

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РАЗВЕДАННЫХ ЗАПАСОВ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



С. В. Шаклеин,
председатель КузбассЦКР,
заместитель директора
Кемеровского представительства
НИИ горной геомеханики
и маркшейдерского дела,
д-р техн. наук

С 1 января 2008 г. в России вводится в действие новая «Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых». В отличие от предшествующей редакции 1997 г. новая Классификация впервые, в целях повышения надежности геологических оценок, содержит требование о том, что «при квалификации запасов полезных ископаемых по категориям в качестве дополнительного классификационного показателя должны использоваться количественные и вероятностные оценки точности и достоверности определения основных подсчетных параметров».



Т. Б. Рогова,
доцент Кузбасского
государственного
технического университета,
канд. техн. наук

«Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых». Принятое в ней разделение запасов по степени их достоверности в целом соответствует известной системе JORC (Joint Ore Reserves Committee), но несколько более детализировано. Российским запасам категорий А и В в JORC соответствует понятие «measured resources», запасам категории C_1 – «indicated resources», а запасам категории C_2 – «inferred resources». В отличие от предшествующей редакции 1997 г. новая Классификация впервые, в целях повышения надежности геологических оценок, содержит требование о том, что «при квалификации запасов полезных ископаемых по категориям в качестве дополнительного классификационного показателя должны использоваться количественные и вероятностные оценки точности и достоверности определения основных подсчетных параметров».

Необходимость крупных капиталовложений в горную промышленность и повышенный риск этих вложений побуждают государственные и инвестиционные институты постоянно ужесточать требования к надежности и достоверности геологической информации о недрах. Недооценка этого вопроса может привести к крупным техническим просчетам и финансовым потерям. Широкий резонанс в мире получила, например, история с золотомедным месторождением Бусанг в Индонезии, которую многие считают крупнейшей аферой XX в. После заявления в 1995 г. канадской венчурной компанией Bre-X Minerals об открытии на острове Борнео объекта с запасами золота порядка 2000 т капитализация акций этой компании достигла 6 млрд долл. США. В 1997 г. при составлении ТЭО эксплуатации месторождения независимой компанией Strathcona Mineral Services Ltd. (Канада) были выявлены факты недостоверности геологических данных (в том числе факты подлога вплоть до вымачивания керна скважин в золотосодержащем растворе), что привело к катастрофическому падению акций Bre-X Minerals. Потери обманутых акционеров оцениваются в 1,5 млрд долл. Неудавшиеся попытки подобных, но значительно меньших по размерам афер имели место и в современной России.

С 01.01.2008 г. в России вводится в действие новая

В настоящее время для количественной оценки достоверности разведанных запасов полезных ископаемых широкое применение получили методы геостатистики (прежде всего kriging). Эффективность их применения на рудных и россыпных месторождениях не вызывает сомнений, однако на угольных месторождениях эти методы оказались низкоэффективными. Главным образом это связано с особенностями строения угольных пластов, представляющих собой суперпозицию отдельных угольных линз, что в принципе не обеспечивает процедуру kriging необходимым количеством наблюдений в пределах отдельных однородных угольных образований. Другим существенным моментом является сложность применения методов kriging к оценке достоверности такого значимого, а для большинства угольных месторождений даже основного фактора, как достоверность изучения формы размещения угольного пласта в недрах (гипсометрии, отражающей пликативную и дизъюнктивную нарушенность участка). Все это ставит задачу разработки

специальных, ориентированных на специфику угольных месторождений, методов количественной оценки достоверности, эффективных при наличии малого числа точек геологических наблюдений и учитывающих фактор пликативной и дизъюнктивной нарушенности пластов.

Задача определения достоверности результатов геологического моделирования месторождения (достоверности запасов) сводится к оценке степени расхождения между реально существующим природным объектом и его моделью. Непосредственное решение задачи в такой постановке невозможно, так как никаких иных сведений об объекте, кроме использованных при создании его модели, не имеется. Поэтому ее решение может осуществляться только косвенными методами. В основу разработки таких методов авторами положена достаточно простая и очевидная идея о том, что если в каждой реальной точке геологического пространства изучаемый признак может иметь только одно единственное значение, то и модель, идеальным образом описывающая его изменение, также должна быть однозначной. Отсюда следует, что проявление неоднозначности построений в процессе моделирования является свидетельством неадекватности создаваемой модели и реального объекта. Причем степень этой неадекватности тем больше, чем больше неоднозначность модели. Действительно, чем больше вариантов построения, например, гипсометрии пласта, тем выше вероятность того, что будет выбран не лучший вариант, тем меньше будет доверия к модели, тем ниже будет ее достоверность. Таким образом, оценка достоверности геологической модели может быть выполнена на основе оценки степени ее неоднозначности с определенной степенью вероятности.

Собственно неоднозначность любых построений может быть оценена лишь при наличии избыточных измерений или определений. Однако при изучении недр они возникают крайне редко и нежелательны, так как являются следствием избыточной разведки объекта исследований и приводят к значительным материальным затратам. Так, в 2006 г. в Кузбассе стоимость 1 м разведочной скважины на уголь (с учетом всех видов испытаний и исследований) практически уже приблизилась к 170 евро. Поэтому подход к созданию метода измерения степени неоднозначности модели может основываться еще на одной, экономически оправданной идее искусственного создания косвенных избыточных определений в сетях геологоразведочных скважин. Искусственное создание косвенных избыточных определений в сетях измерений предлагается осуществлять в пределах контура четырехугольной ячейки сети измерений. Рассмотрим выпуклый четырехугольник с вершинами – точками замеров изучаемого признака (рис. 1). В нем можно провести две диагонали, пересекающиеся в общей точке *K*. Любой изучаемый признак, в соответствии со свойством однозначности геополя, должен иметь в точке *K* одно единственное значение. Используя метод интерполирования, по точности соответствующий методу, примененному при построении анализируемой модели, можно определить зна-

чение признака в точке *K* из каждой диагонали. Теоретически они должны быть равны друг другу. Однако, в силу наличия погрешностей измерений и интерполяции, их значения не будут совпадать друг с другом. Поэтому их разность, являясь разностью двух независимых косвенных определений, может рассматриваться в качестве меры неоднозначности модели.

При оценке достоверности изучения гипсометрии угольного пласта в качестве оцениваемого показателя используется высотная отметка точки подсечения почвы (кровли) пласта геологоразведочной скважиной.

Результаты исследований, выполненные с использованием данных горных работ по угольным разрезам на наиболее сложных по геологическому строению месторождениях Кузбасса, указывают на целесообразность применения для интерполяции между скважинами кубической сплайн-функции, которая обеспечивает равную точность построений с традиционными эвристическими методами. Поэтому показатель неоднозначности модели гипсометрии, который впредь будем именовать лямбда-критерием разведанности, может рассчитываться по формуле

$$\lambda_b = | [F_1(x)T(\delta_1) - F_2(x)T(\delta_3)]R_1 + (Z_3 - Z_1)F_3(x) + Z_1 - [F_1(x')T(\delta_2) - F_2(x')T(\delta_4)]R_2 - (Z_4 - Z_2)F_3(x') - Z_2 |, \quad (1)$$

где R_1, R_2 – горизонтальные длины диагоналей 1-3 и 2-4 четырехугольника сети замеров; x, x' – отношения длин 1-*K* к 1-3 и 2-*K* к 2-4; $T(\delta_i)$ – тангенс угла падения пласта в направлении диагонали, которому присваивается знак «минус», если направления диагонали (от подсечения с меньшим условным номером к большему) и направление линии падения пласта согласны или знак «плюс» в противном случае; Z_i – высотная отметка пласта в точке *i*-го пластоподсечения.

Функции F_j определяются по значениям параметров x или x' по формулам:

$$F_1(x) = (1 - x)^2x; F_2(x) = (1 - x)x^2; F_3(x) = (3 - 2x)x^2. \quad (2)$$

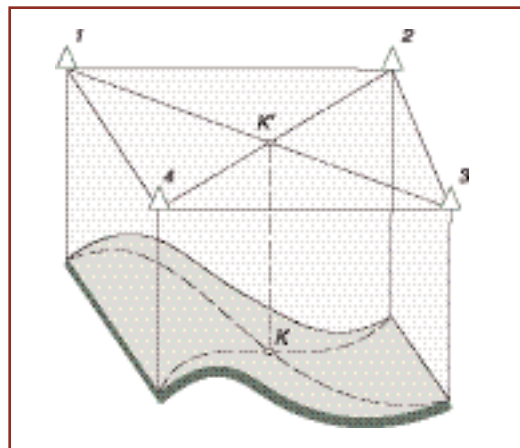


Рис. 1. Создание косвенных избыточных определений в четырехугольной ячейке сети разведочных скважин

Лямбда-критерий оценивает неоднозначность построений гипсометрии пласта в вертикальном направлении. Такой подход не вполне справедлив, поскольку, особенно для пластов крутого залегания, одна и та же вертикальная неопределенность в положении пласта приводит к различным смещениям в положении пласта на разрезе. Поэтому оценка неоднозначности моделей гипсометрии оценивается не в вертикальном, а в нормальном к пласту направлении.

В качестве исходной информации при оценке достоверности гипсометрии используются данные о пространственных координатах точек измерений и элементах залегания пласта в них, определяемых с помощью имеющихся моделей гипсометрии.

Так как реальная сеть геологоразведочных измерений не обеспечивает ее разбиения на оценочные четырехугольники абсолютно правильной формы, выполнены специальные экспериментальные исследования по определению их допустимых геометрических характеристик. Установлено, что форма четырехугольников должна отвечать следующим требованиям:

точка пересечения диагоналей должна быть удалена от вершин четырехугольника на расстояние от 0,3 до 0,7 длины каждой диагонали;

отношение длины наибольшей диагонали к длине наименьшей не должно превышать 2,6;

внутренние углы четырехугольника должны находиться в пределах от 25 до 155°.

Значения лямбда-критерия разведанности реально отражают неоднозначность моделей гипсометрии только тогда, когда плотность разведочной сети обеспечивает правомерность интерполяции значений признака в пространстве между замерами. Для оценки правомерности интерполяции высотных отметок выполняется построение функции (условно названной кривой разведанности), связывающей средние значения лямбда-критериев разведанности со средними площадями оценочных четырехугольников. Кривая строится путем последовательного двукратного разрежения сети измерений. Естественно, что эта кривая должна иметь характер монотонно возрастающей функции, так как по мере уменьшения плотности сети достоверность результатов моделирования снижается. Выявлены три типа кривых разведанности (рис. 2), по характеру которых можно оценить правомерность структурных построений гипсометрии пласта. Следует заметить, что условие 2 (см. рис. 2) может возникнуть не только при ограниченной возможности интерполяции, но и при существенной переразведке объекта, т. е. в условиях повсеместной правомерности интерполяции отметок почвы пласта. Действие этого обстоятельства обнаруживается по значению $\lambda_{зн}$.

Полученные оценки неоднозначности построений гипсометрии используются в качестве количественных квалификационных показателей при категоризации запасов по степени их достоверности в процессе государственной экспертизы. По степени до-

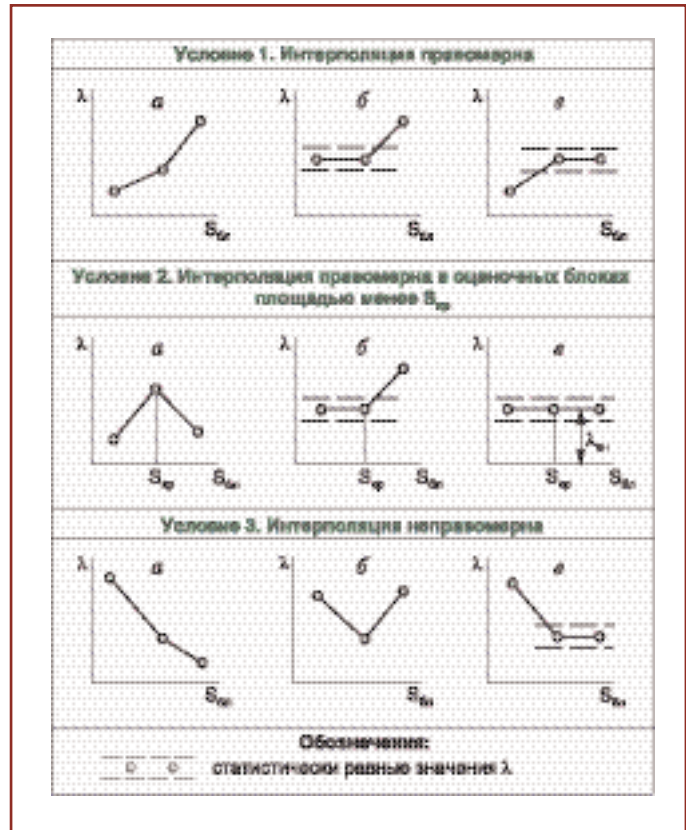


Рис. 2. Основные типы кривых разведанности

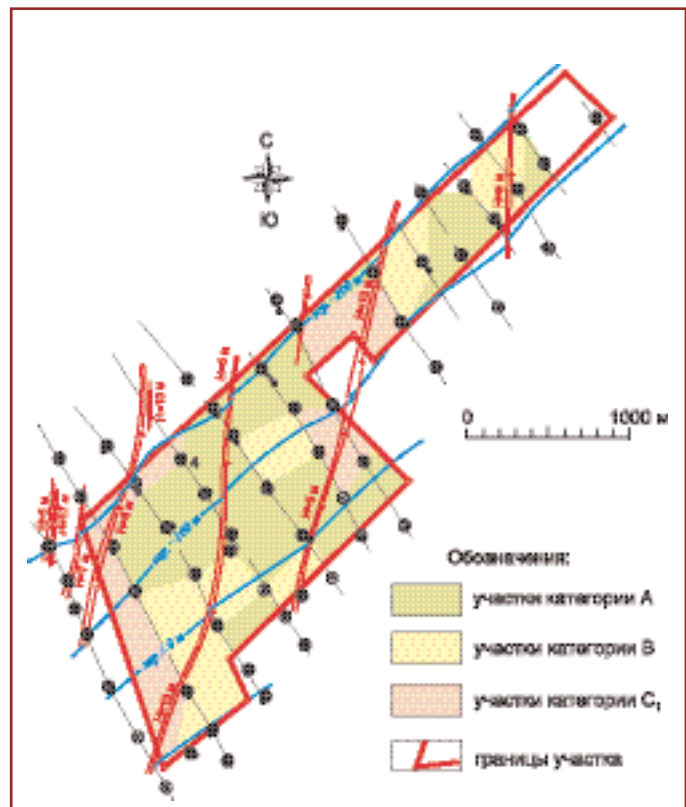


Рис. 3. Картограмма достоверности изучения гипсометрии пласта III поля шахты «Ольжерасская» в Кузбассе

стоверности изучения гипсометрии пласта к российской категории А относятся запасы контуров, в которых лямбда-критерий не превышает 7 м, к категории В – составляет от 7 до 13 м и к категории С₁ – от 13 до 50 м. Как показывает опыт Кузбасса, данные уровни неоднозначности гипсометрических построений с вероятностью 0,67 соответствуют следующим фактическим погрешностям гипсометрических планов: до ±4 м, от ±4 до ±8 м и свыше ±8 м (до ±30 м).

На основании расчета значений критериев разведанности создаются специальные карты – картограммы достоверности, или категоризации (рис. 3), на которых выделяются контуры с различным уровнем достоверности изучения признака. Вышеприведенные требования к форме четырехугольных оценочных блоков не всегда позволяют оценить всю площадь участка. Такие «пропущенные» контуры (например, в северо-восточной части участка на рис. 3), как правило, имеют незначительные размеры и оцениваются по аналогии. Кроме того, в процессе оценки иногда появляются незначительные по площади участки с повышенной степенью разведанности.

Степень развития дизъюнктивной нарушенности пластов обычно оценивается с помощью коэффициента нарушенности, предложенного А. Забродиным. Этот коэффициент представляет собой суммарную протяженность длин линий скрещений разрывных нарушений с пластом (в метрах), отнесенную к площади оцениваемого участка (в гектарах), и определяется на стадии геологоразведочных работ с существенной систематической погрешностью. Хотя обычно считается, что она занижается примерно в три раза, понятно, что эта величина не постоянна и зависит от плотности сети замеров и геологической сложности объекта. Оценка ожидаемой степени такого занижения для конкретного объекта выполняется на основе выявленной тесной корреляционной связи между отношением коэффициентов нарушенности по данным горных и разведочных работ (D) и степенью неоднозначности модели гипсометрии:

$$D = 0,1 + 0,42\lambda_c / S_c, \quad (3)$$

где λ_c – среднее значение лямбда-критериев разведанности; S_c – среднее значение площади оценочных четырехугольных блоков, $10^5 \cdot \text{м}^2$. Для оценки ожидаемой фактической степени дизъюнктивной нарушенности участка следует рассчитать коэффициент А. Забродина по данным геологоразведочных работ и умножить его на рассчитанный по формуле (3) коэффициент занижения D .

Принято считать, что повсеместное применение очистных механизированных комплексов экономически оправданно, когда степень малоамплитудной нарушенности участка не превышает 30 м/га. При этом собственно малоамплитудная нарушенность незначительно влияет на уровень погрешности гипсометрического плана угольного пласта. Эта погрешность даже в условиях значимой степени нарушенности может не превышать ±4 м, допус-

тимых для запасов категории А. Это обстоятельство обязательно должно учитываться при оценке достоверности запасов нарушенных пластов. Поэтому, если ожидаемая степень нарушенности по А. Забродину превышает 30 м/га, выделенные по лямбда-критерию запасы категории А должны быть переоценены в категорию В, а категории В – в С₁.

Так как моделирование иных значимых факторов, таких как мощности пласта, чистых угольных пачек, породных прослоев и основных показателей качества угля, выполняется одинаковыми методами, а информация о результатах их измерений и определений имеет сходный характер, то оценка достоверности изучения закономерностей их размещения в недрах может выполняться на основании единых критериев. В соответствии с предлагаемыми принципами определения неоднозначности, она может быть оценена с помощью специального абсолютного дельта-критерия разведанности, аналогичного лямбда-критерию, но основанного на применении линейной интерполяции между замерами:

$$\Delta = |(P_3 - P_1)x + P_1 - (P_4 - P_2)x' - P_2|, \quad (4)$$

где P_i – значение оцениваемого признака (мощности, зольности, выхода летучих и т. д.) в точке i -го пластопресечения; x, x' – отношения длин.

В связи с тем, что для большинства оцениваемых параметров имеет значение не столько абсолютная величина неоднозначности модели, сколько ее относительное (в процентах) значение, помимо абсолютного используется и относительный, выраженный в процентах, дельта-критерий:

$$\delta = \left| 200 \frac{(P_3 - P_1)x + P_1 - (P_4 - P_2)x' - P_2}{(P_3 - P_1)x + P_1 - (P_4 - P_2)x' + P_2} \right|. \quad (5)$$

По фактору мощности угольного пласта наиболее характерное значение относительного дельта-критерия для категории А не превышает 6 %, для категории В – 6÷15 % и для категории С₁ – 15÷50 %.

Правомерность интерполяции значений изучаемого признака в межскважинном пространстве, являющаяся необходимым условием корректного применения критериев разведанности, оценивается на основе сравнения значений общей и негеометризуемой изменчивости признака в условиях относительной незначимости влияния последней: $K = \Delta_c / \sigma$, где Δ_c – среднее значение абсолютного дельта-критерия разведанности (характеризующее уровень негеометризуемой изменчивости); σ – среднеквадратичное отклонение значений признака от его среднего значения (характеризующее общий уровень изменчивости). Если число используемых измерений n меньше 30, то рассчитанное по классической формуле значение σ должно быть увеличено за счет введения поправки Миллера–Кона, т. е. умножено на $[1 + (1+n)^{-1}] n^{1/2} (n-3)^{-1/2}$. При $K > 0,8$ делается вывод о неправомерности интерполяции

значений признака в межскважинном пространстве и, соответственно, о невозможности построения его изолиний и оценки достоверности его изучения с помощью критериев разведанности. В соответствии с существующими представлениями в случае неправомерности интерполяции мощности пласта достоверность запасов должна быть оценена не выше категории C_1 . Исключение составляет случай, когда необходимость выявления геометрических закономерностей изменения мощности не имеет принципиального значения. Как правило, это относится к выдержанным по мощности пластам.

Построенные в ходе геометризации изолинии признака используются не только для прогнозирования его значения в произвольных точках, но и в качестве границы зон заданного диапазона его изменения (например, границы кондиций, границы зоны окисления, смены марочного состава и т. п.). Поэтому оценка точности положения изолиний-границ является обязательным элементом оценки достоверности моделей угольных месторождений. В качестве числовой характеристики степени несовпадения фактического и ожидаемого по материалам геометризации положения изолинии используется среднее ожидаемое значение расстояний между ними в плане T . Опыт горно-эксплуатационных работ Кузбасса показывает, что значение T (м) может быть определено по формуле $T = 0,2LK$, где L – среднее арифметическое расстояние между геологическими замерами, используемыми при интерполировании в ходе построения изолинии. Запасы, расположенные на расстоянии T от изолинии-границы квалифицируются как запасы, находящиеся в зоне неопределенности, а их категория, в зависимости от промышленной значимости такой границы, может быть оценена как C_1 или, в редких случаях, как В.

В отдельных случаях, помимо описанных выше основных методов оценки достоверности запасов, используются специальные технологии оценки достоверности гипсометрических построений по линиям разведочных скважин (при оценке достоверности опорных профилей), а также оценки погрешности среднего значения признака, вычисленного по малому числу наблюдений.

На основе предложенных критериев разведанности разработаны методы более глубокого анализа, основанные на специальной технологии уравнивания сетей геологоразведочных наблюдений. Исходя из теоретического равенства критерия нулю, сами их значения рассматриваются в качестве своего рода «невязок», т. е. в качестве меры выполнения геометрического, объективно существующего условия. Имея значения критериев (невязок) по всем четырехугольникам сети скважин, ставится задача уравнивания: необходимо найти величины (поправки), на которые следовало бы изменить значения измеренных в скважинах параметров с тем, чтобы невязки по всем блокам одновременно стали равными нулю. Так как критерии обусловлены погрешностями измерений и ин-

терполяции (а при изучении гипсометрии и неизвестными тектоническими нарушениями), то и полученные поправки объективно зависят от этих факторов, что позволяет решать целый круг задач – от прогноза местоположения разрывных нарушений угольных пластов до построения моделей изменения значений признаков. Главная особенность метода уравнивания сетей геологоразведочных измерений как инструмента горно-геометрического изучения недр состоит в том, что наблюдаемая неоднозначность выполнения построений, традиционно являющаяся «врагом» геолога, становится не только позитивной информацией, но и целенаправленно используется для повышения качества изучения недр.

Практическое применение методики осуществлено уже более чем на 45 объектах восьми геолого-промышленных районов Кузбасса, Южной Якутии и Иркутской области (с суммарным объемом запасов более 2,4 млрд т для открытых и подземных горных работ) в интересах российских и иностранных инвесторов. Показательным является опыт первого практического применения методики в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века. Так, игнорирование полученных с ее помощью выводов о неприемлемо низкой достоверности запасов шахты «Анжерская-Южная» (на основании положительного заключения о степени разведанности, выполненного традиционными экспертными методами) впоследствии привело к прекращению ее строительства с объемом бросовых строительно-монтажных работ на сумму более 64,6 млн евро. Собственник небольшого разреза «Щербиновский», проигнорировавший полученные отрицательные оценки достоверности запасов, вынужден был ликвидировать предприятие после инвестирования в строительство около 1,8 млн евро. В то же время все полученные в ходе проведения экспертиз положительные оценки достоверности запасов подтверждаются последующими горно-эксплуатационными работами. В целом, как показывает практика ведения горных работ в Кузбассе, погрешность категоризации запасов с использованием вышеописанных методов в 3–4 раза ниже уровня погрешности, имеющего место при традиционной категоризации с использованием экспертов высшей квалификации.

В результате анализа накопленного опыта проведения экспертиз 22.05.2007 г. Экспертно-технический Совет ФГУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» (уполномоченного органа РФ по проведению государственной геологической экспертизы) рекомендовал применение вышеописанной методики для оценки точности и достоверности определения основных подсчетных параметров, установления количественных квалификационных показателей при категоризации и подсчете запасов углей на месторождениях Кузбасса, а также при государственной экспертизе материалов геологоразведочных работ. ■