

А.М. Валуев, Е.А. Шабловская

РАЗВИТИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ ОБЛИЦОВОЧНОГО КАМНЯ

Предложен новый подход к оценке распределения объемов блоков облицовочного камня, образованных природными трещинами, основанный на расширенном статистическом анализе данных о трещиноватости месторождения и применении метода Монте-Карло для моделирования границ блоков. Обсуждаются вопросы его компьютерной реализации.

Ключевые слова: облицовочный камень, оценка запасов, блочность, эквивалентные системы трещин, распределения случайных величин.

Естественная трещиноватость природного камня по существу носит случайный характер. Замерами выявляются достаточно развитые в массиве системы квазипараллельных трещин [1], но в каждой системе имеет место разброс значений угловых параметров. Более проблематично, но принципиально возможно выявление разброса значений расстояний между смежными скважинами одной системы, ибо для этого нужно порознь рассматривать данные каждой замерной станции (ЗС).

Основанная на вероятностных представлениях о трещиноватости методика расчета запасов облицовочного камня на основе обработки данных замеров природных трещин [2] используется более 20 лет. Ее отличает, однако, ориентация на применение простейших средств расчета типа микрокалькуляторов в сочетании с определением возможного распределения площадей оснований блоков геометрическими методами и прямым измерением площадей оснований на чертеже. Последнее вызывает высокую трудоемкость расчета, неточность и вероятность грубых ошибок. Принятые в методике заключения о вероятности значений отдель-

ных величин представляются недостаточно обоснованными. Реализация положений методики в виде компьютерной информационно-аналитической системы не встречает принципиальных затруднений, однако более целесообразно развить ее положения, основываясь на возможностях компьютерного анализа данных.

Идейные основы методики [2] обладают большей общностью, чем предлагаемые ею конкретные способы вычислений. Важные для нас положения сводятся к следующему. По общему характеру параметров трещиноватости площадь месторождения делится на структурно однородные участки, для каждого из которых распределение объемов блоков определяется отдельно; далее речь пойдет о выполнении расчетов в пределах одного структурно однородного участка. Среди распространенных в массиве трещин встречаются устойчивые скопления трещин, близких по значениям угловых параметров, которые могут быть сгруппированы в системы трещин (СТ), остальные относятся к внесистемным. Вертикальные и наклонные (крутые) трещины делят массив прежде всего по горизонтали, пологие и наклонные (постельные) — по верти-

кали. Образованные трещинами блоки могут быть приближенно представлены в виде фигур типа призм, верхние и нижние грани которых почти горизонтальны, образованы плоскостями постельных трещин и могут быть представлены многоугольниками, на которые делит горизонтальную плоскость прямые — следы крутых трещин. В основу разделения плоскости положены базовые блоки, образованные трещинами двух систем, одна из которых наиболее развита (распространена) в массиве, а вторая — наиболее близка к ортогональной к ней. Может быть определено распределение таких площадей. Высоты таких призм определяются расстояниями между соседними постельными трещинами, которые являются случайными величинами, распределение которых может быть определено по исходным данным — длинам столбиков керна в колонках вертикальных скважин. Распределение площадей и высот являются независимыми и суммарное распределение объемов определяется произведением распределений площадей оснований и высот блоков.

Для того, чтобы определить более надежным способом распределения площадей, целесообразно выполнить более подробный статистический анализ исходных данных. После выделения систем трещин можно оценить не только средние значения угловых параметров — азимута простирания a и угла падения b , — но и их дисперсии, коэффициент корреляции между a и b . Данных для этого всегда достаточно, т.е. системой имеет смысл считать скопление трещин в количестве не меньше 4–5. При значительно большем количестве замеренных трещин можно даже построить эмпирические распределения значений a и b . В общем случае можно ограничиться аппроксимацией совместного распределения a и b дву-

мерным нормальным распределением. Что касается горизонтального межтрещинного расстояния L_H в пределах СТ, то для оценивания его среднего значения достаточно отнести количество трещин на замерных станциях к суммарной эквивалентной длине ЗС, где под эквивалентной длиной ЗС понимается длина проекции линии ЗС на направление падения трещины (или среднее направление по СТ). Однако для оценивания его дисперсии, а тем более распределения необходимо иметь набор пар, относящихся к одним и тем же замерным станциям. В этом отношении преимущество имеют более длинные ЗС. С другой стороны, при общей ограниченности количества измерений на неоднородном месторождении лучше гуще располагать более короткие ЗС для более надежного определения границ однородных участков. Однако после выявления границ участков целесообразно провести дополнительные замеры в объеме одной достаточно длинной ЗС для каждого участка, расположенной в его характерной точке. При этом длина ЗС может быть определена с таким расчетом, чтобы предварительно выявленные СТ были представлены на ней хотя бы тремя трещинами.

Есть два аспекта природной трещиноватости, которые практически не являются измерениями. Первое — это отклонение трещин от их усредненных плоскостей, для чего информация практически отсутствует, в силу чего приходится считать их плоскими. Второе — это угловые параметры постельных трещин. Они могут быть определены только для наименее пологих постельных трещин, скажем, с углом падения от 10° (15°) до 30° (нижняя граница определяется распространенностью таких трещин и количеством замеров). Если такие трещины имеются, то их нормальным межтрещинным расстояниям соответствуют горизонталь-

ные, увеличенные соответственно в $1/\sin 10^\circ$ ($1/\sin 15^\circ$)– $1/\sin 30^\circ$ раз, т.е. в 5.76 (3.86)–2 раза. Следовательно, наблюдаться они могут, и при образовании ими систем трещин они могут быть выявлены, в противном случае они могут считаться внесистемными пологими трещинами. Что касается почти горизонтальных трещин, то здесь никакой статистики угловых параметров собрать не удастся, но это и не важно — для таких трещин азимут простирания для определения границ природных блоков почти никакого значения не имеет.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в определении распределения объемов блоков (непосредственно или с предварительным определением распределений площадей оснований блоков) методом статистических испытаний [3]. При этом должны быть сгенерированы случайные представители совокупности трещин. Ввиду того, что несистемные трещины также представляют часть совокупности, для них необходимо также провести статистическую обработку. Такие трещины делятся, во-первых, на крутые и постельные, а в пределах каждой категории — на сектора, количество которых (3, 4, 6, 8) может быть выбрано на основе известного эмпирического критерия количества диапазонов [4] — по выражению $1+3,2\lg N$, где N — количество замеренных трещин в категории. Тем самым в пределах каждого сектора могут быть найдены средние значения и дисперсии a и b и коэффициент корреляции между ними, средние значения L_H . Далее будем называть и системы трещин, и совокупности трещин определенной категории в пределах сектора группами трещин (ГТ), различая крутые и постельные ГТ (КГТ и ПГТ).

В свою очередь, вертикальные межтрещинные расстояния, замеряемые по скважинам как длины столбиков керна,

могут относиться как к постельным, так и отчасти к крутым скважинам. Действительно горизонтальному межтрещинному расстоянию L_H для ГТ с углом падения b соответствует вертикальное межтрещинное расстояние $L_V=L_H \operatorname{tg} b$. Определив *густоту* группы трещин в колонке вертикальной скважины как $1/L_V$, отметим, что она ведет себя подобно вероятности, т.е. густота совокупности двух ГТ равна сумме их густот. И действительно, поделив густоту СТ на густоту всей совокупности трещин, получим величину, которую можно трактовать как вероятность встретить трещину из ГТ в колонке скважины. В связи с этим для оценки распределения постельных трещин может быть предложен способ, основанный на методе Монте-Карло.

Определим вероятность появления постельных трещин p_H в качестве границ интервалов (столбиков керна) в колонке скважины на основе ранее данного определения, т.е. вычтя из единицы вероятности всех КГТ. Беря колонку скважины, каждую границу между двумя интервалами псевдослучайным образом с вероятностью p_H относим к постельным трещинам. Выполним такие вычисления для каждой скважины. Распределение интервалов между трещинами, которые мы отнесли к постельным, будем считать расчетным распределением для реализации. Повторим статистическое испытание несколько раз, и среднее значение по всему набору испытаний вероятности принадлежности межтрещинного интервала к определенному диапазону значений будем считать истинным значением вероятности для этого диапазона.

Теперь у нас имеется вся необходимая статистическая информация для расчета распределений площадей оснований и объемов блоков методом Монте-Карло.

Прежде всего, отметим, что основание блока, границами которого являются пары соседних вершин двух СТ, первая из которых наиболее распространена в массиве, а вторая наиболее близка к ортогональной ей — это максимальная площадь основания блока (эта величина может иметь разброс, но это не имеет существенного значения). Такое основание мы назовем базовым. Поэтому процесс моделирования разбиения площади на основания блоков крутыми трещинами (а блоки в первом приближении мы представляем в виде призм, основания которых лежат в плоскостях соседних постельных трещин) осуществляется так.

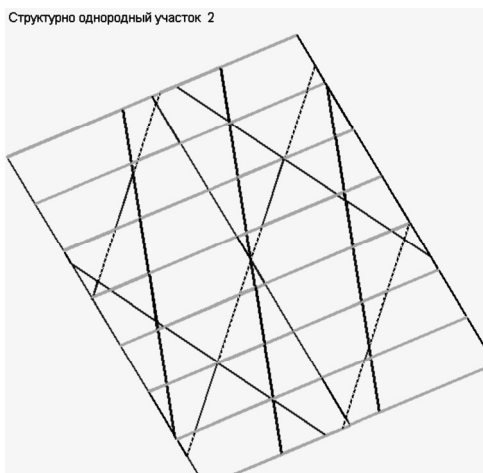
Случайным образом генерируется базовое основание, для чего генерируются случайные реализации азимутов простирания для пар соседних трещин первой и второй СТ. Межтрещинные расстояния полагаем равными средним значениям для соответствующих СТ, а при наличии информации об их разбросе — также как случайные реализации этих величин. В более развитом варианте предлагаемого подхода случайно генерируются не только направления, но и углы падения трещин первой и второй системы, что определяет псевдопризматическую боковую поверхность базового блока (ограниченного сверху земной поверхностью, а снизу границей залежи), затем этот блок разбивается на части сгенерированными трещинами, как крутыми, так и постельными.

Далее ограничимся изложением плоскостного варианта предлагаемого подхода. Для сгенерированного базового основания затем генерируются трещины остальных ГТ, которые могут его пересекать. Точку пересечения первых трещин 1-й и 2-й систем назовем начальной. В каждой СТ генерируются сначала по две трещины, расположенные по разные стороны от на-

чальной точки. Для этого случайным образом в соответствии с их распределениями генерируются: 1) значения a для каждой из двух трещин; 2) горизонтальное расстояние между ними (задается как среднее значение при отсутствии данных о его разбросе); 3) отношение расстояния от начальной точки до первой из двух трещин к межтрещинному расстоянию. Последняя величина равномерно распределена на интервале $[0,1]$. Ее определение вкупе с межтрещинным расстоянием (которое отмеряется в направлении, определяемым средним значением азимута простирания для ГТ) позволяет однозначно определить расположение сгенерированных трещин относительно базового основания. Для той трещины, которая пересекает базовое основание (это могут быть и обе трещины, и ни одна из них) строится соседняя, и так до тех пор, пока пересечение трещин с базовым основанием будет иметь место.

Основаниями блоков будут считаться все части базового основания, на которые оно делится совокупностью сгенерированных трещин, и которые уже ничем не делятся. В силу сделанных предположений это выпуклые многоугольники. Генерация базового основания и его разбиения выполняется многократно, все реализации считаются равновероятными. На основании совокупности площадей получившихся оснований блоков обычным образом строится эмпирическое распределение [4].

Для всевозможных пар i, j , где i — номер диапазона значений площадей (со средним значением S_i и расчетной вероятностью p_{S_i}), j — номер диапазона значений вертикальных расстояний между постельными трещинами (со средним значением L_{V_j} и расчетной вероятностью $p_{L_{V_j}}$) определим вероятность значения объема $V_{ij} = S_i L_{V_j}$ как $p_{S_i} p_{L_{V_j}}$. Наконец, группируя зна-



Разделение основания базового блока системными трещинами (детерминированный вариант)

чения V_{ij} по интересующим нас диапазонам значений объемов и суммируя вероятности значений, попавших в каждый диапазон, получим искомую оценку вероятности того, что блок попадет в данный диапазон (иначе говоря, долю запасов, представленную блоками с объемами в данном диапазоне).

Отметим, что реализация предлагаемого подхода требует, помимо некоторых расчетов в соответствии с методикой [2], выполнения вычислений четырех типов: 1) генерации

псевдослучайных величин с заданными распределениями; 2) обычных расчетов аналитической геометрии для определения точек пересечения прямых и их взаимного расположения; 3) расчетов площадей выпуклых многоугольников, что выполняется по аналитической формуле; 4) стандартных вычислений математической статистики.

Все эти вычисления по сути своей стандартны. Относительно количества порождаемых многоугольников можно утверждать, что для одной реализации базового основания оно не превысит нескольких десятков. Об этом свидетельствует и рис. 1, на котором по данным конкретного месторождения и участка показано одно возможное разбиение пары базовых оснований трещинами трех СТ. Правда, положения трещин определялось по детерминированным зависимостям, но нетрудно понять, что сдвиг или поворот линий отдельных трещин существенно не изменит количество получаемых многоугольников. Вместе с тем очевидно и то, что статистическое моделирование взамен единичного расчета существенно увеличит достоверность оценки искомых распределений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорович М.Б. Оценка месторождений облицовочного камня при поисках и разведке. — М.: Недра, 1976..
 2. Отраслевая инструкция по определению трещиноватости и блочности и формированию фронта горных работ на разрабатываемых месторождениях облицовочного камня / Анощенко НН., Карасев Ю.Г., Федотов Н.Е. М.: Министерство промышленности строительных материалов, 1989.
 3. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973.
 4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1970. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Валуев Андрей Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор, amvaluev@online.ru
 Шабловская Екатерина Александровна – аспирантка, katena1805@mail.ru
 Московский государственный горный университет,
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru