УДК 622.1: 550.8

В.А. Антонов

## МОДЕЛЬ САМОСОГЛАСОВАННОЙ ТРЕНДОВОЙ ОЦЕНКИ ПРИЗНАКОВ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ажные для горного предприятия процессы планирования и прогнозирования минерально-сырьевых и технологических показателей основаны на геоинформационном отображении геосистем, как совокупностей структурно связанных и взаимодействующих между собой геологических и технологических объектов горного предприятия. Целью геоинформационного отображения геосистемы является формирование информации о закономерностях размещения ее элементов в геопространстве и времени, выявленных с необходимой для практики экспрессностью и допустимой погрешностью, которые обеспечивают принятие технологами предприятия решений в сфере управления горным производством. Такое отображение требует обобщенного методологического подхода к оценкам физических, геометрических, геологических и технологических признаков горного массива, минерального сырья и продуктов его переработки. Эти признаки прямыми или косвенными методами измеряются в опорных точках и сетях в ходе мониторинговых геологических, геофизических, маркшейдерских и технологических наблюдений. Измеренные признаки разнородны по составу, а их связи из-за природной неоднородности геосистем отличаются сложностью и многопараметровостью. Выявление на этом фоне закономерностей размещения признаков определяется масштабом их распространения и учетом значимых и незначимых для конкретной информационной задачи структурных неоднородностей горно-геологических и технологических объектов горного предприятия.

В данной работе, исходя из представлений о структурной дифференциации практических информационных задач и горно-геологических объектов, исследования направлены на установление взаимосвязей детерминированной и случайной составляющей различных признаков минерального сырья. Рассмотрена модель обработки и отображения мониторинговых данных в виде самосогласованного до случайной составляющей тренда. Приведены структура тренда, условия его формирования и развития.

Трендовым моделированием в пределах выделенного структурного уровня (горный отвод, горный блок, горный участок, фабрика, цех, участок цеха) решаются следующие задачи: выявление пространственного распределения кровли или подошвы пластов горных пород, их мощности и угловых элементов залегания: уточнение пространственного распределения зон повышенной трещиноватости горных пород и аномальных зон разрушения под действием горного давления; выявление закономерностей распределения в геопространстве содержания рудных компонентов, плотности и пористости горных пород; выявление корреляционных взаимосвязей качественных и технологических характеристик минерального сырья.

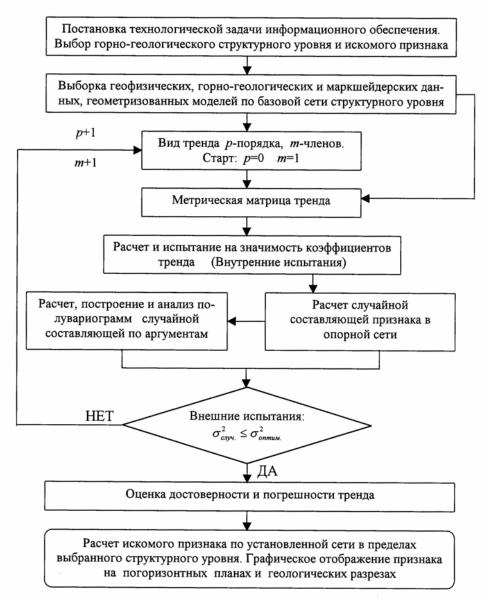


Рис. 1. Схема самосогласованного тренда

В модель трендовой оценки включаются координированные геометризованные данные, состоящие из точечных, линейных, площадных и объемных элементов горно-геологических и технологических объектов, а также атрибутивные качественные, физические и технологические данные, отнесенные к геометрическим и

технологическим элементам. Для математического моделирования взаимосвязей опорных данных перспективно применение полиномного тренд-анализа, традиционная схема которого широко известна [1, 2, 3]. Однако, она реализуется вполне однозначно лишь в случаях, когда известны основные параметры схемы, то есть ха-

рактер самого тренда и границы его применения. При постановке задач геоинформационного обеспечения горных предприятий такие данные чаще всего отсутствуют. Поэтому возникает неопределенность в постановке конкретной информационной задачи, связанная с обоснованием и выбором: необходимого и достаточного множества размещенных в геопространстве и времени опорных данных; приемлемой погрешности трендового прогноза; критериев направленности и достаточности в его развитии.

Предложенный самосогласованный тренд представляет собой аналитическое выражение детерминированной части признака горно-геологического объекта в виде полинома, необходимая степень и достаточное количество членов которого устанавливаются согласованием в процессах последовательного приближения дисперсии трендовой оценки признака относительно его мониторинговых значений с дисперсией признака за счет их воспроизводимости и влияния незначимых структурных неоднородностей объекта вдоль каждого трендового аргумента. Схема самосогласованного тренда представлена на рис. 1.

В соответствии с поставленной горнотехнологической задачей информационного обеспечения выбирается структурный уровень горно-геологи-ческих объектов и определяется искомый признак. Под признаком понимается, например, длина в геопространстве (мощность пласта, размер зоны трещиноватости), а также атрибутивное свойство минерального сырья и горных пород (содержание рудного компонента). В пределах структурного уровня и в зонах, прилегающих к нему, производится выборка геофизических, горно-геологических и маркшейдерских данных, геометризованных моделей по базовой сети аргументов - коррелянтов. Результаты измерения признака в отдельных точках геопространства образуют множество  $U_i$ , где i – номер измерения, изменяющийся от 1 до п. Значение признака зависит от аргументов X, изменяющихся так же в пределах своих множеств. Такими аргументами могут быть, например, координаты точек элементов площади или объема, время, отсчеты геофизических измерений — магнитная восприимчивость, кажущееся сопротивление, интенсивность излучения горных пород и др.

Предполагается, что любое из наблюдаемых значений признака  $U_i$  состоит из суммы двух компонент, одна из которых  $U_{Ti}$  — закономерная, т.е. трендовая составляющая, а другая  $U_{ci}$  — случайная составляющая. Трендовая компонента представлена алгебраическим полиномом степени p, состоящем из m членов. Например, при одном аргументе:

$$\begin{array}{l} U_{T1.2}=A_0+A_1x_1 \quad (p=1,m=2);\\ U_{T2.3}=A_0+A_1x_1+A_2x_1^2 \quad (p=2,m=3);\\ U_{T3.4}=A_0+A_1x_1+A_2x_1^2+A_3x_1^3 \quad (p=3,m=4) \ ,\\ \text{при двух аргументах:} \end{array}$$

$$U_{T1.3} = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 \quad (p = 1, m = 3);$$
  
 $U_{T2.6} = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_1 x_2 + A_4 x_1^2 + A_5 x_2^2$   
 $(p = 2, m = 6);$ 

$$U_{T3.10} = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_1 x_2 + A_4 x_1^2 + A_5 x_2^2 + A_6 x_1^2 x_2 + A_7 x_1 x_2^2 + A_8 x_1^3 + A_9 x_2^3 \ (p = 3, m = 10)$$
 . Коэффициенты тренда  $A_0, A_1, A_2, \ldots, A_{n-I}$  рассчитываются на основе метода наименьших квадратов [3, 4, 5, 6] случайной составляющей признака и определяются из системы уравнений, представленных в матричной форме

$$\begin{bmatrix} A_0 & 0 & 0 & \mathbf{K} & 0 \\ 0 & A_1 & 0 & \mathbf{K} & 0 \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K} & A_{m-1} \end{bmatrix} = [X_{mm}]^{-1} \cdot [X_{mn}] \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \mathbf{L} \\ U_n \end{bmatrix},$$

где  $[X_{mn}]$  - метрическая матрица аргументов тренда;  $[X_{mm}] = [X_{mn}] \cdot [X_{mn}]^T$ ; Т — знак транспонированной матрицы. Например, метрическая матрица для тренда

$$U_{T2.6} = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_1 x_2 + A_4 x_1^2 + A_5 x_2^2$$
 представляется в виде

$$[X_{mn}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & K & 1 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & K & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & K & x_{2n} \\ x_{11}x_{21} & x_{12}x_{22} & x_{13}x_{23} & K & x_{1n}x_{2n} \\ x_{11}^{2} & x_{12}^{2} & x_{13}^{2} & K & x_{1n}^{2} \\ x_{21}^{2} & x_{22}^{2} & x_{23}^{2} & K & x_{2n}^{2} \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты тренда могут иметь разную значимость в связи с относительной долей вклада каждого члена в его суммарный результат. В свою очередь в целом тренд описывает закономерность в изменении признака с некоторой погрешностью. Поэтому развитие тренда определяется двумя видами испытаний: внутренними по оценке значимости коэффициентов и внешними - на соответствие тренда поставленной информационной задаче.

Внутренние испытания коэффициентов тренда проводятся известным способом по критерию Фишера относительно выбранного (например 5 %) уровня. При превышении указанного уровня коэффициент включается в тренд, а в противном случае исключается из рассмотрения. Такая процедура позволяет оптимизировать состав тренда внутри его структуры.

Главной особенностью предложенной модели тренда являются внешние испытания, в процессе которых устанавливается степень его достаточности или направление дальнейшего развития. Испытания связаны с оценкой распределения случайной составляющей искомого признака вдоль каждого аргумента. Случайная составляющая признака в точке *i* опорной сети определяется разностью

$$U_{ci} = U_i - U_{Ti} .$$

Дисперсия признака  $\sigma^2_{\text{случ}}$  с учетом этой разности сравнивается с его дисперсией  $\sigma^2_{\text{оптим}}$ , обусловленной воспроизводимостью метода получения признака в опорной сети и влиянием незначимых структурных неоднородностей объекта вдоль каждого трендового аргумента. Соотношение

$$\sigma_{c_{TVY}}^2 \leq \sigma_{onmum}^2$$

является критерием, по которому оценивается степень самодостаточности, т.е. согласованности тренда. Величина  $\sigma^2$  олишм устанавливается на основе анализа полувариограммы  $\chi(\Delta x)$  [3, 7, 8] случайной составляющей признака вдоль каждого аргумента:

$$\gamma(\Delta x) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{n} \left[ U_c(x_i + \Delta x) - U_c(x_i) \right]^2,$$

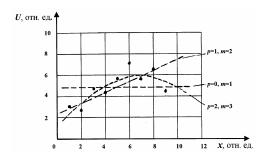
где  $\Delta x$  — интервал между значениями аргумента  $x_i$  и  $x_i$ + $\Delta x$ ; N — количество возможных интервалов  $\Delta x$  на множестве  $x_i$ . В качестве оптимальной  $\sigma^2_{onmum}$  принимается дисперсия  $\sigma^2_{cnyu}$ , при которой минимумы полувариограмм, разделенные размерами значимых структурных неоднородностей объекта, близки к нулю (составляют допустимо малую величину).

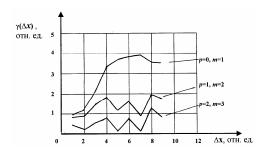
Отклонение  $U_{ci}$  можно считать случайным лишь условно по отношению к выделенной закономерной составляющей тренда на данном этапе его развития, которое определяется обратной связью с результатами анализа полувариограмм. На каждом этапе развития тренда происходит последовательное приближение  $\sigma^2_{cnvq}$  к  $\sigma$ <sup>2</sup><sub>оптим</sub>. Для осуществления такого приближения представляет интерес выявление закономерности в изменении самой случайной составляющей. Поскольку величина  $U_{ci}$  знакопеременная, то полувариограмма обладает свойством повторяемости, т.е. периодичности. По характеру графика полувариограммы устанавливается: размер периодически повторяющейся структурной неоднородности вдоль аргумента, наличие остаточного тренда в пределах значимых и незначимых структурных неоднородностей объекта. С увеличением количества трендовых приближений величины  $\sigma^2_{c_{ny_4}}$  и  $\gamma(\Delta x)$  уменьшаются. При этом к нулевому значению стремятся в первую очередь минимумы полувариограмм, соответствующие наиболее крупным структурным неоднородностям объекта, которые отображаются трендом. В процессе дальнейших приближении тренда к нулевой отметке опускаются минимумы полувариограмм, соответствующие учтенным значимым неоднородностям меньших размеров. Состояние тренда, при котором остались неучтенными незначимые неоднородности, принимается достаточным. В стартовом состоянии тренд имеет минимальную степень и количество членов. На каждом этапе его дальнейшего развития, в зависимости от состояния полувариограмм, в полином добавляется член, содержащий смешанные произведения аргументов, или член одного аргумента с повышенной степенью. Таким образом, тренд проходит последовательно стадии своего развития в направлении роста степени и числа членов при условии согласования его результатов с выявленной оптимально допустимой дисперсией искомого признака.

Разделение значимых и незначимых структурных неоднородностей геоло-гических и технологических объектов и, соответственно, выделение случайной составляющей признака зависит от информационных требований, содержашихся В поставленной горногеологической задаче. Если в информационной задаче требуется оценка закономерности в изменении признака по совокупности крупных геологических структур с целью регионального прогноза признака, то тренд сглаживает мелкие структурные особенности геологического образования. В этом случае отклонения признака относительно тренда в опорных точках, обусловленные влиянием этих особенностей, включаются в случайную составляющую. Степень сглаживания определяется практическим назначением тренда. Она зависит от дальнейшего его использования в схемах усреднения признака по выделенному объему горного массива, или в прогнозировании признака в отдельных частях массива. Например, нет необходимости выделять детально трендом малые неоднородные структуры горного блока, если он будет отрабатываться горными работами как целостный объект и требуется усреднение признака по его размерам. Если же блок будет отрабатываться по отдельным зонам, размер которых соизмерим или меньше размеров неоднородных участков блока, то особенности признака, связанные с его неоднородностью включаются в тренд и, соответственно, случайная величина признака уменьшается. Совершенствование тренда по оптимальному порядку и количеству членов в конечном итоге определяется достаточной для практической задачи дисперсией признака, которая устанавливается в результате анализа полувариаграмм его случайной компоненты.

В качестве примера практического применения предложенной модели на рис. 2 и 3 приведены результаты трендовой оценки содержания меди в руде вдоль горной выработки и соответствующие полувариограммы его случайной компоненты. Признаком является измеренное в отдельных точках профиля содержание меди, а аргументом - координата точки профиля x, выраженные в относительном виде. Согласно информационной задаче размер значимой неоднородности руды ограничивался неравенством  $\Delta x \ge 2$ . Учитывая наличие одного аргумента, матричное уравнение коэффициентов тренда в процессе внешних испытаний развивалось последовательно в следующих направлениях.

p = 0; m = 1	p = 1; m = 2	p = 2; n = 3	p = 3; m = 4
$\sum_{i}^{r} U_{i} = A_{0}n$	$+ A_1 \sum_{i} x_i$	$+ A_2 \sum_{i}^{r} x_i^2$	$+ A_3 \sum_{i} x_i^3$
$\sum_{i}^{i} x_{i} U_{i} = A_{o} \sum_{i}^{i} x_{i}$	$+ A_1 \sum_{i}^{i} x_i^2$	$+ A_2 \sum_{i}^{i} x_i^3$	$+ A_3 \sum_{i}^{i} x_i^4$
$\sum_{i}^{i} x_i^2 U_i = A_0 \sum_{i}^{i} x_i^2$	$+ A_1 \sum_{i}^{i} x_i^3$	$+ A_2 \sum_{i}^{i} x_i^4$	$+ A_3 \sum_{i}^{i} x_i^5$
$\sum_{i}^{i} x_i^3 U_i = A_0 \sum_{i}^{i} x_i^3$	$+ A_i \sum_{i}^i x_i^4$	$+ A_2 \sum_{i}^{i} x_i^5$	$+ A_3 \sum_{i}^{i} x_i^6$





На рис. 2 точкам соответствуют результаты измерений, а пунктиром обозначены трендовые зависимости. График с шифром p = 0 показывает усредненное содержание меди вдоль профиля горной выработки. Горный блок воспринимается в данном случае как единое целое образование без структурных особенностей. График с шифром p = 1 является линейной функцией, учитывающей структурную особенность роста содержания меди вдоль профиля. График с шифром p = 2 представляет квадратичную функцию содержания меди, которая более детально учитывает особенности структуры горного блока. Необходимость развития тренда на каждом этапе внешних испытаний обосновывается характером изменения полувариограммы случайной составляющей в содержении меди. На рис. 3 график полувариограммы с шифром p = 0 растет, что означает присутствие в отклонениях содержания меди от нулевого тренда закономерной составляющей. Поэтому результат внешних испытаний отрицательный ( $\sigma$  $\frac{2}{c_{DV4}} > \sigma^2_{onmum}$ ) и порядок тренда увеличен. В графике полувариограммы с шифром р = 1 еще наблюдается рост. Намечающаяся

Рис. 2. Графики трендовой части содержания меди вдоль горной выработки

Рис. 3. Полувариограммы случайной части содержания меди вдоль горной выработки

периодичность графика показывает наличие повторяющихся вдоль горной выработки неоднородных структур. Однако, минимумы полувариограммы еще существенно удалены от оси  $\Delta x$ , что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития тренда в поисках еще не раскрытой закономерности. Поэтому внешние испытания вновь привели к очередному повышению порядка тренда. На графике полувариограммы с шифром p = 2 минимумы уже близки к нулевой отметке. Расстояние между ними соответствует заданному уровню значимости. Полученная на этой стадии дисперсия  $\sigma^2_{cny4}$  принимается оптимальной. Она существенно превышает дисперсию признака, обусловленную воспроизводимостью мониторинговых измерений. Внешние испытания дали положительный результат. При дальнейшем развитии тренда дисперсия  $\sigma^2_{cnvq}$  может еще уменьшится. Однако, это нецелесообразно, поскольку такое развитие привело бы к отображению уже не значимых по размеру структур горной выработки.

В согласованном, т.е. оптимальном состоянии тренд в полной мере отражает выявленную закономерность изменения признака в пределах только значимых структурных неоднородностей. Отклонения же признака от тренда в пределах незначимых структурных неоднородностей, которые по своему размеру меньше значимых, составляют его погрешность. Таким образом, погрешность тренда оценивается достигнутой случайной составляющей искомого признака на стадии его самодостаточности

$$U = U_T \pm \sigma_{onmum}$$
.

Результаты трендовой оценки признака представляются в графическом и табличном виде. В составе геоинформационного обеспечения горного предприятия это могут быть диаграммы вдоль выбранного аргумента (длины профиля, размера физической величины, времени), изолинии или координированные обозначения на погоризонтных планах или геологических разрезах.

Проведенные исследования показывают, что трендовая оценка признака горногеологических объектов имеет относительный характер, определяемый

масштабностью конкретной информационной задачи и соответствующим разделением объектов и технологических процессов на значимые и незначимые интервалы. Описанная модель тренда приводит в соответствие его результаты поставленным целям и задачам на основе принципа самосогласования. Модель может использоваться для решения практических задач прогнозирования показателей минерального сырья и планирования горных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ершов В.В.* Горно-маркшейдерское обеспечение управления качества руд. М.: Недра, 1986.-261 с.
- 2. Справочник по математическим методам в геологии / Д.А. Родионов, Р.И. Коган, В.А. Голубева и др. М:. Недра, 1987. С. 194.
- 3. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии / Под ред. Д.А. Родионова. М.: Недра, 1990. С. 202, книга 1, С. 133, книга 2.
- 4. *Аронов В.И.* Методы математической обработки геологических данных на ЭВМ. – М.: Недра, - 1977.
- 5. Волков А.М. Решение практических задач геологии на ЭВМ. – М.: Недра, -1980.
- 6. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976.
- 7. *Каждан А.Б.* Методологические основы разведки полезных ископаемых. М.: Недра, 1974. 272 с.
- 8. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968, 407 с.

### Коротко об авторах

Антонов В.А. – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения РАН.

#### ДИССЕРТАЦИИ

# ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень		
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ					
УЛЬРИХ Елена Викторовна	Интенсификация процессов обезвоживания угольных шламов модифицированными полиэлектролитами	25.00.13	к.т.н.		