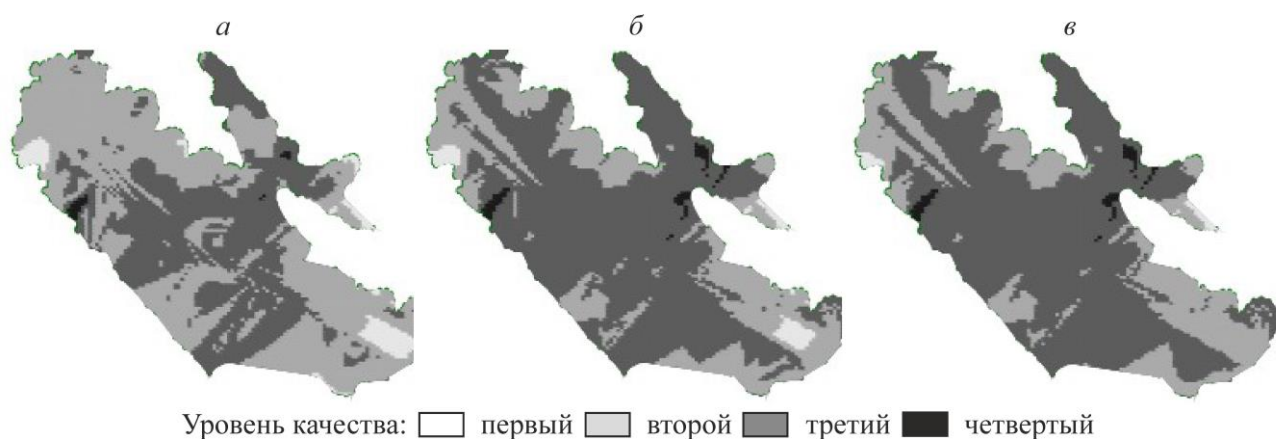


Рис. 3. Карты качества пласта N_{16} , построенные методом “гибкой” кластеризации: *a* — вариант 1; *б* — вариант 2; *в* — вариант 3

Построение на площади пласта кластеров по векторному показателю позволяет получить детальную информацию для принятия решений по управлению качеством угольной продукции на стадии проектирования и разработки месторождения или его участков.

Задача поиска метода дифференциации запасов с применением векторного показателя на основе геоинформационной модели месторождения актуальна не только для геологических условий, подобных Эльгинскому месторождению, но и для условий с установленными статистическими зависимостями между показателями качества, подтверждающими отрицательную корреляцию, например, между зольностью и теплотой сгорания углей.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕЙ ПО ВЕКТОРНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЕГОЗОВО-КРАСНОЯРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Дифференциация запасов энергетических углей по уровням качества проведена для условный участка “Еловский” разреза “Моховский” Егорово-Красноярского месторождения. В отработке находятся пласты LIV, LV, LVI с углями марки Д средней мощностью 5.15, 7.73 и 9.57 м.

Показатели качества по пластам: средняя зольность $\bar{A}^d = 12.6, 14.5, 14.1\%$, средняя теплота сгорания на сухое беззольное топливо \bar{Q}_s^{daf} находится в интервале 7061 – 7192 ккал/кг [14]. Все угли подлежат обязательному обогащению. По данным фракционного анализа обогатимость углей по ГОСТу относится к категории “легкая” [5].

Уровни качества углей на этом участке определяются по двум показателям: зольность A^d и теплота сгорания Q_s^{daf} , между которыми существует зависимость вида $Q_s^{daf} = 32.98(1 - A^d/100)$ [1]. Граничные значения зольности и теплоты сгорания по уровням качества устанавливаются исходя из возможностей получения малозольных углей для исключения их из обогащения. Чтобы раскрыть возможности методов кластеризации запасов, проводится их дифференциация по двум вариантам, отличающимся ограничениями зольности углей.

Вариант 1. Задание граничных значений единичных показателей ориентировано на четыре уровня качества, отражающих требования потребителей к качеству продукции:

— *первый*: зольность $\leq 8\%$ и высокая калорийность, что соответствует зольности концентрата и качеству углей, пригодных для использования в ограниченных количествах в коксохимии в составе шихты;

— *второй*: зольность $8 < A^d \leq 15$, низкозольные и высокой калорийности угли, подходящие как для использования в энергетике на отечественных электростанциях, так и для поставки на экспорт после обогащения;

— *третий*: зольность $15 < A^d \leq 25$, среднезольные и средней калорийности угли, подлежащие обогащению для использования в энергетике;

— *четвертый*: зольность $A^d > 25$, высокозольные и средней калорийности угли, подлежащие обогащению для использования в энергетике.

Поскольку теплота сгорания углей Q_s^{daf} на исследуемом участке месторождения высокая и значения ее не подвержены резким колебаниям [14, 15], границы допустимого изменения этого показателя по уровням качества заданы равным шагом в 300 ккал/кг. Результаты дифференциации запасов углей пласта LIV по заданным уровням качества с применением метода “жесткой” и “гибкой” кластеризации приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Дифференциация запасов пласта LIV по векторному показателю (вариант 1)

Уровень качества	Граница изменений единичных показателей — компонент вектора	Метод “жесткой” кластеризации			Метод “гибкой” кластеризации		
		\bar{A}^d , %	\bar{Q}_s^{daf} , ккал/кг	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{Q}_s^{daf} , ккал/кг	Доля площади пласта, %
Первый	$A^d \leq 8$ $Q > 7200$	7.7	7276	3.3	9.1	7261	43.0
Второй	$8 < A^d \leq 15$ $6900 < Q \leq 7200$	10.0	7167	75.6	11.5	7031	44.6
Третий	$15 < A^d \leq 25$ $6600 < Q \leq 6900$	15.4	6874	10.4	19.9	6276	9.0
Четвертый	$A^d > 25$ $Q \leq 6600$	22.7	5923	10.7	29.1	5413	3.4
Условно лучшие угли	Уровни (1 + 2)	9.9	7172	78.9	10.3	7144	87.6

Сравнение результатов кластеризации запасов с использованием разработанных методов показывает (табл. 7), что лучшее распределение углей по уровням качества получено с использованием “жесткой” кластеризации: негативный показатель (зольность) не превышает верхнее ограничение, позитивный также близок к верхнему ограничению. Усреднение углей первого и второго уровней качества позволяет получить зольность менее 10 % и высокую теплоту сгорания, равную 7172 ккал/кг. Кластеры с углями приведенного качества занимают 78.9 % площади пласта.

В ситуации, когда потребитель не ставит жестких ограничений по зольности для малозольных углей, альтернативой служит вариант дифференциации по методу “гибкой” кластеризации. Установлено, что угли зольностью 9.1 % и высокой теплотой сгорания (7261 ккал/кг) занимают 43.0 % площади пласта. Усреднение углей первого и второго уровней качества позволяет получить зольность 10.3 % и теплоту сгорания 7144 ккал/кг. Кластеры с углями указанного качества занимают 87.6 % площади пласта. Таким образом, из рассмотренных вариантов распределения запасов по уровням качества выбор приоритетного следует провести с учетом спроса на угли требуемого качества и возможностей технологии их добычи и обогащения. Карты качества, построенные по результатам применения методов “жесткой” и “гибкой” кластеризации запасов пласта по варианту 1, приведены на рис. 4.

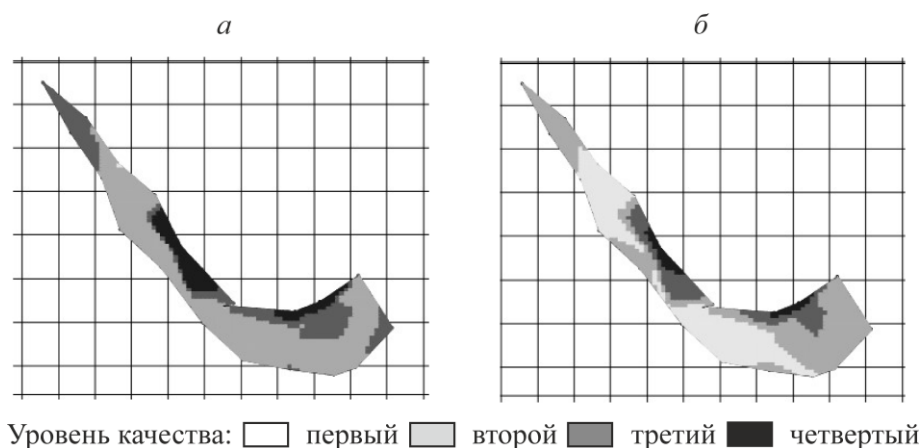


Рис. 4. Карты качества участка пласта LIV (вариант 1): а — “жесткая” кластеризация; б — “гибкая” кластеризация

Анализ расположения кластеров на картах качества рис. 4 при условии развития фронта работ по простиранию пласта позволяет отдать предпочтение варианту с “гибкой” кластеризацией запасов по следующим соображениям. Первое — выделенные участки условно лучших углей на площади пласта сконцентрированы, поэтому угли из их можно извлекать отдельным потоком и в дальнейшем исключить из обогащения. Второе — несмотря на то, что значение зольности (9.1 %) выходит за ограничение по уровню качества (8.0 %), оно соответствует требованиям мировых рынков для высококачественных концентратов. Поэтому вариант, полученный методом “гибкой” кластеризации, является более благоприятным по сравнению с вариантом, предлагаемым методом “жесткой” кластеризации. Таким образом, для добывающего предприятия на стадии оценки потребительской ценности запасов решается важная задача, состоящая в поиске пользователей такой угольной продукции, при которой удастся получить наибольший экономический эффект от освоения запасов месторождения.

Вариант 2. Дифференциация запасов рассматривается с позиции раскрытия возможностей разработанных методов кластеризации для многовариантной оценки запасов по уровням качества, позволяющей учитывать интересы добывающего предприятия. Введем новые ограничения показателей уровней качества, установив для каждого шаг изменения по зольности 5 %, по теплоте сгорания 300 ккал/кг. Полученные ограничения для векторного показателя качества приведены в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8. Дифференциация запасов пласта LIV по векторному показателю (вариант 2)

Уровень качества	Граница изменений единичных показателей — компонент вектора	Метод “жесткой” кластеризации			Метод “гибкой” кластеризации		
		\bar{A}^d , %	\bar{Q}_s^{def} , ккал/кг	Доля площади пласта, %	\bar{A}^d , %	\bar{Q}_s^{def} , ккал/кг	Доля площади пласта, %
Первый	$A^d \leq 10$ $Q > 7200$	8.8	7265	36.1	9.2	7223	56.1
Второй	$10 < A^d \leq 15$ $6900 < Q \leq 7200$	10.8	7093	42.7	12.4	7002	31.5
Третий	$15 < A^d \leq 20$ $6600 < Q \leq 6900$	14.6	6889	9.3	18.8	6485	6.1
Четвертый	$A^d > 20$ $Q \leq 6600$	22.7	6003	11.9	26.0	5606	6.3
Условно лучшие угли	Уровни (1 + 2)	9.9	7172	78.8	10.4	7144	87.6

Проанализируем результаты дифференциации запасов по варианту 2 (табл. 8, рис. 5) с позиции преимущества методов “жесткой” и “гибкой” кластеризации. Для обоих вариантов ограничений (табл. 7, 8) дифференциация запасов по методу “жесткой” кластеризации приводит к уменьшению доли запасов, относящихся к первому, и к увеличению доли запасов, отнесенных ко второму уровню качества углей со средней зольностью 10.8 %.

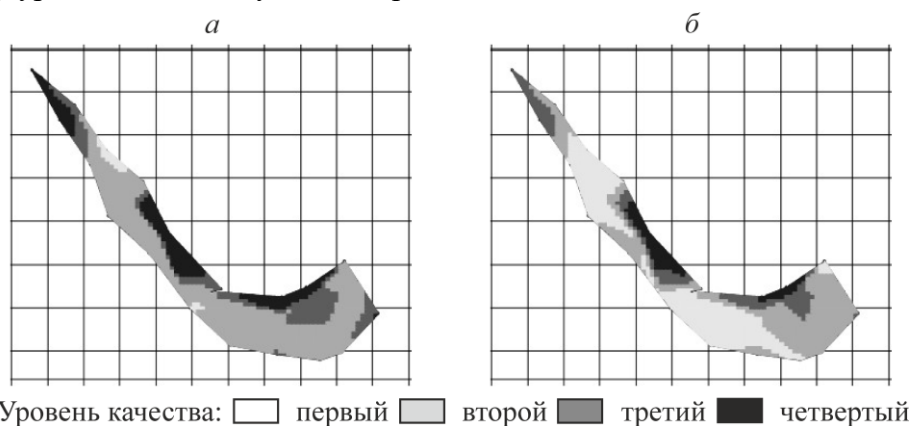


Рис. 5. Карты качества участка пласта LIV (вариант 2): а — “жесткая” кластеризация; б — “гибкая” кластеризация

В результате применения метода “гибкой” кластеризации удается выделить в кластеры углей первого уровня качества до 56.1 % площади пласта зольностью 9.2 %, что выше зольности углей первого уровня качества (8.8 %), определенной при использовании метода “жесткой”

кластеризации. Если предусмотреть усреднение углей первого и второго уровней качества (условно лучшие угли), то можно получить угли с зольностью 10.4 % и теплотой сгорания 7144 ккал/кг и увеличить занимаемую условно лучшими углями площадь пласта до 87.6 %.

В случае, если требование к качеству углей ограничится зольностью до 10.0 %, следует использовать дифференциацию запасов методом “жесткой” кластеризации, при которой под этими углями находится до 78.9 % площади пласта.

Анализ расположения кластеров на картах качества, построенных по варианту 2 (рис. 5), показал, что эти данные аналогичны варианту 1 (рис. 4), на основании чего возможно выделение части пласта, занятой этими кластерами, для ведения отдельной выемки углей лучшего качества с исключением их из обогащения. Осуществление селективной выемки углей первого и второго уровней качества позволяет сократить объем углей, поступающих на обогащение, при “жесткой” кластеризации до 21.2 %, при “гибкой” — до 12.4 % запасов.

ВЫВОДЫ

На стадии детальной разведки дается укрупненная оценка качества ископаемых углей. Обработка данных эксплуатационной разведки раскрывает новые возможности освоения запасов: происходит детализация свойств и уровней качества углей, характера изменчивости показателей качества и структурных особенностей залежей (пластов).

Обоснован подход к дифференциации запасов ископаемых углей по уровням качества с использованием векторного показателя, для чего разработаны методы “жесткой” и “гибкой” кластеризации. Метод “жесткой” кластеризации ограничивает выход значений единичных показателей за установленные границы уровня качества, его применение определяется условием, когда значения показателей строго заданы согласно требованиям их промышленного использования. Метод “гибкой” кластеризации допускает расширение границы для позитивного и сужение границы для негативного показателей качества, благодаря чему в экспериментах по кластеризации запасов Эльгинского и Егозово-Красноярского месторождений наблюдается увеличение объема углей первого и второго уровней качества. Результаты кластеризации запасов месторождения представляются картами качества, построенными в среде геоинформационного обеспечения.

Разработанный программный комплекс геолого-технологического картирования по векторному показателю с выделением кластеров по уровням качества углей переводит управление качеством угольной продукции на новую информационную основу, способствующую повышению использования минерально-сырьевого потенциала месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щадов М. И., Артемьев В. Б., Щадов В. М., Гагарин С. Г., Еремин И. В., Климов С. Д., Лисуренко А. В., Нецветаев А. Г. Природный потенциал ископаемых углей. Рациональное использование их органического вещества. Ч. 1. — М.: Недра коммюникейшнс ЛТД, 2000. — 422 с.
2. Еремин И. В., Броневец Т. М. Марочный состав углей и рациональное их использование. — М.: Недра, 1994. — 254 с.
3. Клер В. Р. Изучение и геолого-экономическая оценка качества углей при геологоразведочных работах. — М.: Недра, 1975. — 320 с.
4. Гончарова Н. В. Структурирование запасов угольных месторождений сложного строения по уровням качества // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 165–172.

5. **ГОСТ 10100-84.** Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 6 с.
6. **Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Основы классификации углей по потребительским свойствам // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 61–74.
7. **Батугин С. А., Литвинов В. С., Ческидов В. И. и др.** Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями. — Новосибирск: ГЕО, 2013. — 307 с.
8. **ГОСТ Р ИСО 9001-2000.** Система менеджмента качества. Требования. — М.: Госстандарт России, 2001. — 18 с.
9. **Протасов С. И., Ботвинник А. А.** Математическая модель распределения запасов угольных пластов по уровням качества // Вестн. КузГТУ. — 1999. — № 5. — С. 5–9.
10. **Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Компьютерное картирование угольного пласта по векторному показателю качества // ГИАБ. — 2004. — № 9. — С. 229–232.
11. **Горная энциклопедия** / под ред. Е. А. Козловского. — М.: Сов. энцикл., 1984–1991. — Т. 2. — 576 с.
12. **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. — Т. 1. — С. 56–62.
13. **Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л.** Информационно-аналитическое обеспечение комплексного управления качеством угля // ГИАБ. — 2017. — Вып. 23. — С. 140–147.
14. **Арцер А. С., Протасов С. И.** Угли Кузбасса: происхождение, качество, использование. Кн. 1. — Кемерово: КГТУ, 1999. — 177 с.
15. **Корякин А. Т., Федотов С. М., Протасов С. И.** Формирование качества угля при открытой угледобыче. — М.: Недра, 1987. — 237 с.

Поступила в редакцию 23/III 2018