РАЗДЕЛ XV. ГЕОГРАФИЯ

Гриб Н.Н.², Кузнецов П.Ю.¹, Терещенко М.В.¹, Редлих Э.Ф.¹**Моделирование пространственной изменчивости физико-механических свойств массива горных пород**¹Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»²Южно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Россия, Нерюнгри)

doi:10.18411/lj-11-2018-139

idsp: lj-11-2018-139

Аннотация

В настоящей статье рассмотрена возможность построения математической модели пространственной изменчивости свойств массива горных пород с использованием данных файла управления процессом бурения системы «Aquila» бурового станка ДН-М на основе установленной математическими методами взаимосвязи параметров данного файла со значениями прочностных характеристик горных пород. Показано применение математического метода псевдолинейной интерполяции, позволяющего с достаточной долей достоверности производить оценку физико-механических свойств (ФМС) горных пород в межскважинном и межинтервальном пространстве массива горных пород. По результатам исследования разработано программное обеспечение, обеспечивающее оперативную и эффективную оценку физико-механических свойств массива горных пород с визуализацией полученного результата. Разработанный подход и программное обеспечение могут применяться для повышения эффективности буровзрывных работ действующих горных предприятий, а также при реализации научно-производственных исследований по математическому моделированию состояния массива горных пород.

Ключевые слова: программное обеспечение, прогнозирование пространственной изменчивости, физико-механические свойства горных пород, цифровая трехмерная геологическая модель, процесс бурения.

Abstract

The authors consider the possibility of constructing a mathematical model of the rock massif properties spatial variability using the drilling process control file data of the DH-M drilling rig Aquila system. The mathematical model is constructed on the basis of the file data parameters interrelation with the mountain rocks values strength characteristics. The article shows the application of the pseudo-linear interpolation mathematical method, which allows to estimate with an adequate degree of reliability the rocks physical and mechanical properties in the rock massif inter-wellbore and interval space. The authors presented software that provides an operative and effective evaluation of the rock massif physical and mechanical properties with the result obtained visualization. The developed approach and software can be used to increase the drilling and blasting operations efficiency of mining enterprises and for rock mass mathematical modeling.

Keywords: software, spatial variability prediction, physico-mechanical properties of rocks, digital three-dimensional geological model, drilling.

Эффективность и качество буровзрывных работ, при разработке месторождений полезных ископаемых в значительной степени зависит от изменчивости свойств массива горных пород. Поскольку изучение природной и техногенной изменчивости массива горных пород производится в основном выборочным методом, по сети естественных и

искусственных обнажений, набор исходных данных ограничен и имеет случайный характер. Ограниченность экспериментальных данных и дискретность сетей наблюдения приводят к необходимости создания обобщенных моделей. Особенность моделирования горно-геологических объектов в том, что моделируются не истинные геологические структуры, а представления о них или изменчивости свойств, наблюдаемых на изучаемом уровне строения объекта. Сложность пространственной изменчивости физико-механических свойств и ограниченность эмпирических данных препятствуют непосредственному применению детерминированных моделей. Проявление случайной изменчивости изучаемых свойств свидетельствует не об отсутствии геологических закономерностей, а лишь о недостатке знаний на данном этапе изучения недр [1].

При детальном изучении различных геологических объектов – месторождений полезных ископаемых или структурных элементов земной коры любого порядка, вплоть до отдельного пласта или блока, появляется возможность создания их трехмерных цифровых моделей. Их разработка существенно облегчает процесс исследования, визуализируя структуру контактных поверхностей отдельных пластов и разрезов в любых плоскостях, и корректируя модель по мере получения новой горно-геологической информации [2, 3, 4].

В общем случае создание модели осуществляется в следующей последовательности: формируются модели рельефа земной поверхности взрываемого блока и сети скважин, затем к стволам скважин привязываются места подсечения ими геологических границ и неоднородностей. Интерполяцией прогнозируются конфигурации границ в межскважинном пространстве в пределах блока, представляющего собой связную область. На итоговой стадии разработки появляется возможность создавать двумерные сечения изменчивости физико-механических свойств с глубиной и по простиранию, в данном случае, на основании векторов «файлов управления процесса бурения» F системы «Aquila» буровой установки DM-H, полученных при бурении взрывных скважин, далее – файлы [5, 6].

Современные компьютерные технологии позволяют визуализировать значения физико-механических свойств, соответствующие каждой точке двумерного сечения геологического тела. По этой причине для оценки строения и состояния массива горных пород оказалось достаточным построение не полной трехмерной цифровой модели, а её аппроксимации двумерными сечениями, которые показывают пространственную изменчивость физико-механических свойств: скорость распространения упругих волн (V_p), предел прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$), предел прочности при растяжении (σ_r), объемная плотность (ρ).

В качестве метода построения двумерных сечений выбрана псевдолинейная аппроксимация между векторами файлов: пусть Y_1 и Y_2 – наблюдаемые значения в точках X_1 и X_2 , и мы хотим оценить значения Y' в точке X' . Считая зависимость в промежуточных точках линейной, вычисления проведём по следующей формуле [6, 7]:

$$Y' = \frac{(Y_2 - Y_1)(X' - X_1)}{X_2 - X_1} + Y_1 \quad (1)$$

Допускается, что разность значений в двух соседних точках является линейной функцией расстояния между ними. Метод даёт удовлетворительные результаты, когда число равномерно расположенных точек и точек наблюдений приблизительно равно. Если исходные данные расположены не регулярно, и промежуточные значения должны быть вычислены для каждой пары наблюдений, то оправдано применение линейной интерполяции.

В предшествующих исследованиях [2] при построении моделей однородных блоков использовалась линейная интерполяция.

Анализируя экспериментальные результаты [2] установления связей и зависимостей между физико-механическими свойствами буримых пород и значениями «файла управления процесса бурения» F, которые были выполнены для вскрышных пород разреза «Нерюнгринский» на экспериментальном полигоне, где было пробурено 5 скважин на расстоянии 1 м. друг от друга, причем скважины 1 и 5 были пробурены буровым станком ДМ-Н с использованием системы Aquila, а скважины 2-4 были пробурены станком для разведочного бурения с полным отбором керна по всему стволу скважины.

В петрофизической лаборатории проведено изучение ФМС образцов керна из скважин 2-4.

По результатам испытаний получены следующие параметры физико-механических свойств:

- скорость распространения упругих продольных волн в породе V_p , км/сек;
- предел прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжения σ_r МПа;
- объемная плотность пород, ρ_0 г/см³;
- коэффициент пористости, %;
- влажность, %.

Далее был выполнен регрессионный анализ между данными «файла управления процесса бурения» F и экспериментально полученными значения физико-механических свойств [2].

Установленные корреляционные связи описывается уравнением регрессии вида:

$$y = \frac{x}{a + b \cdot x}$$

Коэффициент корреляции между параметрами векторов файла меняется в пределах $0.5 < R < 0.95$, коэффициент вариации $S/X \leq 0.2$ – с достоверностью не ниже 95%. Где: S - среднее квадратичное отклонение, X - средняя величина

Это явилось основанием рассматривать взрываеый блок как связанное геологическое тело, а его модель - строить в виде гладкого многообразия размерности ≥ 3 . Разброс параметров векторов файла объясняется естественной неоднородностью и техногенной трещиноватостью пород. Построена регрессия вида:

$$Y = f(X) = \frac{X}{A + BX}, \quad (2)$$

где: X – средние значения изучаемых параметров рассчитанных по всем анализируемым скважинам, а Y – оценка дисперсии средних значений изучаемых параметров; параметры: $A = -0.1941769$, $B = 3.225438E-02$.

Коэффициент корреляции по данной регрессии составляет $R = 0.9014131$, что согласно теории А.Б. Вистелиуса [8] означает, что весь взрываеый блок образовался в результате одного процесса и что блок – одного петрографического состава.

Обработка, интерпретация, моделирование строения, состава и состояния массива горных пород базируются на предположении о том, что трехмерное геологическое пространство может быть с успехом аппроксимировано системой двумерных слоев [9, 10]. В работе [2] предложен метод аппроксимации трехмерных распределений параметров физико-механических свойств посредством двумерных сечений. Неслучайная изменчивость позволяет оценить характер анизотропии свойств массива горных пород и выдержанность его строения по различным направлениям. Ее характеристика служит основой выбора расстояний между скважинами и конструкции массы заряда. Случайная изменчивость оказывает непосредственное влияние лишь на статистическую оценку средних характеристик физико-механических свойств, анизотропия которых проявляется в различии неслучайной изменчивости изучаемого параметра по разным направлениям. Мерой анизотропии I служит отношение среднего числа n элементов неоднородности,

пересекаемых линиями, проведенными в заданном направлении, к длинам этих линий l в пределах изучаемого блока: $I = n/l$ [9, 10].

Таким образом, представления об анизотропии свойств и строения массива горных пород зависят и от их природных свойств, и от расположения скважин разбуриваемой сети.

В качестве инструмента при построении двумерных сечений использовались среда программирования Delphi и пакет функций открытой графической библиотеки OpenGL [11, 12], возможности которой позволяют получать достоверные и наглядные картины сечений.

Разработанная прикладная программа позволяет оперативно строить двумерные разрезы и карты произвольной ориентации, определять наиболее информативные виды разрезов и карт. Кроме того, текущая версия программы позволяет визуализировать трещины в блоках (при условии, что угол падения трещины не очень велик $\text{tg}\varphi \leq h/l$, где h – расстояние между линиями горизонта, l – расстояние между скважинами).

Программа автоматизированной системы геологического моделирования разделены на три блока: ввода-вывода, преобразования матриц и прогноза геологических границ.

Блок ввода-вывода выполняют запись в файл информации матричного вида об одном участке по одинаковой сети: ряду скважин, вывод этой информации и построение разрезов изоповерхностей. При этом выполняется контроль на минимально и максимально допустимые значения, для исключения типичных ошибок. В построении изолиний применена интерполяция с помощью метода прямоугольников и трапеций. Предусмотрены варьирование масштабом, дополнительное сглаживание границ изоповерхностей, отображение их различным цветом. При отсутствии информации в отдельных частях числовой модели на карте изоповерхностей эти участки отмечаются белым цветом.

При визуализации прочностных разрезов интерполяционные точки располагаются равномерно через заданный интервал. В этих точках значения физико-механических свойств определяются интерполяцией, и в качестве исходных используются точки модели в пределах квадрата со стороной, равной шагу сети описания модели.

Блок преобразования данных разработана на основании установленных корреляционных связей физико-механических свойств горных пород с данными файла F [5]. Уравнения регрессий получены для четырех параметров: $\sigma_{сж}$, σ_r , V_p , δ_0 .

$$\sigma_{сж} = 165,313 \cdot \text{EXP} \left(\frac{27,11714}{F_n} \right) + 2,018, \text{ (мПа)}, \quad (3)$$

$$V_p = 5,112606 \cdot \left(\frac{F_n}{13,34124 + F_n} \right) + 0,08, \text{ (км/с)}, \quad (4)$$

$$\delta_0 = \frac{F_n}{(1,204589 + 0,3686797 \cdot F_n)} - 0,0576, \text{ (г/см}^3\text{)}, \quad (5)$$

$$\sigma_p = \left(\frac{F_n}{(3,255616 + 0,688612 \cdot F_n)} \right)^6 + 1,299, \text{ (мПа)}, \quad (6)$$

где F_n – значения, взятые из файла управления бурением станка «Aquila» [7, 8].

В программе предусмотрен ввод данных из файла и с клавиатуры. Данные представляются в виде таблицы 1, в которой первая колонка – параметр F_n (вводится

пользователем), колонки ($\sigma_{сж}$, σ_p , V_p , δ_0) рассчитываются по вышеприведённым формулам.

Таблица 1

Пример расчета физико-механических свойств

F_n	V_p , км/сек	δ_0 , г/см ³	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа
7.84	1.968	1.914	7.220	0.653
18.96	3.077	2.313	41.570	2.566
48.64	4.088	2.541	96.682	5.476
29.71	3.604	2.443	68.379	3.967
44.08	4.000	2.525	91.377	5.189
33.338	3.727	2.470	75.309	4.332

На практике применяются три способа описания карт изолиний: координатами вершин многоугольников, аппроксимирующих изолинии; координатами характерных точек поверхности; числовыми матрицами, элементы которых являются глубинами или альтитудами описываемой поверхности в узлах прямоугольной сети. Исходя из данных, полученных из «файла управления процесса бурения» системы «Aquila», нами принят третий способ - описание карт изолиний в узлах прямоугольной сети. При этом максимальный угол тел, описываемых контактными поверхностями, не может превышать $\alpha = \arctg(\Delta H / \Delta L)$, где ΔH – перепад глубин в соседних точках, ΔL – шаг сети по горизонтали.

Следует подчеркнуть, что контактными поверхностями можно описать крупные относительно применяемой сети тела, так как при малом количестве точек, попадающих в контур, аппроксимация может оказаться недопустимо грубой. Густота сети должна обеспечить удовлетворительную точность определения контактной поверхности в любой точке участка путём линейной интерполяции элементов матрицы, соответствующих узлам ячейки, в пределах которой находится определяемая точка [6, 9, 10, 13]. При интерполяции будем применен следующий приём. Естественное предположить, что в центре ячейки значение равно среднему из значений, заданных в узлах [6, 9, 10, 13]. На основании этого в центре ячейки (рис. 1) выставим точку со значением, равному среднему значению. Теперь в ячейке можно сформировать четыре треугольника, и в пределах каждого из них определить значения путём проведения плоскостей через известные значения в вершинах треугольника.

Рисунок 1. Интерполяционная ячейка. 1-4 номера треугольников

Введём обозначения: $\beta = (y - y_1) / \Delta y$. Тогда легко получить выражения для расчета значений в пределах первого – четвёртого треугольника соответственно:

$$F_1(x, y) = (1 - \alpha - 0,5\beta)F_1 - (\alpha - 0,5\beta)F_4 + 0,5\beta F_3 + 0,5\beta F_2, \quad (7)$$

$$F_2(x, y) = (1 - \beta - 0,5\alpha)F_1 - (\beta - 0,5\alpha)F_2 - 0,5\alpha F_3 + 0,5\alpha F_4, \quad (8)$$

$$F_3(x, y) = (\alpha + \frac{1+\beta}{2})F_3 + (\alpha - \frac{1-\beta}{2})F_2 + \frac{1-\beta}{2}F_1 + \frac{1-\beta}{2}F_4, \quad (9)$$

$$F_4(x, y) = (\beta - \frac{1+\alpha}{2})F_3 - (\beta - \frac{1-\alpha}{2})F_4 + \frac{1-\alpha}{2}F_1 + \frac{1-\alpha}{2}F_2, \quad (10)$$

Аналогичные результаты можно получить путём линейной интерполяции по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Результирующая поверхность при этом не будет плоскостью, в связи, с чем интерполяция называется псевдолинейной [6, 9, 10, 13].

Опыт показывает, что в зависимости от сложности рельефа контактных поверхностей густота сети должна быть достаточно детальной [2, 14, 15]. Поэтому для отображения двумерных вертикальных сечений по рядам скважин используется равномерная сеть с шагом по $Y = 8$ м, и шагом по $X = 0,5$ м, сгущённая до равномерной сети с шагами 0.05м и 0.1м по осям X и Y соответственно. Такое сгущение сети позволяет избежать сложных и трудоёмких вычислений прохождения изолиний и приступить к прямому выводу на экран значений результирующей матрицы попиксельно, используя возможности OpenGL (рис.2).

Рисунок 2. Общий вид окна работающей программы

Для представления объёмного изображения результатов расчетов интерполяции физико-механических свойств горных пород используется куб, грани которого являются двумерными сечениями по рядам исследуемого блока. Каждая пара противоположных граней содержит одинаковое количество отображаемых скважин. Для каждой пары скважин строится отдельное изображение. После построения изображений всех пар скважин, отображаемых на объёмном рисунке, полученные текстуры накладываются на грани куба в соответствии с пространственным положением. После вывода изображения на экран, пользователь клавишами управления курсором может вращать куб, изучая подробно изображения каждой пары или тройки граней, что позволяет более наглядно представить пространственную изменчивость физико-механических свойств в исследуемом блоке.

Таким образом, используя данные файлов управления процессом бурения системы Aquila бурового станка ДН-М, их корреляционные связи с прочностными и

упругими характеристиками горных пород, математический метод псевдолинейной интерполяции и предлагаемое программное обеспечение, возможно достоверно прогнозировать физико-механические свойства горных пород в межскважинном пространстве подготавливаемого к взрыву блока, для определения оптимальных условий ведения взрывных работ

1. Гриб Н.Н. Разработка методов прогнозирования технологических характеристик углей, литологического состава и физико-механических свойств углевмещающих пород Южно – Якутского бассейна по геофизическим данным: Автореф. Дис. ... д-р.техн. наук. - Кемерово, 1999. – 49 с.
2. Алексеев Г.Ф. Управление комплексом буровзрывных работ в сложных горногеологических условиях Южно-Якутского бассейна: монография / Г.Ф. Алексеев, Н.Н. Гриб, Д.А. Самохин. – Якутск: Якут. филиал Изд-ва СО РАН, 2003. – 187 с.
3. Н.Н. Гриб, А.А. Сясько, А.В. Качаев, П.Ю. Кузнецов, М.В. Терешенко. Изучения физико-механических свойств массива горных пород по данным волнового акустического каротажа//Уголь №10-2016 /1087/ - С. 79 – 85.
4. Прогноз устойчивости углевмещающих пород по геофизическим данным /Гриб Н.Н. и [др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. - №6-2. – С. 397-401.
5. Aquila Mining System Ltd.: Инструкция по эксплуатации системы ДМ-1/3/5 для буровых машин “Ingersoll – Rand” ДМ-МЗ и ДМ-Н., 340101, т. 1.0, 1996. - 437 с.
6. Мартынов Е.В. Математические методы моделирования параметров геологических процессов и явлений / Е.В. Мартынов. - Мурманск: Изд-во МГТУ, 2011. - 136 с.
7. Коробейников А.Ф. Теоретические основы моделирования месторождений полезных ископаемых. / А.Ф. Коробейников. - Учебник для вузов. Издание второе, исправленное и дополненное. - Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - 182 с.
8. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии / А.Б. Вистелиус. – М.: Наука, 1980. - 389 с.
9. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. – Ижевск : Ин-т компьютерных исслед., сор. 2009. – 460 с.
10. Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева; под ред. Р. В. Арутюняна; Российская акад. наук, Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики. – Москва: Наука, 2010. – 327 с
11. Флёнов М.Е. Библия Delphi. / М.Е. Флёнов. – 3-е изд., переработанное и дополненное – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 688 с.
12. Гинсбург Д. OpenGL ES 3.0. Руководство разработчика / Д. Гинсбург, Б. Пурномо; пер. с англ. А. Борескова. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 448 с.
13. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – 2-е изд. – Москва: URSS, 2011. – 487 с.
14. Фокин В.А. Методические аспекты анализа технологической информации при производстве буровзрывных работ в условиях карьеров / В.А. Фокин; Российская акад. наук, Кольский науч. центр, Горный ин-т. – Апатиты : Кольский науч. центр РАН, 2015. – 133 с.
15. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности / Б. Н. Кутузов. - Москва: Горная книга: Изд-во МГУ, 2011. – 512 с.