

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**УДК 622.142.5:004.42**

**С.В. Шакlein, К.И. Скрипай**

### **АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ МОЩНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА ОСНОВАНИИ УРАВНИВАНИЯ СЕТИ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

Известно, что в основу отечественной технологии моделирования месторождений положена теория геохимического поля П. К. Соболевского [1] в соответствии с которой недра Земли рассматриваются как сложный комплекс геохимических полей и форм залегания. Характерные свойства этих полей являются функциями координат, а сами они отвечают условиям конечности, однозначности, непрерывности и плавности. Модели этих поверхностей представляют собой непрерывные поверхности топографического порядка.

Учитывая незначительное количество выполняемых прямых определений мощности, исключающее применение геостатистических подходов, практическое построение моделей мощности пласта выполняется геометрическими методами, предполагающими линейный характер ее изменения в пространстве между замерами.

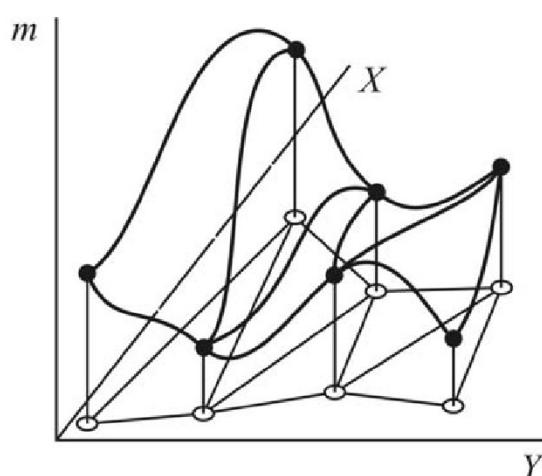
К числу явных недостатков этого метода относятся априорное признание «равновесности» замеров и спорное предположение о невозможности нахождения в пространстве между парой замеров мощности, большей или меньшей измеренных в них.

Альтернативный подход к моделированию состоит в применении для описания топографических поверхностей аналитических функций. Однако до настоящего времени никому пока не удалось добиться удовлетворительно описания пове-

дения признака аналитическими функциями в пределах значительных участков недр. Это, вероятно, связано с тем, что идея такого описания противоречит теоретическим представлениям о топографическом характере геополя признака. В связи с этим современных подход к аналитическому описанию состоит в переходе на «лоскутное» моделирование, т. е. на использование аналитических функций для описания малоразмерных многоугольных фрагментов поля геологического показателя. Однако этот подход упирается в нерешенную проблему «склейки» соседних «лоскутов», т. е. в обеспечение непрерывности и плавности модели по П. К. Соболевскому.

Исходя из постулатов теории геохимического поля П. К. Соболевского, для аналитического описания поверхности «лоскутов» наиболее перспективными являются сплайн-функции [2].

Таким образом, допустимо предположить, что отвечающий представлениям теории геохимического поля П. К. Соболевского метод моделирования мощности может заключаться в моделировании геополя признака с помощью «лоскутов» (патчей), каждый из которых имеет в проекции форму треугольника (с вершинами – точками измерений), а поверхность которого описывается сплайн-функцией, например, треугольником Bézier (рис. 1).



*Рис. 1. «Лоскутная» горно-геометрическая модель мощности пласта  $m$*

Если в вершинах треугольных «лоскутов» будут заданы не только значения признака, но и элементы залегания геометризируемой топографической поверхности, то склеивание «лоскутов» такой модели будет обеспечиваться автоматически, за счет одинаковых параметров сплайн-функции, формирующих ребра треугольников. К сожалению, для такого признака как мощность пласта, прямые измерения элементов залегания его топоповерхности попросту отсутствуют. Поэтому получение ожидаемых значений элементов залегания этой топоповерхности может быть осуществлено только на основе использования некого дополнительного условия. В качестве такового предлагается использовать содержащиеся в теории П. К. Соболевского представления об однозначности поля геологического показателя (в каждой точке пространства признак может принимать одно единственное значение). Очевидно, что этому условию должно отвечать не только поле, но и его модель. Причем чем выше уровень неоднозначности модели, тем ниже ее достоверность. Именно это обстоятельство положено в основу критериев разведанности различных характеристик угольных месторождений [2].

Для оценки неоднозначности такого показателя как мощность пласта используются дельта-критерии разведенности [2], определяемые в пределах четырехугольных ячеек сети измерений, вершины которых предварительно условно нумеруются цифрами от 1 до 4, начиная с произвольной вершины и при увеличении номеров по мере обхода четырехугольника по (или против) направлению движения часовой стрелки.

В каждом четырехугольной ячейке проводятся две диагонали, пересекающиеся в точке  $K$ . Затем, определяются два значения мощности пласта в точке  $K$ , получаемые в результате линейной интерполяции вдоль направления каждой диагонали. Разность между этими значениями является показателем неоднозначности модели – дельта-критерием разведенности  $\Delta$ .

Совершенно ясно, что теоретически значение дельта-критериев равно нулю. Реально значения критериев обусловлены влиянием погрешностей измерений и интерполяции, причем погрешности интерполяции являются определяющими. Отсюда следует полагать, что основной причиной ненулевых значений дельта-критериев являются погрешности интерполяции, связанные с предположением о линейном законе изменения признака. Применение нелинейной сплайн-интерполяции позволяет снизить этот вид погрешности и обеспечить равенство значений признака в точке пересечения диагоналей четырехугольных ячеек сети скважин.

Поэтому, имея значения дельта-критериев по всем ячейкам сети измерений, можно поставить задачу поиска наиболее вероятных значений «элементов залегания» топоповерхности мощности: необходимо найти для каждой точки измере-

ния такие значения угла и направления падения топоповерхности мощности, при которых дельта-критерии (своебразные «невязки») по всем ячейкам сети измерений одновременно стали бы равными нулю. В качестве дополнительного условия, направленного на обеспечение «плавности» по П. К. Соболевскому, налагается дополнительное условие минимального отличия получаемого криволинейного сечения поверхности от прямолинейного. Решение данной задачи может быть осуществлено методами уравнивания сетей геодезических измерений. Применительно к изучению геополей технология уравнивания ранее была разработана в целях выделения аномальных замеров и зон изменения мощности [2]. Однако для обеспечения решения задачи моделирования, в результате уравнивания каждый из замеров «получает» не поправку, а сразу две дополнительные характеристики – направление падения и угол падения плоскости, касательной к топоповерхности в точке измерений. Наличие этих характеристик позволяет перейти к описанию топографической поверхности сплайн-функцией – с помощью «лоскутов» Bézier.

Разработанный алгоритм геометризации реализован в форме компьютерной программы «*PNM*», предназначенной для использования геологическими службами угольных шахт. В связи с тем, что эти службы, в рамках исполнения своих функциональных обязанностей, выполняют геометризацию мощности пласта при подготовке горно-геологического прогноза по очистным выработкам, данная программа ориентирована именно на геометризацию мощности в контуре подготовленного выемочного столба.

В качестве исходных данных в программе используются данные по результатам измерений мощности в подготовительных штреках. Эти данные включают в себя сведения о номерах и геодезических координатах точек измерений, а также о значениях мощности в них. Эти данные могут вводится в программу как непосредственно с клавиатуры, так и импортироваться из табличного редактора *Excel*. Уже введенные данные могут быть экспортированы в *Excel*, а также записаны в специальный файл данных. Предусмотрено, что каждый файл данных содержит сведения по замерам, расположенным только по одному штреку.

По завершению ввода данных выполняется разделение (квадриангулирование) сети замеров на четырехугольные оценочные блоки по которым впоследствии производится расчет дельта-критериев разведенности  $\Delta$ .

Квадриангулирование выполняется интерактивно в специальном режиме (рис. 2). Для его выполнения пользователь с помощью курсора имеющего форму «прицела» выделяет вершины принадлежащих четырехугольнику замеров, обходя его по (против) направлению движения часовой стрелки. Выделение четырехугольников выполня-

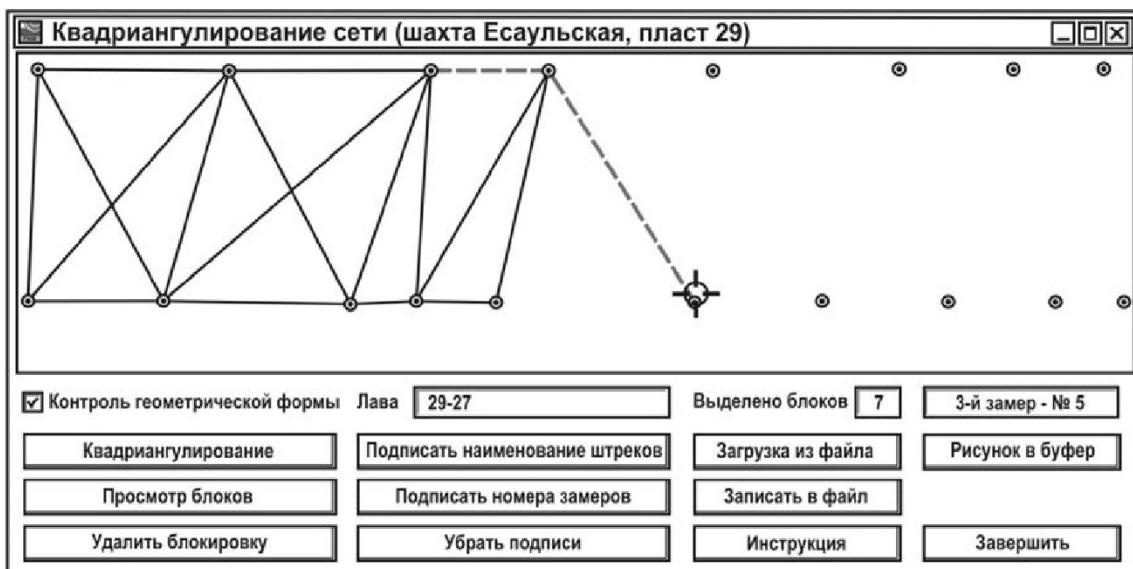


Рис. 2. Панель режима квадриангулирования программы «PNM»

ется под условием их обязательного перекрытия друг другом. Стороны уже выделенных четырехугольников отображаются на экране компьютера черным цветом, выделяемого – красным пунктиром.

Обязательное требование к оценочному четырехугольнику – его выпуклость проверяется автоматически. Признаком выпуклости является расположение точки пересечения диагоналей  $K$  внутри четырехугольника. Применительно к рассматриваемой задаче проверка выполняется крайне просто: точка  $K$  находится внутри четырехуголь-

ника  $ABCD$  если его площадь равна сумме площадей треугольников  $ABK$ ,  $BCK$ ,  $CDK$  и  $DAK$ . При квадриангулировании желательным является близость формы четырехугольника к прямоугольной. При включенном независимом переключателе «Контроль геометрической формы» проверяется деформированность, ромбовидность, вытянутость и косоугольность каждого выделяемого четырехугольника.

Созданный вариант квадриангулирования может быть отменен полностью (кнопка «Удалить блокировку») или частично (в подрежиме, запус-



Рис. 3. Панель результатов уравнивания сети измерения мощностей

каемом нажатием кнопки «Просмотр блоков»). Подрежимы, включаемые нажатием кнопок «Подписать номера замеров» и «Подписать наименования штреков» позволяют нанести соответствующие текстовые данные на графическую панель режима. Полученное графическое изображение может быть занесено в стандартный буфер обмена Windows простым нажатием кнопки «Рисунок в буфер». Результаты выполненного квадриангулирования могут быть записаны в специальный формируемый программой файл (кнопка «Записать в файл») или быть подгружены из него (кнопка «Загрузка из файла»).

После завершения квадриангулирования запускается режим «Геометризация». После его старта производится расчет дельта-критериев (результаты отображаются на специальной панели), а затем – выполняется уравнивание сети выполненных измерений. Само уравнивание выполняется методом условий, в ходе которого решается система уравнений, число которых в два раза превышает число выделенных оценочных четырехугольников. Полученные в результате уравнивания элементы залегания топографической поверхности мощности в точках измерений отображаются на специальной панели (рис. 3).

В верхней ее части приводится общая оценка качества выполненного уравнивания, производимая на основе сравнения значений критериев разведенности полученных с использованием линейной (до уравнивания сети) и сплайн-интерполяции (после уравнивания). Сами результаты уравнива-

ния отображаются в таблице (углы падения – в градусной мере и дополнительно с разделением на градусы, минуты и секунды). Содержание таблицы может экспортироваться в Excel (кнопка «Передать в Excel»). Переход к построению модели мощности пласта обеспечивается нажатием кнопки «Продолжение».

После получения значений «элементов залегания» выполняется построение «лоскутной» модели мощности в режиме «Геометризация» (рис. 4). Для этого вся область построений автоматически фрагментируется на треугольные «лоскуты». Триангуляция выполняется в пакетном режиме на основе применения адаптированного к условиям решаемой задачи метода триангуляции Делоне, исключающего возможность пересечения выделяемых треугольников. После нажатия кнопки «Триангуляция» пользователь имеет возможность ознакомиться с ее результатами.

Используя элементы залегания касательных к топоповерхности плоскостей и значения мощности в вершинах «лоскутов», каждый из них описывается криволинейными, аналитически заданными поверхностями – треугольниками Bézier (бикубическими сплайнами).

Графическое отображение «лоскутной» модели осуществляется с использованием не горно-геометрических, а геоинформационных подходов. При этом вся площадь оценки разделяется на равновеликие «объекты», каждому из которых присваивается атрибутив в форме цвета его закраски. Цвет выбирается в зависимости от попадания

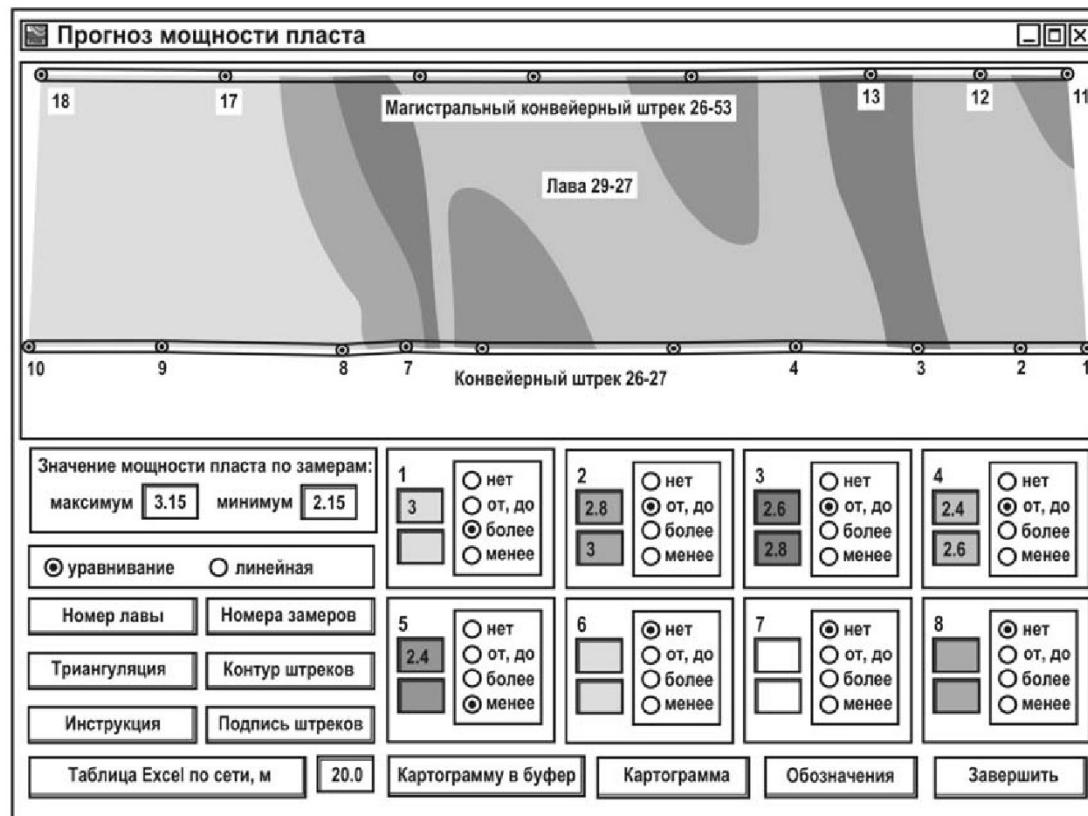


Рис. 4. Панель геометризации (прогноза) мощностей

значения мощности в его центральной точке в тот или иной заданный пользователем интервал. Размер «объекта» принимается незначительным – не более геометрической базы модели. В качестве размеров «объекта» в программе принят размер, соответствующий пиксели экрана компьютера в заданном масштабе изображения. В результате оцениваемый контур окрашивается несколькими цветами, границы между которыми соответствует изолинии признака.

Собственно построение начинается с указания цветов для характеристики диапазона изменения мощности. Всего пользователь имеет возможность выбрать восемь различных градаций цвета, что соответствует возможности построения семи изолиний. Этого числа вполне достаточно, поскольку нормативные документы, регламентирующие выполнение горно-геологического прогноза по выемочному столбу предусматривают построение только трех изолиний.

Задание цветов осуществляется с помощью восьми панелей, в которых указываются значения признака (в окнах ввода, цвет которых, соответствует цвету закраски). Кроме того, с помощью групп зависимых переключателей, указывается каким образом осуществляется закраска. Включение переключателя «от, до» означает, что выбранным цветом будет закрашен контур, имеющий заданный двумя числами диапазон изменения мощности.

При включении переключателей «более» или «менее» указанным цветом закрашивается контур, мощность в котором превышает или не превышает значение, указанное в верхнем окне ввода. Включение переключателя «нет» исключает закраску. Собственно закраска выполняется после нажатия кнопки «Картограмма».

При необходимости пользователь имеет возможность нанести на рисунок наименование штреков, лавы и номера замеров. Сформированная картограмма может быть передана в буфер обмена

*Windows* путем нажатия клавиши «Картограмму в буфер». Нажатие кнопки «Обозначения» выводит на экран условные обозначения (цвета и соответствующие им значения признака), которые также могут быть переданы в буфер обмена.

Программа позволяет также построить картограмму мощности, построенную при описании «лоскутов» плоскостями (при выборе режима специального зависимого переключателя «линейная»).

В практике работы геологических служб для построения изолиний часто используется геоинформационная система *Golden Software Surfer*. Для обеспечения сопряженности с этой системой, с помощью кнопки «Таблица Excel по сети, м», в редакторе *Excel* формируется таблица данных, ориентированная на экспорт в *Golden Software Surfer*.

В эту таблицу заносятся не только данные по исходным замерам сети наблюдений, но и значения мощности в узлах наброшенной на участок квадратной сетки, полученных на основании использования результатов «лоскутного» моделирования. Размер стороны этой сетки самостоятельно указывается пользователем в специальном окне. Подобный порядок формирования данных для *Golden Software Surfer* снимает существующую проблему выбора в ней используемого метода интерполяции и многочисленных настроек за счет высокой плотности генерируемой сети данных.

Предложенный алгоритм моделирования мощности пласта принципиально отличается от всех известных тем, что неоднозначность представлений о характере изменения мощности пласта рассматривается в нем в качестве позитивной информации. Ее использование позволяет перейти от линейной интерполяции к нелинейной, что предопределяет возможность повышения качества изучения мощности пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболевский, П. К. Современная горная геометрия / П. К. Соболевский // Социалистическая реконструкция и наука. – 1932. – № 7. – С. 42–78.
2. Шакlein, С. В. Количественная оценка достоверности геологических материалов угольных месторождений / С. В. Шакlein. – Кемерово: Кузбассиздат, 2005. – 243 с.

### □ Авторы статьи

#### Шакlein

Сергей Васильевич, докт. техн. наук, проф. каф. маркшейдерского дела, кадастра и геодезии КузГТУ, вед. научн. сотр. Кемеровского филиала ИВТ СО РАН.  
E-mail: [svs1959@mail.ru](mailto:svs1959@mail.ru)

#### Скрипай

Константин Иванович, главный геолог шахтоуправления «Талдинское-Западное» ОАО «СУЭК-Кузбасс» (OJSC SUEK-Kuzbass).  
E-mail: [skripayki@suek.ru](mailto:skripayki@suek.ru)