

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
СВЕРДЛОВСКИЙ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ им. Б.В. ВАХРУШЕВА



МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА  
ПО КУРСУ "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГИИ"  
(РАЗДЕЛ: "ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ")  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 0101  
"ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ"

ВЫПУСК 3

г. СВЕРДЛОВСК 1984

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
СВЕРДЛОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ В. В. ВАХРУШЕВА

О Д О Б Р Е Н О  
методической комиссией  
геологоразведочного  
факультета  
Председатель комиссии  
доцент

*Масер* - А. П. Наседкин

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

ПО КУРСУ "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГИИ"  
(РАЗДЕЛ: "ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ")  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 0101  
"ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ"

ВЫПУСК 3

Методическая разработка по курсу "Математические методы в геологии" (раздел: "Геометризация и анализ геологических полей месторождений полезных ископаемых") для студентов специальности ОГОИ "Геологическая съёмка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых"

Свердловск, изд. СГИ, 1984, с.44

В методической разработке излагаются основы учения о геологических полях месторождений полезных ископаемых, производится типизация решений геологоразведочных задач, наложена методика и примеры решения задач изучения закономерностей распределения компонентов в рудных телах, определения аномалий ослабленной контрастности, оценки качества руд, определения расстояний между разведочными перебежками и пунктами опробования, обработки сопряженных измерений, морфометрического анализа рудных тел.

Составитель: В.Ф.Мягков, проф. д.г.м.н.

# I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ

## I.1. Геометризация свойств тел полезных ископаемых как основа решения геологоразведочных задач

Первичная информация, используемая для решения различных геологоразведочных задач, представляет собой результаты геологической документации и опробования полезного ископаемого и вмещающих пород, вскрытых буровыми скважинами и горными выработками различного назначения, по данным которых оцениваются прежде всего такие переменные, как мощность, отметки подошвы и кровли рудных тел, содержания компонентов в рудах и их технологические свойства. Эта информация не будет представлять никакой ценности, если она своевременно не будет соответствующим образом обработана и обобщена. Но так как все названные переменные оцениваются количественно, то применение математических методов при решении геологоразведочных задач приобретает весьма важное значение.

В практике геологических исследований наиболее широкое применение получили методы математической статистики, базирующиеся на достижениях теории вероятностей, теории случайных функций и теории информации, и метод геометризации, научной базой которой является теория поля. В основу применения этих методов изначально закладываются принципиально разные обобщенные представления о природе и строении геологических объектов, называемых геолого-математическими моделями. Мы отдаем предпочтение геометро-статистической модели, лежащей в основе метода геометризации, т.к. она, будучи пространственной по своей природе, наилучшим образом соответствует содержанию сущности большинства решаемых геологоразведочных задач; не требует статистической устойчивости распределений значений переменных, принимаемой в математической статистике в качестве одной из аксиом, а также - их независимости и случайности; позволяет интерпретировать и проверять результаты математических расчетов путем непосредственных измерений геометрических образов вычисляемых характеристик на пространственных моделях объектов исследования; имеет теоретическую основу для типизации решений внешне весьма разнородных геологических и геологоразведочных задач на единой методологической базе; допускает при определенных условиях сведение сложных пространственных решений геологоразведочных задач к более

простым решениям методами математической статистики.

Геометризация как метод изучения земных недр разработан П.К.Соболевским / 15/. Однако следует подчеркнуть, что в практике геологических исследований термином геометризация обозначается два разных по своей содержательной сущности понятия: во-первых, геометризацией называют графические построения контуров рудных тел и выделяемых в их пределах блоков при подсчетах запасов минерального сырья, во-вторых, — комплекс графо-аналитических операций над пространственно заданными совокупностями численных значений характеристик свойств геологических тел с целью выявления и последующего графического изображения описывающих их функций, представляющих собой математические цели объектов исследования. Именно последнее определение геометризации составляет содержательную основу метода изучения земных недр, разработанного П.К.Соболевским, что, пользуясь терминами прикладной математики, было бы правильнее называть не геометризацией, а аппроксимацией.

## 1.2. Понятие геологическое поле

Фундаментальным понятием геометризации является понятие геологического поля. Существует два взаимно дополняющих друг друга определения содержательное (геологическим полем называется совокупность форм, свойств, явлений и процессов, связанных единством своего происхождения и пространственного положения) и формализованное (геологическим полем называется пространство, каждому элементарному объему которого может быть поставлено в соответствие определенное значение характеристики какого-либо свойства).

Общее понятие геологического поля может быть расчленено на ряд частных понятий, относящихся к объектам изучения иногда даже различных отраслей геологии. Принято различать поля морфоструктурных, морфометрических, геохимических, гидро-геологических, инженерно-геологических и геофизических свойств. При этом значительная продолжительность и стадийность формирования многих свойств месторождений полезных ископаемых и, следовательно, отвечающий им состав различных полей по природе своего образования может быть гомогенным и гетерогенным.

Поле называется гомогенным, если характеризуемое свойство имеет только одну форму своего проявления или нахождения. Если таких форм проявления или нахождения несколько, то поле этого свойства называется гетерогенным. Например, геохимическое поле серы в рудных телах

алтайских полиметаллических месторождений, является гетерогенным, так как она входит в состав пирита, халькопирита, сфалерита и галенита. Гомогенными будут поля той части серы, которая входит в состав определенного минерала, если последний не имеет в рудах нескольких генераций.

Подавляющее большинство характеристик, пространственно заданные совокупности которых образуют геологические поля свойств объекта изучения, являются скалярными величинами. Значительно реже на практике имеет дело с полями векторных величин. Тем не менее в зависимости от изучаемой величины все геологические поля могут быть подразделены на две группы: скалярные и векторные поля. Так, скалярными полями являются поля химических и морфометрических свойств объектов изучения, а векторным — магнитное поле. При этом любое скалярное поле может быть преобразовано в векторное поле, если изучать не исходные величины, а их производные — градиенты поля.

В зависимости от изменения зафиксированных при изучении объекта величин во времени все разновидности геологических полей подразделяются на стационарные и динамические поля. Для первых характерна неизменяемость поля во времени, для вторых, наоборот, — изменение. Так, довольно резко изменяются во времени (в течение года по сезонам) поля пьезометрических уровней подземных вод. В то же время, например, форма залежи полезного ископаемого практически не изменяется. Поэтому поле пьезометрических уровней является динамическим, а поле морфометрическое — стационарным.

Подразделение геологических полей на стационарные (квазистационарные) и динамические также имеет весьма важное методологическое значение: стационарные поля могут изучаться организованной системой наблюдений длительное время по частям объекта исследования, данные которых могут быть затем увязаны между собой в единое целое без каких-либо преобразований; для изучения динамических полей необходимо создавать сеть стационарных наблюдений за режимом изменения характеристики во времени. Без знания динамики изменения этой характеристики во времени невозможны никакие пространственные увязки результатов, выполненных в разное время для разных частей объекта изучения.

### 1.3. Способы задания аппроксимирующих геологические поля функций. Понятие о регулярной и случайной составляющих геологических полей

В соответствии с формализованным определением понятия геологиче-

ского поля какое-либо его свойство может быть записано в математических символах:  $U = f(x, y, z, t)$ , где  $U$  - характеристика свойства,  $x, y, z$  - координаты пространства,  $t$  - координата времени. Если влиянием времени можно пренебречь (поле стационарно), то запись для трехмерного случая будет иметь вид -  $U = f(x, y, z)$ , для двумерного случая (плоское поле) -  $U = f(x, y)$  и для одномерного случая (изменение поля по линии профили или выработка) -  $U = f(x)$ .

Известно три способа задания функций, описывающих одно-, двух- и трехмерные геологические поля: табличный, графический, аналитический. Табличный способ (например, журнал опробования) используется лишь в качестве средства сбора и хранения информации, а в геологической практике наиболее широко применяется графический способ задания функции, (рис. 1, 2).

Поле считается заданным аналитически, если известен конкретный вид формулы, описывающий его функции. Обычно вид этой функции достаточно сложен и, как правило, не может быть выражен простыми линейными и нелинейными зависимостями. Чаще всего это комбинации различных простых зависимостей, для описания которых приходится использовать функциональные полиномы, что стало возможным с внедрением в практику исследований ЭВМ. Однако широкое применение этого способа сдерживается из-за отсутствия объективных методов определения минимального количества членов функционального ряда, которое целесообразно удерживать для того, чтобы считать описание достаточно хорошим.

Решение вопроса осложняется тем, что частные значения характеристик реального поля в точках пространства неоднородны по своему составу. Они представляют собой алгебраическую сумму двух величин, называемых регулярной и случайной составляющими (компонентами) поля:  $U_i = f(x_i, y_i) + \delta_i$  - (двумерный вариант),  $U_i = f(x_i) + \delta_i$  - (одномерный вариант), где  $U_i$  - значение переменной в "i" - той точке пространства с координатами  $x_i, y_i$ ,  $f(x_i, y_i)$ ,  $f(x_i)$  - значение регулярной составляющей,  $\delta_i$  - значение случайной составляющей (рис. 1).

Регулярной составляющей поля называется детерминированная компонента, фиксирующая закономерность изменения изучаемого свойства в пространстве геологического объекта: например, закономерность выклинивания линзовидного рудного тела от центра к периферии залежи.

Изменение регулярной составляющей поля периодично / 6 /. Выделяются периоды изменения нескольких порядков, называемых уровнями

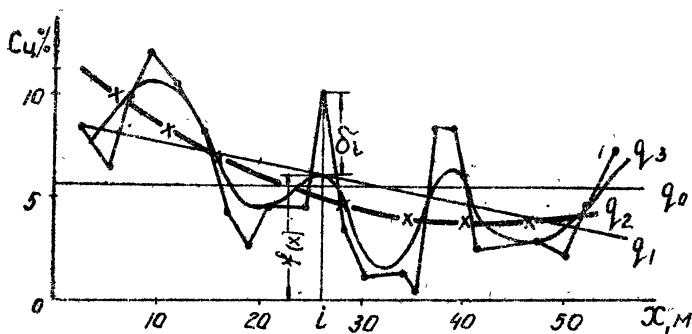


Рис.1 График одномерной функции, аппроксимирующей распределение меди,  $q$  - уровни строения геохимического поля.



..... - граница рудного тела  
 ——— - тектонические нарушения

Рис.2 График двумерной функции, аппроксимирующей распределение Fe.

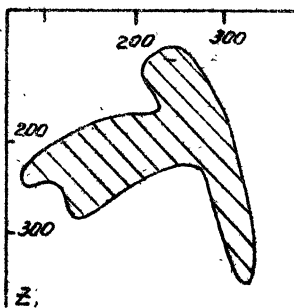


Рис.3 Поперечное сечение рудного тела.



Рис.4. Математические действия с графически заданными функциями. А-сложение, Б-умножение, В-дифференцирование; 1,2-исходные функции; 4-направление и модуль градиента, 3-результатирующая функция



изменчивости. Так, уровнем строения характеризуется тектоническая структура (морфоструктурное поле) какого-либо мегаантеклиория. Уровнями изменчивости в этом случае являются тектонические структуры разных порядков, осложняющие основную структуру. В этом случае, как и во многих других, каждый последующий уровень выделяется и рассматривается относительно предыдущего более низкочастотного, т.е. представляет собой анакопеременную функцию, изменяющуюся относительно списывающей поле функции предыдущего уровня (рис. I). Выявление периодичности и уровней изменчивости регулярной составляющей геологических полей во многом зависит от плотности наблюдений, а поэтому их наличие должно обязательно учитываться при всех пространственных сопоставлениях. Сопоставлять имеет смысл поля, приведенные к одному и тому же уровню изменчивости.

Случайной компонентой поля называется составляющая, обуславливающая флуктуацию её значений относительно детерминированной переменной. Её наличие определяется влиянием как геологических, так и технологических факторов: например, флуктуацию мощности относительно генеральной тенденции к выклиниванию линзовидного тела от центра к периферии в случае экзогенного месторождения обусловлена не только неровностями дна бассейна седиментации, но и погрешностями принятого способа измерений. Разделить эти флуктуации по факторам влияния очень сложно, да и к этому особенно не стремятся, оценивая их влияние совместно методами математической статистики. Так, при геохимических методах поиска месторождений полезных ископаемых при выделении аномалии, как поискового признака, в геохимическом поле рассеяния вещества широко пользуются известным соотношением  $C_a = C_f + 3\sigma$ , где  $C_a$  - минимально аномальное содержание,  $C_f$  - предел рассеяния вещества (фон),  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение, вычисленное по данным опробования безрудных пород, т.е. на уровне изменения фоновых значений. Здесь среднеквадратическое отклонение представляет собой оценку флуктуаций частных значений относительно  $C_f$  - предела, к которому стремится с удалением от рудного тела при рассеянии вещества описывающая поле функция  $C = a \cdot e^{\lambda x} [-\lambda \sigma^2]$ , где  $C$  - регулярная компонента поля,  $a, \lambda$  - параметры,  $x$  - координата. Причем размер флуктуаций относительно фона определяется как анизотропией свойств среды рассеяния вещества, так и погрешностями спектрального приближенно-количественного анализа.

Важными свойствами распределения случайной компоненты поля

относительно регулярной составляющей является знакопеременность и симметричность отклонений (иногда их логарифмов), вследствие чего  $\sum \delta_i / n \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty$ , но обладает дисперсией:  $\sigma_q^2 = \sum \delta_i^2 / n$  ( $n$  - число измерений).

Как видно, и более высокочастотные уровни изменчивости, и случайная компонента поля обладают одним и тем же свойством знакопеременности. Это обстоятельство и снижает возможности применения аналитического способа описания поля. Все определяется тем, какой точностью при описании мы зададимся. В зависимости от этого в состав случайной компоненты поля может входить та или иная часть его регулярной составляющей относительно высокочастотного уровня.

#### 1.4. Математические действия с заданными графически функциями

Наличие у любого геологического поля случайной и регулярной составляющих и, в большинстве случаев, уровневого строения последней предполагает невозможность точного восстановления описывающей поле функции. Наши знания в силу относительности самих понятий случайной составляющей и уровневого строения всегда относительны, в связи с чем имеет смысл говорить не о точном восстановлении поля, а лишь о его приближенном описании - аппроксимации, соответствующей уровню наших знаний (стадии разведки).

Аппроксимирующие геологические поля функции, должны удовлетворять следующим основным требованиям: однозначности, непрерывности и плавности. Эти требования определяются целесообразностью и необходимостью их графического изображения, даже если они первоначально были заданы аналитически.

Аппроксимирующая геологическое поле функция называется однозначной, если она пересекается с перпендикуляром, восстановленным из точки плоскости или линии проецирования сечения поля, один раз. Например, на рис.3 изображено поперечное сечение скварново-магнетитовой залежи Северопесчанского месторождения. Как видно, ни на одной из обычно применяемых проекций (горизонтальной или вертикальной) невозможно изобразить в изолиниях морфометрические и геохимические поля рудного тела. Для изображения такой залежи в изолиниях свойства требуется либо подобрать иную (наклонную) плоскость проецирования, либо изобразить её по частям.

Аппроксимирующая геологическое поле функция называется непрерывной, если незначительному изменению координат пространства соот-

ветствует столь же незначительное изменение значения свойства. Следовательно, в рудных телах, сплошность которых нарушена дизъюнктивами более или менее значительной амплитуды, поля морфоструктурных, морфометрических и геохимических свойств прерывисты. Такие поля могут быть описаны поблочно кубочно-непрерывными функциями (рис.2).

Причинами нарушений сплошности строения геохимических полей рудных тел могут быть также резкое несоответствие геометрической базы пробы (объема и пространственной ориентировки) текстурно-структурным свойствам руд и наличие включений пустых пород. При несоответствии геометрической базы пробы прерывистость устранима. Решение этой задачи имеет в геологоразведочном деле самостоятельное и очень важное значение, так как теснейшим образом связано с оценкой качества минерального сырья (проблема выявления и учета проб с ураганными содержаниями). При наличии включений пустых пород в рудном теле стадии их развития перед геометризацией должны быть околтурены. Они геометризации не подлежат. Геохимические поля в этих случаях будут непрерывными, если нет дизъюнктивов, но со своеобразными "окнами", соответствующими включениям пустых пород.

Аппроксимирующая геологическое поле функция называется плавной, если она дифференцируема в каждой точке пространства. Для этого необходимо уничтожить влияние случайной составляющей поля, что достигается путем осреднения результатов частных измерений свойств в пространстве объекта исследования на достаточно узких интервалах.

Функции, отвечающие требованиям однозначности, непрерывности и плавности могут быть заданы аналитически и изображены графически. При этом они могут описывать три вида поверхностей /  $F$  /: во-первых, поверхности, существующие реально (поверхности кровли и подошвы рудных тел при четких контактах с вмещающими породами); во-вторых, поверхности, являющиеся производными реально существующих поверхностей (изменение мощностей рудного тела, представляющее собой разность отметок его кровли и подошвы) и, в-третьих, поверхности, которые в природе реально не существуют (геохимические поля рудных тел, геофизические поля).

Возможность математических действий с графически заданными функциями была обоснована ещё П.К.Соболевским. Практика геометризации лишь подтвердила применимость его методических разработок. При этом наиболее важное значение для решения прикладных задач получили такие графо-аналитические операции как сложение (вычитание), умножение (деление) и дифференцирование (интегрирование) аппроксимирующих поля

функций.

**Сложение** (вычитание) аппроксимирующих функций широко используется при определении мощностей рудных тел, построении так называемых аддитивных геохимических полей при описании ореолов рассеяния вещества и др. Причем при определении функции, описывающей изменение мощностей, из отметок подошвы залежи  $h_n(x, y)$  вычитают отметки кровли залежи  $h_k(x, y)$ :  $m(x, y) = h_n(x, y) - h_k(x, y)$ ; а при построении аддитивного геохимического поля берут сумму содержаний компонентов:  $C_\Sigma(x, y) = \sum C_j(x, y)$ , где  $C_j(x, y)$  - значение функции описывающей в пространстве ореола изменение содержания  $j$  - того компонента ( $j = 1, 2, 3 \dots$ ).

Графически решение задачи сложения или вычитания осуществляется в такой последовательности: 1) по данным натурных измерений на плоскости строятся графики аппроксимирующих геологические поля функций, 2) определяются суммы (разности) значений функций в точках пересечения изолиний свойств разных полей, 3) путем интерполяции сумм разностей строится результирующая функция (рис. 4а).

**Умножение** (деление) аппроксимирующих геологические поля функций применяется, например, при комплексировании геохимических и геофизических полей для решения задач выявления аномалий ослабленной контрастности или их разбраковки, а также при определении продуктивности рудных тел (количества запасов, могущих быть добытыми с  $1 \text{ м}^2$  залежи полезного ископаемого) и др..

Если для рудного тела или окружающего его пространства определены какие-либо два поля свойств  $U(x, y)$  и  $V(x, y)$ , то графически решение задачи сводится к определению произведений (частных) для точек пересечений изолиний и построения путем интерполяции данных результирующего поля (рис. 4б). При этом, если имеется необходимость, геологические поля разных свойств предварительно могут быть пронормированы, т.е. переведены в безразмерные величины путем деления исходных данных, например, на среднее значение, среднеквадратическое отклонение и т.п..

**Дифференцирование** (интегрирование) аппроксимирующих геологические поля функций применяется при определении скоростей изменения (дифференцирование) и расчете средних значений параметров (интегрирование). При дифференцировании для каждой точки определяется величина, называемая градиентом поля. Градиент поля - это вектор, который направлен по нормали к изолинии в сторону возрастания функции. Он характеризует максимальное значение скорости изменения функции в точке и представляет собой  $\lim \Delta u / \Delta \ell = \bar{q}_u$  при  $\Delta \ell \rightarrow 0$ .

При графическом дифференцировании направление градиента устанавливается в соответствии с определением, а его модуль (длина отрезка) путем вычисления среднего значения  $|\bar{Q}_U| = \Delta U / \Delta \ell$ , где  $\Delta U$  - разность значений изолиний,  $\Delta \ell$  - расстояние между соседними изолиниями по направлению градиента (рис. 4в).

Операция интегрирования обычно в графическом варианте не применяется, а в аналитическом варианте она представляет собой, например, расчет интегрального среднего (средневзвешенного) значения свойства для области определения поля по формуле численного интегрирования:

### 1.5. Типизация математических решений геологоразведочных задач

Принимая во внимание содержательное определение понятия геологического поля и учитывая возможность получения для каждой точки изучаемого пространства характеристик различных интересующих нас свойств, можно на основе изложенного привести типизацию решений геологоразведочных задач. Опыт геометризации свидетельствует, что все многообразие геологических исследований, за исключением диагностических и классификационных задач, может быть сведено к трем типовым решениям: задачам описания, картирования и изучения пространственных соотношений геологических полей (10).

Задача описания поля включает в себя в качестве необходимых операций регуляризацию измерений и построение аппроксимирующей функции, определение усредненного строения поля, вычисление амплитудных и частотных характеристик аппроксимирующей функции, а также оценку точности аппроксимации на каждом уровне строения.

Операция регуляризации измерений осуществляется путем усреднения их значений на интервалах, не превышающих удвоенного значения радиуса геометрической автокорреляции, вычисляемого предварительно для трех-пяти взаимноперпендикулярных одномерных сечений плоского поля, изученных с максимально возможной для данной стадии плотностью разведочной сети или опробования:  $R_q = \mathcal{L} (1 + 2K_q)^{-1}$ , где  $R_q$  - радиус геометрической автокорреляции (м),  $\mathcal{L}$  - длина изученного одномерного сечения (м),  $K_q$  - число экстремальных значений аппроксимирующей поле функции на сечении  $\mathcal{L}$  (с учетом тенденций ее изменения на границах сечения).

Построение начальной аппроксимирующей поле функции на каждом

одномерном сечении осуществляется по данным регуляризации измерений в соответствии с формулой, выведенной при условии четырехкратного последовательного сглаживания по двум точкам:

$U_j = 0,0625 (U_i + 4U_{i+1} + 6U_{i+2} + 4U_{i+3} + U_{i+4})$ ; где  $U_j$  - значение регулярной составляющей поля,  $U_i$  - частные значения, полученные в результате измерений или опробования по совокупности пространственно близких точек. При этом координаты  $X_j$  определяются либо по аналогичной приведенной зависимости (вместо  $U_i$  в формулу подставляются значения  $X_i$ ), либо по упрощенной формуле:  $X_j = X_i + (j+1)\Delta X$ , если шаг наблюдений принят в качестве постоянной величины ( $j = 1, 2, 3 \dots$ ).

Сглаживание исходных данных осуществляется путем последовательной подстановки в формулы 1-5, 2-6, 3-7 и т.д. значений измеренного свойства. По результатам сглаживания строится график кривой регрессии  $U = f(X)$ , для которого нисходящие и восходящие ветви кривой на отдельных участках аппроксимации должны быть подтверждены данными не менее, чем трех точек осреднения (регуляризации), включая на интервале максимальное, минимальное значение и, хотя бы, одну промежуточную точку. В ином случае наличие экстремума считается не доказанным.

В соответствии с установленными значениями радиусов геометрической автокорреляции принимается размер "скользящего окна" осреднения для регуляризации измерений на плоскости. Он не должен превышать  $2R_q$ , а шаг осреднения - самого значения  $R_q$ . В этом случае гарантированно будут вскрыты все периоды изменения аппроксимирующей функции, соответствующие достигнутой плотности разведочной сети (опробования) при изучении месторождения.

Определение уровня строения поля осуществляется в нисходящем порядке путем последовательного осреднения данных на интервалах, равных  $4R_q$  для самого высокочастотного уровня изменчивости регулярной компоненты поля. Для установленного более низкочастотного уровня снова определяется радиус геометрической автокорреляции, с помощью которого аналогично можно выделить последующий еще более низкочастотный уровень и т.д., до тех пор, пока  $4R_q$  не станет равным размерам объекта изучения (сечения). В этом случае осредненные данные будут равны среднему значению изучаемого свойства ( $\bar{U}$ ). Если принять уровень среднего в качестве нулевого уровня изменчивости регулярной компоненты поля ( $Q_0$ ), то относительно его все последующие уровни целесообразно нумеровать в восходящем порядке: пер-

вый ( $q_1$ ), второй ( $q_2$ ), третий ( $q_3$ ) и т.д. (рис. I).

Оценка частотной характеристики поля для каждого из уровней ( $\nu_q$ ) его строения определяется как величина, кратная периоду его изменения:  $\nu_q = (4R_q)^{-1}$ . Чем больше эта величина, тем меньше частота изменения аппроксимирующей функции на данном уровне изменчивости поля.

Амплитудная характеристика поля определяется для каждого из установленных уровней его строения. В качестве оценки принимается среднеквадратическая амплитуда, которая вычисляется относительно нулевого уровня:  $A_q = [n^{-1} \cdot \sum (U_{j,q} - \bar{U})^2]^{0,5}$ , где  $U_{j,q}$  - значение регулярной составляющей уровня  $q$ ,  $n$  - число учитываемых разностей (уменьшается при переходе от уровня к уровню).

Одновременно вычисляется оценка среднеквадратического отклонения измеренных значений от аппроксимирующей функции  $f_q(x)$  на данном уровне (остаточная дисперсия):  $\sigma_q^2 = n^{-1} \cdot \sum (U_i - U_{j,q})^2$ . Оценкой погрешности аппроксимации будет служить величина  $\Delta q$ :  $\Delta q = 2\sigma_q n^{-0,5}$

Характеристики  $\bar{U}$ ,  $\nu_q$ ,  $A_q$ ,  $\sigma_q$ ,  $R_q$ ,  $\Delta q$  исчерпывающе описывают поле на каждом уровне его строения. При этом следует иметь в виду, что для нулевого уровня строения поля, когда  $f_0(x) = \bar{U}$  (постоянная величина) оценки  $\nu_q$  и  $A_q$  теряют физический смысл, а  $\sigma_q$  равна среднеквадратическому отклонению:  $\sigma_u = [n^{-1} \sum (U_i - \bar{U})^2]^{0,5}$ .

Аналогично такие же характеристики могут быть рассчитаны для плоского поля, как средние, вычисленные по совокупности его одномерных сечений.

Задача картирования поля заключается в выделении на каждом поле, во-первых, главных структурных элементов и, во-вторых, участков с интересующими нас свойствами. Решение первой половины задачи обычно осуществляется путем расчленения поля на части, резко отличающиеся либо строением самого поля, либо плотностью наблюдений, либо особенностями геологического строения, как руд, так и вмещающих пород. Эта половина задачи, по существу, является логическим продолжением и завершением задачи описания поля.

Вторая половина решения задачи картирования поля является вполне самостоятельным исследованием. Отличительная особенность его состоит в том, что для оконтуривания в геологическом поле области с интересующими нас свойствами требуется привлечь новую, ограниченную, функцию и решить систему из двух уравнений:  $U = f(x, y)$  и  $U = \psi(x, y)$ , где  $f(x, y)$  - аппроксимирующая поле функция,

$\Psi(x, y)$  - ограничительная функция.

Оконтуривание области устойчивого отличия  $f(x, y)$  от  $\Psi(x, y)$  производится по разности аппроксимирующей и ограничительной функции. Её граница определяется как геометрическое место точек, на котором  $f(x, y) - \Psi(x, y) = 0$ . При этом ограничительная функция принимается в соответствии с содержательными условиями решения задачи картирования поля. Так, при геохимических поисках она представляет собой постоянную, равную минимально аномальному значению содержания химического элемента, определяемому в соответствии с инструкцией по проведению геохимических поисковых работ; при оконтуривании рудных тел и их технологическом картировании - также постоянные, принимаемые согласно требованиям промышленности к качеству минерального сырья.

Задача изучения пространственных соотношений полей представляет собой исследование закономерностей их соотносительных изменений как результата естественных геологических процессов или экспериментальных работ. Принципиально возможно существование трех граничных типов пространственных соотношений полей различных свойств в объекте исследования /10/: конкордантного, когда сопоставляемые поля изменяются в пространстве как положительно согласованные (синфазно); антикордантного, когда их согласованность - отрицательная, и дискордантного, когда их относительное изменение незакономерное /рис.5/. В качестве оценки пространственной согласованности полей принимается среднее значение косинуса угла между градиентами аппроксимирующих поля функций:

$\cos \Psi = \sum \cos \Psi_i / n$ , где  $\cos \Psi_i$  - частные значения косинусов углов в точках измерений на поле,  $n$  - число точек измерения углов (располагаются равномерно на плоскости проецирования поля,  $n \geq 20$ ). При этом, если  $\cos \Psi$  больше +0,20, то соотношение полей считается конкордантным, при его значениях меньших -0,20 - антикордантным, а при значениях меньших по модулю 0,20 - дискордантным.

Эта пространственная по своей сущности задача при условии равномерного изучения геологических полей объекта в одних и тех же точках пространства и линейности их соотношений может быть сведена к математико-статистической задаче расчета оценки коэффициента корреляции (12). На рис. 6 в качестве примера изображены одномерные сечения геохимических полей  $W_0$  и  $M_0$  по одной из горных выработок, пройденной на месторождении Тырнауз и опробованной



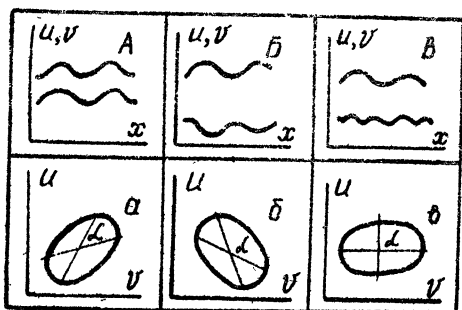


Рис. 5. Типы пространственных соотношений геологических полей (А, Б, В) и соответствующие им корреляционные зависимости (а, б, в).

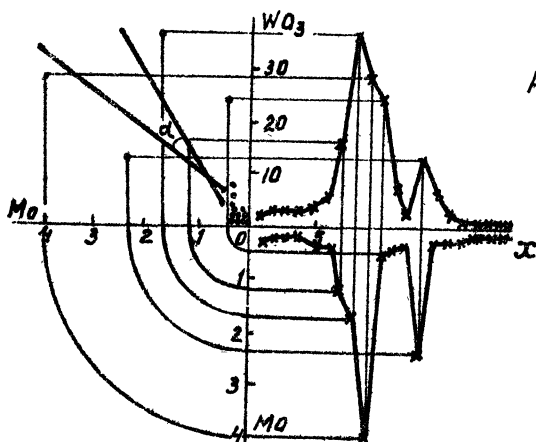


Рис. 6. Графическое преобразование пространственного соотношения геохимических полей  $Mo$  и  $WO_3$  в корреляционную модель (х - точки геохимических полей, о - точки корреляционного поля, --- эмпирические линии регрессии).

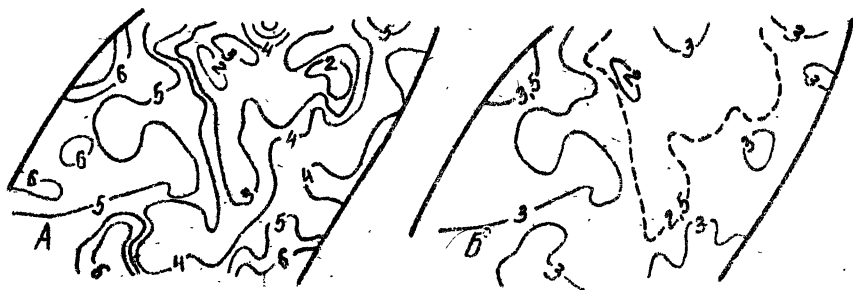


Рис. 7. Геохимические поля  $Nb_2O_5$  (А) и  $ZrO_2$  (Б).

секционной бороздой. Правая половина рисунка, состоящего из верхней и нижней частей, представляет собой геохимические поля, построенные по осредненным данным опробования, а левая его половина - корреляционное поле, полученное путем проецирования исходных данных в пространство признаков. В данном случае конкордантному пространственному соотношению геохимических полей соответствует прямая корреляционная зависимость (оценка коэффициента корреляции +0,73).

Аналогично могут быть получены корреляционные оценки для анти- и дискордантных пространственных соотношений геологических полей, но они будут отличаться знаком и модулем: для антикордантных соотношений зависимость будет обратной, для дискордантных она будет отсутствовать (рис. 5).

В практике применения достижений теории корреляции для решения геологоразведочных задач обычно ограничиваются расчетом оценок коэффициентов корреляции, уравнений простой и среднеквадратической регрессии и уравнения эллипса рассеяния. При этом используются следующие формулы: для расчета оценок коэффициентов корреляции -

$$Z = \left[ (n^{-1} \sum u_i v_i) - \bar{u} \cdot \bar{v} \right] (\sigma_u \cdot \sigma_v)^{-1};$$

для расчета уравнений простой среднеквадратической регрессии -  $u = z \cdot \sigma_u (\sigma_v^{-1}) (v - \bar{v}) + \bar{u}$ ;

- для расчета уравнений ортогональной среднеквадратической регрессии -  $u = b(v - \bar{v}) + \bar{u}$ ,  $b = \operatorname{tg} \theta$ ,  $\operatorname{tg} 2\theta = 2z \sigma_u \sigma_v (\sigma_v^2 - \sigma_u^2)^{-1}$ ;

для расчета эллипса рассеяния -

$$\frac{1}{1-z^2} \left\{ \left( \frac{u-\bar{u}}{\sigma_u} \right)^2 + \left( \frac{v-\bar{v}}{\sigma_v} \right)^2 - 2z \left( \frac{u-\bar{u}}{\sigma_u} \right) \left( \frac{v-\bar{v}}{\sigma_v} \right) \right\} = 6,0516.$$

где:  $Z$  - оценка коэффициента корреляции,  $u_i, v_i$  - измеренные частные значения коррелируемых переменных,  $\bar{u}, \bar{v}$  - средние значения переменных,  $u, v$  - текущие значения переменных в уравнениях,  $\sigma_u, \sigma_v$  - среднеквадратические отклонения,  $\theta$  - угол, образуемый пересечением прямой регрессии с осью переменной - аргумента.

Как видно, в процессе геометро-статистических обобщений результатов геологоразведочных работ возможно получить ряд характеристик свойств объектов изучения в виде различных параметров, функций и их графических изображений. Естественно, геологическая интерпретация результатов исследования в каждом конкретном случае будет определяться содержательной сущностью самих решаемых задач. Важно в этом отношении то, что единый методологический подход к их решению на основе выполненной типизации создает благоприятные усло-

вия для унификации способов самих решений и обеспечивает, во-первых, быстрое овладение методами обобщения геологоразведочных данных, во-вторых, оперативность обработки информации и, в-третьих, возможность увязки и, следовательно, взаимной контролируемости результатов исследований в области прикладной и генетической геологии.

## 2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ

### 2.1. Изучение закономерностей распределения компонентов в залежах полезных ископаемых

Изучение закономерностей распределения компонентов руд в залежах месторождений полезных ископаемых придается исключительно важное значение. Без преувеличения можно сказать, что сам смысл нашей деятельности в недрах по добыче полезного ископаемого определяется качеством минерального сырья и, следовательно, знанием закономерностей его изменения в пространстве. Все остальное является производным от того, как представляется нам на основе опробования внутреннее строение рудных тел.

Для решения вопроса необходимо иметь результаты опробования руд, которые должны более или менее равномерно характеризовать изучаемые объемы, площади или пересечения тел полезных ископаемых. Очень важно, чтобы плотность наблюдений соответствовала подлежащему изучению уровню строения геохимического поля (определяется целями и задачами исследований), а их система - ориентировке структуры поля, так как она (система) сама по себе в состоянии конструировать наши представления о строении объекта исследования.

На рис. 7а приведен график двумерной функции, описывающей структуру пространственного изменения содержания  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  в пегматитовой жиле: общее увеличение содержания с глубиной и обогащение флангов рудного тела, хорошо согласующуюся с установленной при геологической документации горных выработок минералогической зональностью строения жилы и стадийностью процесса концентрации металла. В строении жилы выделяются нефелин-полевошпатовое ядро, обрамленное альбититовой оболочкой, являющейся основным носителем цирконора.

Подобные графики, естественно, могут быть построены не для всех компонентов руд, потому что при опробовании минерального сырья широко применяются сокращенные анализы. Например, на место-

рождениях золота кварц-пиритовой формации определяются содержаниями только основного металла; на месторождениях полиметаллов - свинца, меди, цинка и т.п. Для этих компонентов руд, определяющих основную промышленную ценность полезного ископаемого, оценки содержаний производятся во всех рядовых пробах. Однако в рудах наряду с главными компонентами содержатся полезные примеси, вредные примеси и шлакообразующие окислы, знание пространственных закономерностей распределения которых важно для решения горно-экономических, технологических и генетических задач. Поскольку содержания неглавных компонентов руд обычно оцениваются эпизодически по анализам групповых проб, то закономерности их пространственного распределения не могут быть изучены методом геометризации. Но они могут быть оценены косвенно, если известны функции, аппроксимирующие геохимические поля главных компонентов -  $U = f(x, y)$  и установлены достаточно тесные корреляционные связи их ( $|r| > 0,5$ ) с неглавными компонентами ( $V$ ), путем пересчета изолиний графиков функций главных компонентов по уравнениям простой среднеквадратической регрессии. Так, для примера рис. 7 а установлена по данным анализов групповых проб корреляционная зависимость между содержаниями  $Nb_2O_5$  и  $ZrO_2$  ( $ZrO_2 = 0,20 Nb_2O_5 + 0,03$ ,  $r = +0,57$ ,  $n = 57$ ), которая позволяет трансформировать график функции  $Nb_2O_5 = f(x, y)$  в график функции  $ZrO_2 = f(x, y)$ . Результаты трансформации представлены на рис. 7 б. Как видно, при этом структура новой функции не изменилась, потому что пространственное соотношение геохимических полей  $Nb_2O_5$  и  $ZrO_2$  конкордантно.

Выявление корреляционных связей между содержаниями компонентов руд, то есть оценку пространственной согласованности геохимических полей рудных тел при изучении закономерностей их внутреннего строения, следует всегда считать довольно актуальной задачей. Установленные корреляционные зависимости позволяют сокращать объемы химико-аналитических исследований, шире внедрять ядерно-физические способы опробования, уточнять наши генетические представления.

Тенденция развития горного производства такова, что в разработку вовлекается все более и более бедные руды, которые перед металлургическим переделом нуждаются в глубоком обогащении. Обогащаемость руд зависит от многих переменных: размеров рудных обособлений, текстурно-структурных особенностей строения, состава минеральных ассоциаций и минеральных форм нахождения рудных компонентов. Каждая из этих переменных образует в рудном теле поле свойства, а их простран-

ственное сочетание дает все многообразие технологических сортов руд, присущих объекту разработки, но так как каждый технологический сорт руды отличается прежде всего параметрами режима обогащения, то вопрос технологического картирования залежей полезных ископаемых приобретает все более и более важное значение.

Идеальным вариантом такого картирования было бы построение по данным опробования графиков функций, описывающих изменение технологических характеристик режимов обогащения в пространстве рудных тел. В этом случае задача технологического картирования не отличалась бы от описанной задачи изучения закономерностей распределения компонентов в рудном теле. Она сводилась бы к вынесению точных оценок технологических характеристик по пробам на проекцию рудного тела, регуляризации результатов частных измерений, проведению путем интерполяции изолиний технологического свойства и выделению по условиям решения задачи технологически однородных блоков. Однако такое решение не всегда возможно потому, что технологическое опробование, как правило, является фрагментарным. В этом случае также весьма полезно изучать корреляционные связи между содержаниями главных компонентов и технологическими показателями обогащения и прогнозировать обогатимость руд с помощью вычисленных уравнений регрессии / 8 /.

## 2.2. Выделение аномалий ослабленной контрастности в ореолах рассеяния вещества

Геометро-статистическую модель аномального геохимического поля ореола рассеяния вещества удобно записать в виде трехчлена:

$C_i = \{ (X_i) + C_{\phi} + \delta_i$ , который изначально содержит элемент картирования поля: выделение аномалии  $\{ (X) \}$  на фоне ( $C_{\phi}$ ) рассеяния вещества. В зависимости от отношения  $\{ (X) \} / C_{\phi}$  принято различать аномалии нормальной и ослабленной контрастности. Поскольку для аномалий ослабленной контрастности изменение  $\{ (X) \}$  сопоставлено с флуктуациями случайной составляющей поля, то возникает проблема усиления полезного сигнала - повышение контрастности аномалии.

Предложено два способа повышения контрастности аномалий: способ произведений (мультипликации) и способ отношений функций, описывающих сочетания химических элементов в ореолах рассеяния вещества. На рис. 8 изображены все принципиально возможные пространственные соотношения геохимических полей в ореоле рассеяния вещества, а в таблице I приведены результаты расчетов оценок контраст-

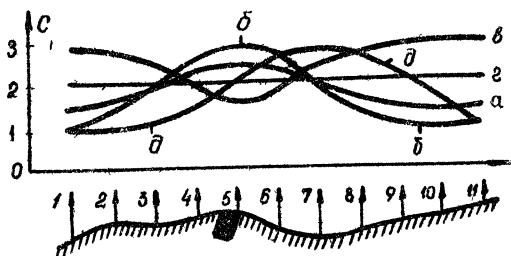


рис.8. Структура геохимических полей в ареале рассеяния вещества (а-в). ↑ - точки отработки

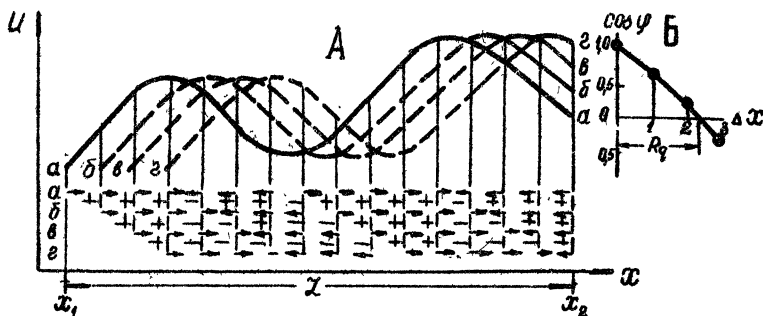


рис.9. Расчет радиуса геометрической автокорреляции. А - сдвиги кривой регрессии  $U=f(x)$ , Б - график изменения  $cov \varphi = f(\Delta x)$ .

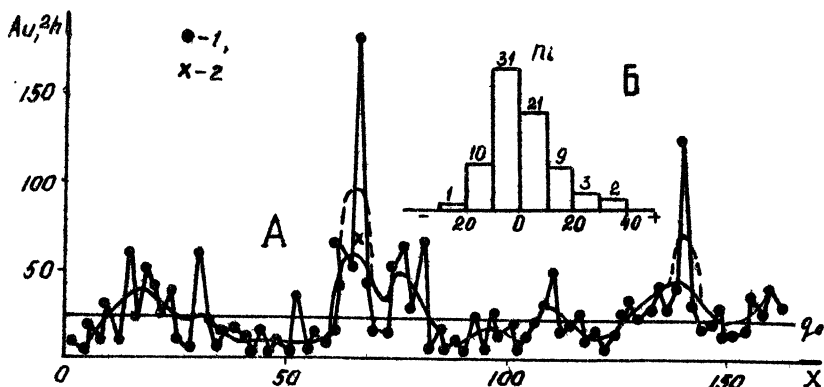


рис.10. График кривой регрессии  $Au=f(x)$  (А) и гистограмма распределения  $\Delta s$ . 1 - исходные данные отработки, 2 - учет прай с угаданными содержаниями.

Таблица 2  
Содержание элементов /усл.ед./ и оценки контрастности аномалий /ОКА/  
геохимических полей /ГП/ на рис.8

ГП	Точки опробования											Оценки ОКА
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Исходные геохимические поля												
а	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,2	2,0	1,7	1,5	1,5	1,5	0,40
б	1,0	1,5	2,0	2,6	3,0	2,6	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,67
в	3,0	2,8	2,5	2,0	1,5	2,0	2,5	2,8	3,0	3,0	3,0	-0,50
г	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,00
д	1,0	1,0	1,0	1,5	2,0	2,6	3,0	2,6	2,0	1,5	1,0	0,67
Мультипликативные геохимические поля												
а·б	1,5	2,6	4,0	5,7	7,5	5,7	4,0	2,6	1,5	1,5	1,5	0,80
а·в	4,5	4,8	5,0	4,4	3,8	4,4	5,0	4,8	4,5	4,5	4,5	0,24
а·г	3,0	3,4	4,0	4,4	5,0	4,4	4,0	3,4	3,0	3,0	3,0	0,40
а·б·д	1,5	2,6	4,0	8,6	15,0	14,8	12,0	6,8	3,0	2,2	1,5	0,90
Геохимические поля отношений элементов												
а/б	1,5	1,1	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,1	1,5	1,5	1,5	-0,47
а/в	0,5	0,6	0,8	1,1	1,7	1,1	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	0,71
а/г	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,7	0,7	0,42
Геохимическое поле обобщенного показателя												
$\frac{а·б·д}{в^3}$	0,1	0,1	0,3	1,1	4,0	1,9	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,97

Таблица 3  
Корреляция значений регулярных составляющих-поля при выявлении  
ураганных содержаний

$C_{i+1}$ \ $C_j$	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	57,5	67,5	87,5	97,5	$n_j$
7,5	6	4												10
12,5	4	5	4	2										16
17,5		5	3	3										11
22,5		1	2	1	3	1	1							9
27,5			2	3	1	2			1					9
32,5				1	3		1				1			6
37,5					1	1	1	1	1					5
42,5					1		1							2
47,5								1	1					3
57,5						1	1							2
67,5										1			1	2
87,5										1				1
97,5												1		1
	10	16	11	9	9	5	5	2	3	2	2	1	1	76

ности аномалий. Оказывается, что усиление контрастности аномалий происходит в случае конкордантного соотношения полей при перемножении аппроксимирующих функций, а при антикордантном соотношении — при их делении. Поскольку комплексообразование дискордантно соотносящихся полей химических элементов положительного результата не дает, то достигаемый эффект от вычисления произведений или отношений содержаний компонентов в ореоле определяется явлением резонанса, при котором происходит увеличение амплитуды результирующей зависимости, если периодичность изменения исходных аппроксимаций совпадает по частоте.

Как видно, при выборе способа усиления полезного сигнала решающее значение приобретает знак пространственного соотношения геохимических полей, зависящий в общем случае от форм нахождения химических элементов в ореолах, их парагенетических сочетаний в ассоциации способов минералообразования и зональности строения ореола /12/. Это означает, что задача выбора информативного комплекса химических элементов довольно сложная и требует предварительной оценки их корреляционных зависимостей. Например, основываясь на открытии для эндогенных ореолов сульфидных месторождений универсального ряда зональности, Л.Н. Овчинников и С.В. Григорян /4/ предлагают выбор информативного комплекса химических элементов производить с учетом их положения в универсальном ряду, выделяя особо надрудные и подрудные химические элементы, представляющие собой в сочетаниях не что иное как парагенетические ассоциации /12/. Пространственные соотношения геохимических полей компонентов внутри ассоциаций конкордантно, а между ними — антикордантно, а поэтому использование универсального ряда для решения задачи усиления контрастности аномалий путем расчета так называемых мультипликативных отношений оправдано не только практически, но и теоретически. По-видимому, этот принцип следует считать универсальным, так как все генетически и вещественно однотипные месторождения обладают известной устойчивостью образования парагенетических ассоциаций и их поведения при эндо- и экзогенных процессах.

Научно обоснованное выделение информативных комплексов химических элементов является актуальной задачей геохимических методов поисков и позволит значительно повысить их геологическую эффективность. О том, что такая проблема действительно существует свидетельствует статистика открытий месторождений полезных иско-



паемых геохимическими методами: на 10 000 000 отобранных проб - 10 объектов. Коэффициент полезного действия - порядка 0,1%.

Эта проблема решается путем разработки новых методов поисков, а также путем повышения точности и надежности измерений и путем комплексирования геохимических и геофизических способов.

Вопрос повышения точности и надежности измерений имеет <sup>до</sup> прямое отношение к методологии комплексирования геохимических полей, так как его решение повлияет на уменьшение случайных составляющих геохимических полей. В настоящее время широко проводятся опытно-методические работы по внедрению ядерно-физических способов опробования / 3 /. Однако разрешающая способность этих способов (чувствительность порядка 0,001% и точность около 0,01%) для геохимических методов поисков явно недостаточна. Тем не менее задача решается положительно, если определяется сумма содержаний нескольких компонентов (аддитивное геохимическое поле), и очень важно, чтобы эта сумма не была механическим набором комплекса химических элементов, а соответствовала бы их парагенетическим ассоциациям. В иных случаях, при анти- и дискордантных соотношениях полей, положительный эффект от применения этих методов будет преуменьшаться и, даже, вообще может быть сведен к нулю. Например, при антикордантных соотношениях двух компонентов аддитивная результирующая будет стремиться к фоновому значению аддитивного геохимического поля и аномалия в таком поле может исчезнуть вообще.

В связи с необходимостью повышения глубинности поисковых работ важное значение в проблеме приобрел вопрос комплексирования геохимических и геофизических методов /2,11/. Назначение комплексирования - разбраковка аномалий. Особое значение это приобретает для аномалий ослабленной контрастности, число которых на исследуемых площадях тем больше, чем глубже залегают объекты поисков. Естественно, геохимические и геофизические поля имеют разную природу но они отражают конкретные объекты, а поэтому в оговоренных условиях комплексирования аномалия в строении результирующего поля будет более контрастной и перспективной, чем в поле какого-либо одного из свойств. Например, при поисках прожилко-вкрапленного медномolibденового оруденения зафиксированы аномалии в строении полей меди, молибдена, ВП и ЕП, что при вычислении поля комплексного показателя ( $Cu \cdot Mo \cdot ВП$ ).  $ЕП^{-1}$  дает резкое повышение контрастности и позволяет, к тому же, судить о генетическом типе оруденения /13/.

### 2.3. Обоснование систем разведочной сети и опробования

Надежность планирования добычи во многом зависит от детального изучения месторождения. Поэтому обоснование плотности и геометрии размещения наблюдений на объектах исследования (системы разведочных работ и опробования) во всех случаях весьма актуально. Это обоснование является довольно сложным исследованием, потому что приходится принимать во внимание не только однозначность геологической увязки его результатов, но и необходимость получения надежной информации в отношении выявления структурных уровней строения геологических полей рудных тел, поблочной оценки средних значений их мощностей и качества руд, а также целесообразность соответствия систем геологических наблюдений системам разработки месторождений полезных ископаемых.

Применение внутриобъектных аналогий предполагает проведение на месторождении специальных исследований по определению рациональной плотности и геометрии размещения разведочных наблюдений. При решении этой задачи используются разные методы, но мы, продолжая сказанное, подробно изложим сущность способа геометрической автокорреляции, соответствующего геометро-статистической модели месторождения и являющегося аналитическим развитием известных предложений И. Л. Каллистова / 6 /.

В основе применения метода геометрической автокорреляции лежит изучение частотной характеристики поля. Чем выше частота изменения поля, тем, естественно, чаще следует бурить скважины, проходить горные выработки и отбирать в них пробы. Существенным преимуществом метода является возможность не только оценки средних содержаний, но и выявления структурных уровней строения поля и, следовательно, дифференцированного решения задачи применительно к стадиям разведочного процесса: каждой стадии разведки - свой структурный уровень изучения поля свойств. <sup>I)</sup>

Метод геометрической автокорреляции реализуется в одномерном варианте. С этой целью по каждому из основных направлений рудного тела (мощности, простиранию, падению) выбирается по 3-4 сечения,

---

<sup>I)</sup> Для предварительной разведки - нулевой или первый уровень, для детальной разведки - первый или второй уровень, для эксплуатационной разведки - второй или третий уровень, для эксплуатационного опробования - третий или четвертый уровень.

наиболее полно изученных в процессе эксплуатации. <sup>х)</sup> Исходные данные (содержания, мощности, отметки кровли или подошвы залежи) наносятся на график, на котором после регуляризации измерений строится аппроксимирующая функция:  $U = f(x)$ . Для этой функции с шагом, равным шагу измерений на сечении, строятся направления проекций градиентов на ось расстояний, которые в данном случае лежат все на параллельных прямых и в одной плоскости /рис. 9, А, а/. Затем аппроксимирующая функция последовательно смещается относительно исходного положения на 1, 2, 3 и т.д. шага измерения  $\Delta X$  / и для каждого из них вычисляется  $\cos \psi_q$  между проекциями градиентов смещенного и изначального положений, частные значения которых ( $\cos \psi_q$ ) в точках могут быть равны либо +1, когда градиенты однонаправлены, либо -1, когда градиенты направлены в противоположные стороны /рис. 9, А/. Вычисленное для каждого шага смещения среднее значение  $\cos \psi_q$  служит мерой оценки согласованности смещенного поля с изначальным.

При несмещенном положении среднее значение  $\cos \psi_q = +1$ . При последовательном смещении оно уменьшается пропорционально числу экстремальных значений аппроксимирующей сечение поля функции ( $K_q$ ) и числу шагов смещений ( $m$ ), кратному  $\Delta X \cdot m$ . При  $\Delta X \cdot m$ , равном длине полуволны,  $\cos \psi_q = -1$ , потому что против каждого максимума изначального положения аппроксимирующей функции встанет соседний минимум (антикордантное соотношение).  $\cos \psi_q = 0$ , когда  $\Delta X \cdot m$  равно  $1/4$  длины волны (дискордантное соотношение). В этом случае против максимумов и минимумов изначальной кривой регрессии  $U = f(x)$  будут располагаться точки ее перегиба. Расстояние  $\Delta X \cdot m$  при  $\cos \psi_q = 0$  называется радиусом геометрической автокорреляции -  $R_q$  (рис. 9, Б).

Оптимальный шаг наблюдений при изучении геохимических или морфометрических полей принимается равным среднему значению радиуса геометрической автокорреляции, вычисленному по совокупности исследованных сечений рудного тела. Он может быть разным для разных основных направлений, если рудное тело обладает трехмерной анизотро-

---

<sup>х)</sup> Следует выбирать наиболее протяженные, опробованные с постоянным шагом сечения и, что желательно, изучить их дополнительно с повышенной в 2-3 раза относительно принятой на предприятии плотностью наблюдений.

цией строения геологических полей. Однако чаще всего ограничиваются оценкой расстояния между наблюдениями по двум измерениям: по простиранию и падению (двумерная анизотропия), так как в направлении мощности изучение (опробование) объекта практически всегда принимается непрерывным. При организации на объекте исследования наблюдений с расстояниями, не превышающими длины радиуса геометрической автокорреляции, гарантируется не только достаточно высокая надежность определения средних значений изучаемых характеристик, но и выявление структуры геологического поля на заданном уровне, соответствующем стадии ведения разведочных работ.

Как видно, применение метода не требует какой-либо особой подготовки. Тем не менее, все графо-аналитические процедуры могут быть существенно упрощены и сведены к построению изначальной аппроксимирующей функции и подсчету числа экстремальных ее значений на сечении. Действительно,  $\cos \psi_q = 1 - 2K_q m(n-m)^{-1}$ , так как при смещении на один шаг  $\Pi$  уменьшается на единицу, а в окрестностях точек экстремумов аппроксимирующей функции значение  $\cos \psi_q$  становится равным минус 1 и столько раз, сколько было шагов смещений (рис. 9, А, а-г). Поскольку при смещении на  $m \Delta x = R_q$ ,  $\cos \psi_q$  должен быть равен нулю, а  $\Pi = (x_2 - x_1)^{-1} \cdot \Delta x$ , то справедливо соотношение  $\mathcal{L} - R_q - 2K_q R_q = 0$ . Откуда следует, что  $R_q = \mathcal{L} / (1 + 2K_q)^{-1}$ , где  $\mathcal{L}$  - длина участка аппроксимации.

На рис. (10) приведены результаты опробования и аппроксимации изменений регулярной составляющей геохимического поля золота по штреку одного из месторождений (данные И.Л.Каллистова), опробованному на интервале длиной 160 м с шагом 2 м. На интервале, судя по графику, можно считать доказанным существование 14 экстремумов. Экстремум в точке с координатой 52 м во внимание не принят, потому что нисходящая и восходящая ветви кривой регрессии подтверждены не тремя, а двумя точками интерполяции. При  $\mathcal{L} = 160 - 4 \cdot 2 = 152$  м  $R_q = 5.24$  м. Следовательно, этот штрек без ущерба для точности расчета среднего содержания золота мог бы быть опробован с шагом 5 м.

Проверить это непосредственно невозможно, т.к. пятиметровый интервал не кратен двум. Зато можно рассчитать и сопоставить средние значения при четырех- и шестиметровых расстояниях между пробам. Так, после коррекции двух "ураганных" содержаний (183 г/т и 125 г/т, см. § 2.4), среднее содержание золота по всем пробам равно  $23,5 \pm 2,6$  г/т, по нечетным пробам - 22,6 г/т, по четным пробам - 24,3 г/т, а по пробам через три интервала - в первом ва-

рианте 28,6 г/т, во втором варианте 19,4 г/т и в третьем варианте 22,4 г/т, т.е. при увеличении шага опробования в два раза погрешность определения среднего содержания не превышает погрешность аппроксимации. Однако при разрежении сети в три раза она в двух вариантах из трех выходит за пределы погрешности аппроксимации.

Кроме подтверждения недопустимости разрежения сети до расстояний, превышающих размер радиуса геометрической автокорреляции, приведенный пример наглядно иллюстрирует ограниченные возможности метода разрежения сети как способа определения расстояний между разведочными подсечениями. В бесконтрольном варианте применять этот метод нецелесообразно. Он не дает однозначных решений и создает лишь видимость обоснованности уменьшения плотности наблюдений, не соответствующей, как правило, строению геологических полей объектов исследований.

В отличие от метода разрежения сети метод геометрической автокорреляции лишен этих недостатков, обладая, к тому же, возможностью решения задачи обоснования плотности разведочных наблюдений с учетом стадийности геологоразведочного процесса. Для этого достаточно осреднить исходные данные на интервалах, равных  $4R_q$ , и способом "скользящей средней" с шагом, равным  $2R_q$ , построить новую кривую регрессии уровня ( $Q - I$ ). Вычисленное для нее  $R_{q-1}$  является оптимальным шагом наблюдения для предшествующей стадии изучения месторождения и т.д. Так, для данных рис. 10, если эксплуатационное опробование рудного тела целесообразно проводить с шагом 5 м, то его эксплуатационную разведку следует осуществлять с плотностью, не превышающей 15 м.

Окончательно результаты расчетов параметров разведочной сети корректируются с учетом параметров систем разработки месторождения и ведения очистных работ. Система разведки и опробования должны органически вписываться в систему разработки и обеспечивать надежное планирование добычных работ.

#### 2.4. Оценка качества минерального сырья в недрах

Оценка качества минерального сырья в недрах является одной из главных задач геологического обеспечения планирования добычных работ. Фактической основой для ее решения служат результаты химического опробования руд и вмещающих пород. По этим данным в практике геологоразведочных работ на рудниках рассчитывается два вида средних: среднеарифметическое значение -  $\bar{C} = n^{-1} \sum C_i$  и средневзвешенное

значение -  $\bar{C} = (\sum \Delta X_i)^{-1} \cdot (\sum C_i \Delta X_i)$  (линейный вариант), где  $C_i$  - содержание компонента в "i"-той пробе,  $n$  - число проб,  $\Delta X_i$  - область влияния пробы (шаг опробования).

Формула арифметического среднего значения соответствует вероятностно-статистической модели. Она выведена при условии статистической устойчивости частных значений совокупности переменных и утверждении, что на интервале  $C_{\min} \div C_{\max}$  в пространстве признака ( $C$ ) существует точка с координатой  $\bar{C}$ , сумма квадратов отклонений от которой минимальна:  $\sum (C_i - \bar{C})^2 = \min$ . Тогда, если приравнять частную производную этого выражения к нулю:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{C}} (\sum C_i^2 - 2\bar{C} \sum C_i + n\bar{C}^2) = -2 \sum C_i + 2n\bar{C} = 0, \text{ то } \bar{C} = n^{-1} \sum C_i.$$

Формула взвешенного среднего значения соответствует геометристатистической модели объекта исследования. Она представляет собой численный вариант определения интегрального среднего:  $\bar{C} = (\sum \Delta X_i)^{-1} \times (\sum C_i \Delta X_i) = (x_2 - x_1)^{-1} \cdot \sum f(x_i) \Delta x_i + (x_2 - x_1)^{-1} \cdot \sum \delta_i x_i - (x_2 - x_1)^{-1} \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$  (при  $\Delta X \rightarrow 0$ ), потому что при этом условии

$$n = \Delta X^{-1} (x_2 - x_1) \rightarrow \infty, \text{ а } (x_2 - x_1)^{-1} \cdot \sum \delta_i \Delta X_i \rightarrow 0.$$

В отличие от среднеарифметического интегральное среднее представляет собой ординату прямоугольника, построенного на интервале определения функции, площадь которого равновелика  $\int f(x) dx$ . Но так как геометристатистическая модель обладает отмеченными преимуществами относительно вероятностно-статистической модели, то предпочтение всегда должно отдаваться расчету средневзвешенной оценки, которая в общем случае не равна среднеарифметическому значению. Однако обе формулы дают один и тот же результат, если  $\Delta X = \text{const}$ :

$\bar{C} = (\sum \Delta X_i)^{-1} \cdot (\sum C_i \Delta X_i) = n^{-1} \sum C_i$ . В этом случае говорят, что пространственная задача сводится к задаче статистической.

Точность и надежность оценки взвешенного среднего значения определяется погрешностью аппроксимации. Например, для данных рис.

10 она равна  $\pm 2,6$  г/т, т.е. около 11% (относительных). Эта погрешность зависит от регулярной составляющей поля и числа проб. Так, для того же примера на участках штрека, где  $C_j > \bar{C}$   $\Delta C_q = 4,5$  г/т ( $n = 37$ ), а на участках, где  $C_j < \bar{C}$   $\Delta C_q = 2,8$  г/т ( $n = 40$ ). Обычно, чем больше значение регулярной составляющей, тем больше по модулю  $\Delta C_q$  - обстоятельство, которое до сих пор слабо учитывается при всех оценках качества минерального сырья.

Зависимость  $\Delta C_q$  от числа проб очевидна: чем больше  $n$ , тем меньше  $\Delta C_q$ . Число проб связано с длиной интервала опробования (или площадью блока). При уменьшении интервала до размеров шага опробования -  $\Delta C_q = (C_i - C_{j+1})$ . Отсюда следует, что одна проба при оценке качества руд ничего не представляет, кроме содержания, в том элементарном объеме, из которого она отобрана. Представительной является совокупность проб, размещенных в определенном порядке на объекте исследования (система опробования или разведки). Поскольку размеры блоков (интервалов) оценивая качества руд в процессе разведки последовательно уменьшаются, то естественно стремление повышать плотность опробования (разведочной сети). Обычно увеличение плотности опробования по стадиям разведки кратно двум и резко увеличивается при переходе к эксплуатационному опробованию, благодаря чему надежность оценки средних содержаний возрастает. Но так как плотность опробования всегда принимает <sup>ся</sup> в экономически целесообразных пределах, то, при прочих равных условиях, оценка качества минерального сырья для укрупненных блоков будет всегда точнее, чем для мелких. Причина этого кроется в том, что погрешность аппроксимации определяется главным образом случайной составляющей поля, среднее значение которой с увеличением числа проб стремится к нулю. При расчете  $\bar{C}$  по конечному числу проб влияние случайной составляющей полностью не компенсируется. Как следствие, в оценке среднего всегда присутствует какая-то доля случайной составляющей и тем большая, чем меньше  $n$ .

Все сказанное справедливо не только для линейного варианта решения задачи, но и, в условиях оценки качества минерального сырья, для плоских сечений (проекции) и трехмерных блоков рудных тел, в том числе эксплуатационных блоков. При этом вначале рассчитываются среднезвешенные оценки для секущих выработок, пройденных в направлении лежащий-висячий бок, затем - по сечению рудного тела, где взвешивание производится на расстояние между выработками, и, наконец, - по объему - на расстояния между сечениями.

Описанная схема расчета неприменима, если сечение рудного тела вскрыто веером скважин, на котором плотность опробования закономерно увеличивается от периферии к центру заложения веера (рис. 11). Следовательно, при расчете среднего любая закономерность, имеющая место в распределении компонента на сечении,

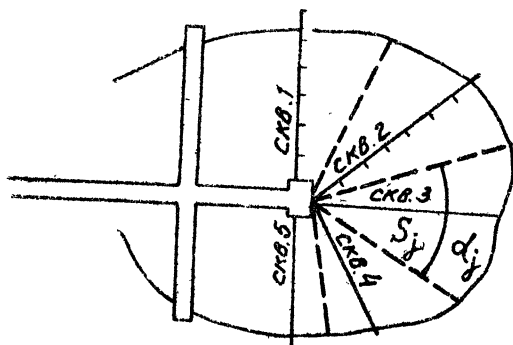


Рис. 11. Схема разведки  
сечения веревки  
скважин.

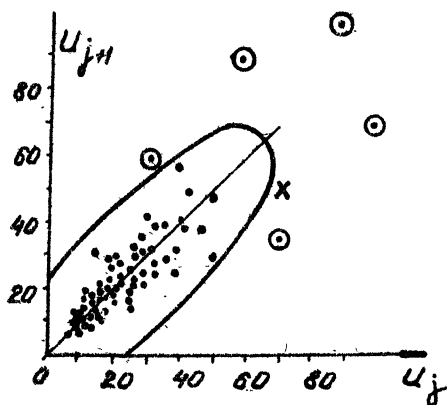


Рис. 12. Выявление проб с  
ураженными содержа-  
ниями. Влияние проб с  
содержаниями 183 г/т  
( $\odot$ ) и 125 г/т (х).

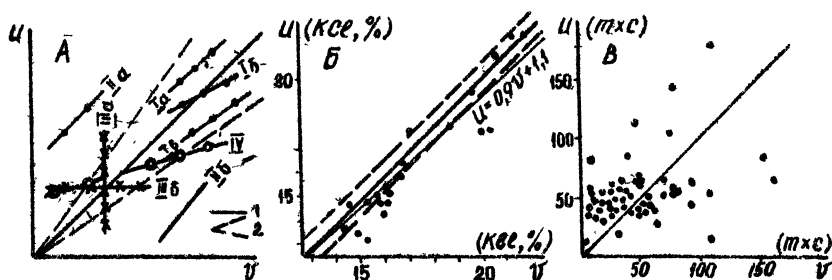


Рис. 13. Сопоставление данных сопряженных измерений.  
А - принципиальная схема, Б, В - примеры применения.  
1 - теоретическая прямая регрессии, 2 - границы  
области допустимых отклонений.



будет влиять на объективность оценки качества сырья за счет изменения плотности опробования: например, среднее качество руд на сечении будет всегда завышаться, если обогащенными окажутся участки, принадлежащие к центру заложения веера, и, наоборот, - занижаться, если будет обогащена периферия залежи. Расчет средневзвешенной оценки в этом случае должен быть выполнен вначале для скважины:  $\hat{C}_i = (n_i)^{-2} \sum C_i (2n_i - 1)$ , а затем - для сечения в целом:  $\hat{C} = (\sum S_j)^{-1} \sum S_j C_j$ , где  $C_i$  - содержание в "i"-той пробе,  $n_i$  - ее порядковый номер, считая от центра веера,  $n$  - число проб по скважине,  $N$  - число скважин,  $S_j$  - площадь сектора, ограниченная биссектрисами углов между направлениями соседних скважин ( $S_j = 0,5 \ell_j^2 \cdot \alpha_j$ ,  $\ell_j$  - длина скважины,  $\alpha_j$  - угол между биссектрисами, в радианах, который для скважин, ограничивающих веер, принимается равным половине углов  $\alpha_j$  и  $\alpha_N$ ).

Кроме числа и геометрии размещения проб на объекте исследования, оценка среднего качества руд в блоке зависит также от наличия в их совокупности членов с резко выдающимися значениями случайной составляющей поля:  $\delta_i = C_i - C_j$ . В общем случае они могут быть как положительными, так и отрицательными, но особый интерес для практики оценки качества минерального сырья представляют положительные выдающиеся отклонения, получившие наименование ураганных содержаний, когда  $C_i \gg C_j$ . Несвоевременное выявление и учет этих содержаний оказывает сильное завышающее влияние на оценки как среднего значения, так и, в особенности, погрешности аппроксимации. Например, для данных рис. 10 упомянутые содержания золота 183 г/т и 125 г/т, несмотря на то, что по штреку отобрано 81 проба, завышают среднее содержание на 9%, а погрешность аппроксимации - на 49% (относительных).

По данным А.М.Прериса /14/, для решения задачи выявления и учета проб с ураганными содержаниями уже предложено 43 способа. Характерным для этих определений, за исключением способа, описанного Д.И.Коганом и известного под названием способа ГКЗ /7/, является разработка решающих правил ограничения их влияния без учета уровня минерализации тех локальных участков (блоков) рудных тел, в которых они встречены. Недостатком способа ГКЗ является отсутствие строгого аналитического решения задачи.

Отмеченный недостаток может быть устранен, если воспользо-

ваться методическим приемом статистической автокорреляции регулярных составляющих, вычисленных по интерполяционному полиному:  $U_j = 0,0625 (U_i + 4U_{i+1} + 6U_{i+2} + 4U_{i+3} + U_{i+4})$ , поскольку очевидно, что, по крайней мере, два соседних члена  $U_j$  и  $U_{j+1}$  будут зависимыми. Если это так, то на корреляционном графике, построенном в координатах  $U_j, U_{j+1}$ , все точки должны группироваться вдоль прямой, проведенной под углом  $45^\circ$  к координатным осям, в соответствии с амплитудой и периодичностью изменения регулярной составляющей и симметричностью ее отклонений от теоретической корреляционной модели, так как  $(j+1)$ -ый член для следующей пары коррелируемых измерений станет  $j$ -тым членом. Отклонение от теоретической прямой и, как следствие, введение в рассмотрение именно корреляционной, а не функциональной зависимости обусловлено тем, что периодичность изменений регулярной составляющей не совсем правильная, а описывающая её кривая регрессии является лишь аппроксимацией, не свободной от влияния случайной составляющей:  $C_j \approx f(X)$ .

Регуляризация содержаний осуществляется по ограниченному числу данных, а поэтому завышающее влияние ураганного содержания всегда будет проявлять себя на корреляционном графике в виде достаточно резко обособленных отклонений и тем сильнее, чем выше содержание в ураганной пробе. Однако в зависимости от содержаний компонента в пробах на интервалах  $X_i \pm 4\Delta X$  относительно координаты пробы с ураганным содержанием ( $X_i$ ) и весовых характеристик (1, 4, 6, 4, 1), с которыми они входят при регуляризации в интерполяционный полином, последствия влияния ураганного содержания будут неодинаковы. Благодаря симметричности возможны три варианта исходов: во-первых, когда ураганное содержание на интервале  $X_i \pm 2\Delta X$  существенно завышает все пять значений регулярных составляющих пропорционально весовым характеристикам 1, 4, 6, 4, 1; во-вторых, когда ураганное содержание оказывает существенное завышение только членов с весовыми характеристиками 4, 6, 4 и, в третьих, когда оно проявляет себя только при расчете члена с весовой характеристикой 6.

Выявление этих особенностей завышающего влияния ураганных содержаний возможно, если рассчитать по данным регуляризации эллипс рассеяния измерений для поля корреляции. В первом случае, вне контуров, ограниченных эллипсом рассеяния, окажется пять точек, во втором случае - три точки и в третьем случае -

только одна точка. Пользуясь этим, ураганное содержание сравнительно просто ограничить по единому принципу с учетом как их абсолютного значения, так и их относительного превышения над окружающим фоном: для первого варианта ураганное содержание заменяется средним значением из пяти симметрично расположенных значений  $C_j$ , во втором варианте — средним из трех значений и в третьем варианте ураганное содержание заменяется равным значением  $C_j$ , которые во всех случаях рассматриваются в дальнейшем как новые значения переменных  $C_i$ , а во все ранее вычисленные значения  $C_j$  на интервале  $X_i \pm 2\Delta X$  вносятся соответствующие коррективы, необходимые для оценок амплитудных характеристик поля и погрешностей аппроксимации.

Например, по данным рис. 10 был составлен корреляционный график, для которого рассчитан эллипс рассеяния:  $C_j^2 - 6,6 C_j + C_{j+1} - 8,5 C_{j+1} - 1,68 C_j C_{j+1} - 3,84 = 0$  (рис. 12, табл. 2, 1). Оказалось, что проба с содержанием 183 г/т зависела все пять членов и была заменена содержанием 71 г/т, а проба с содержанием 125 г/т — только один член и была заменена содержанием 67 г/т (табл. 3).

При перспективном планировании геологоразведочных и добычных работ на предприятии геологу наряду с оценкой качества минерального сырья приходится заниматься решением задачи прогнозирования. Отличительной особенностью условий решения этой задачи является либо полное отсутствие, либо весьма ограниченное количество геологоразведочной информации для участков, подлежащих разведке или вскрытию горными работами. В таких условиях используются данные оценки качества минерального сырья и изучения закономерностей изменения его состава, установленные при обобщении материалов по отработанной части месторождения.

Оценка и прогноз качества минерального сырья в методологическом отношении — это две принципиально разные задачи. Оценка качества руд основывается на интерполяции конкретных результатов исследований, а прогноз — на экстраполяции закономерностей изменения частных оценок, вычисленных по данным опробования хорошо изученных участков месторождения. Решение задачи экстраполяции является чрезвычайно неустойчивым (некорректным). Экстраполируется функция  $C = f(X)$ , определенная путем интерполяции, которую целесообразно дополнительно "заглубить" до уровня  $(q - 1)$ . Такая "заглубленная" функция продолжается в область экстраполяции (не более, чем на один-два горизонта или

Таблица 3

Учет проб с ураганными содержаниями

Проба с содержанием 183 г/т				Проба с содержанием 125 г/т				Примечание
Номер пробы	$C_i$	$C_j$	$C_j^*$	Номер пробы	$C_i - C_j$	$C_j^*$		
29	8	14	14	66	29	30	30	
30	15	31	31	67	40	32	32	
31	79	59	52	68	25	39	39	область влияния ураганного содержания
32	54	90	62	69	40	57	42	
33	183(71)	99	57	70	125(67)	67	45	
34	45	70	42	71	30	50	35	
35	14	35	28	72	15	28	24	
36	13	29	29	73	19	21	21	
37	55	42	13	74	29	20	20	
	Сумма	353	Откорректированные значения		Сумма	67	Откорректированные значения	
	Среднее	71			Среднее	67		

блока) и по ней определяется среднее значение интересующего нас параметра.

### 2.5. Обработка сопряженных измерений. Сопоставление данных разведки и отработки месторождений

Сопряженными называются измерения какого-либо свойства объекта исследования, полученные разными способами и характеризующие одни и те же точки, интервалы или объемы земных недр. Например, сопряженными являются определения содержаний компонентов в пробах руд, проанализированных в основной и арбитражной лабораториях; оценки мощностей рудных тел, установленные при документации кернов и каротажных исследованиях скважин; данные разведки и отработки блоков рудных тел и т.п. Обобщение информации по сопряженным измерениям, одно из которых принимается в качестве контрольного ( $U_i$ ), а другое - контролируемого ( $V_i$ ), позволяет оценить размеры случайных и систематических погрешностей рядовых (контролируемых) измерений и внести соответствующие коррективы в последние или даже, их забраковать.

1. Результаты контрольных и контролируемых измерений хорошо коррелируются между собой ( $\tau > 0,7$ ), но линия уравнения регрессии располагается на графике вне области допустимых отклонений (рис.13,II), что соответствует наличие у рядовых измерений систематических погрешностей (а - занижение, б - завышение). При этом средние результаты могут быть исправлены в соответствии с уравнением регрессии.

2. Результаты контрольных и контролируемых измерений не коррелируются между собой ( $\tau < 0,2$ ), что определяется либо недостаточной чувствительностью способа (а), либо наличием у рядовых измерений (б) значительных случайных погрешностей (рис.13,III). Такие данные рядовых измерений должны браковаться, ибо по ним невозможно изучать закономерности изменения качества руд и мощностей рудных тел в пространстве.

3. Результаты контрольных и контролируемых измерений коррелируются между собой, но линия эмпирической регрессии только частично лежит в области допустимых отклонений (рис.13,IV). Характерным здесь является то, что средние оценки  $\bar{U}$  и  $\bar{V}$  совпадают, но с изменением  $\bar{V}$  уравнение регрессии при содержаниях выше и ниже среднего фиксирует наличие систематических погрешностей переменного знака. При этом, если  $0,5 < \tau < 0,7$ , то поправки вводятся по укрупненным блокам, если  $\tau < 0,5$ , а  $\bar{U} \neq \bar{V}$ , то результаты рядовых измерений целесообразно забраковать.

Нами обсуждены лишь некоторые граничные варианты исходов экспериментальных исследований. В каждом конкретном случае возможно получение промежуточных результатов, которые должны интерпретироваться в зависимости от условий решаемой задачи. Тем не менее, приведенные примеры, подтверждаемые практикой обработки данных сопряженных измерений, достаточно убедительно иллюстрируют широкие возможности корреляционного метода по сравнению с известным способом сравнения средних. Преимущества этого метода состоят в том, что он позволяет: во-первых, оценивать характеристики свойств с учетом присущих им изменений в пространстве, во-вторых, охарактеризовать динамику изменения вводимых поправок и, в-третьих, вводить поправки на те интервалы значений свойства, которые по каким-либо причинам своевременно не были проконтролированы. Кроме того, корреляционный способ может вскрыть погрешности, когда простое сравнение средних их не фик-

сирует (рис. I3, IV).

На рис. I3, 5 и в табл. 4 приведены результаты сопоставления определений содержаний хлористого калия по данным опробования керны и стенок сиважи химическим ( $U$ ) и радиометрическим ( $V$ ) способами.

Таблица 7. 4

Результаты смежных оценок содержаний и их статистическая обработка

№ п/п	Содержание KCl, %		$U_i^2$	$V_i^2$	$U_i V_i$	$(V_i - U_i)$
	$U_i$	$V_i$				
1	14,8	15,7	219,04	246,49	232,36	+0,9
2	17,9	18,5	320,41	342,25	311,15	+0,6
...	...	...	...	...	...	...
21	16,4	16,6	298,96	275,56	272,24	+0,2
22	17,8	17,0	316,84	289,00	302,60	-0,8
	366,2	381,5	6249,72	6744,63	6463,93	+15,3
Ср.	16,6	17,3	284,08	306,57	293,82	+0,7

Как видно, при достаточно высокой коррелируемости данных химического и радиометрического опробования ( $r = +0,81$ ) уравнение регрессии выходит за область допустимых отклонений при содержаниях KCl  $> 16,1\%$  ( $\Delta_{\text{доп}} = \pm 0,6\%$ ), а поэтому при использовании радиометрических анализов в средние содержания должны вводиться поправки согласно уравнению:  $U = 0,90 V + 1,1$ . Среднее значение систематической погрешности определения KCl на интервале содержаний от 13,2% до 21,6% составляет +0,7%.

Особое значение корреляционный способ сопоставления сопряженных измерений приобретает при сравнении данных разведки и отработки месторождений полезных ископаемых. Обычная методика рассчитана на сопоставление результатов по геологическим блокам. Но так как количество этих блоков численно всегда резко ограничено, то при всех сопоставлениях приходится довольствоваться оценкой лишь статистики расхождений данных разведки и эксплуатации. Оценка изменений расхождения оценочных параметров в пространстве рудного тела (динамика явления) остаются, как правило, без внимания. Сопоставляться при этом могут любые параметры, харак-

теризующие контуры, условия залегания и качество минерального сырья: отметки кровли и подошвы рудных тел, их мощности, содержания компонентов, продуктивности тел полезных ископаемых, а также их побочные запасы. С этой целью залежь полезного ископаемого разделяется в соответствии с системой разведки на элементарные блоки, в пределах которых находятся разведочные пересечения рудного тела. Затем в границах каждого элементарного блока рассчитываются средние значения характеристик оцениваемого параметра по данным отработки, относимые по координатам к центру элементарного блока. Данные отработки принимаются в качестве контролируемых  $U$ , а данные по разведочному подсечению в качестве контролируемых  $V$ . По ним строится график в системе координат  $UV$  и производятся все расчеты аналогичные описанным.

## 2.5. Морфометрический анализ рудных тел пласто- и линзообразных форм

Трактовка генезиса руд месторождений, тела полезных ископаемых которых имеет пласто- или линзообразные формы и залегают согласно с вмещающими их породами, во многих случаях не является однозначной. Так, предметом научных дискуссий служит происхождение руд месторождений колчеданной формации. При этом морфометрические характеристики рудных тел, залегающих в стратифицированных вулканогенных комплексах, вообще не анализируются, хотя их формы, с одной стороны, являются основанием для принятия гипотезы вулканогенно-осадочного генезиса минерального сырья, а, с другой —, заставляют изощряться сторонников метасоматического образования руд при объяснении их происхождения.

Морфометрический анализ является составной частью морфологии рудных тел, т.е. отрасли геологии полезных ископаемых, обязанной, по предложению Д.А.Зенкова / 5 /, заниматься описанием форм залежей минерального сырья /морфография/, изучением закономерностей изменения и соотношения их морфометрических характеристик /морфометрия/, а также выяснением происхождения этих форм /морфогенезис/. Сущность морфометрического анализа заключается: во-первых, в разработке в соответствии с принятой генетической концепцией теоретических моделей корреляционных зависимостей, описывающих пространственные изменения и соотношения морфометрических характеристик рудных тел — абсолютных отметок кровли  $h_k$  / и подошвы  $h_n$  / , а

также мощностей /м./; во-вторых, в построении по геологоразведочным данным графиков аппроксимирующих морфометрические поля функций и их корреляционные зависимости -  $h_k = f(x, y)$ ,  $h_n = f(x, y)$ ,  $m = f(x, y)$ ,  $h_k = f(h_n)$ ,  $m = f(h_n)$ ; в-третьих, в сравнении результатов исследований с теоретическими моделями и геологической интерпретации этих сравнений.

Для рудных тел пласто- и линзобразных форм теоретические модели корреляционных зависимостей морфометрических параметров удобно разрабатывать применительно к осадочному процессу. Это определяется тем, что его основные закономерности достаточно хорошо изучены: известен фактор осадкоотложения, установлено влияние рельефа депрессии аккумуляции на мощность формирующегося осадка /большие мощности накапливаются в переуглублениях/, выявлены условия образования основных форм рудных тел в зависимости от рельефа и размеров депрессий аккумуляции и, наконец, охарактеризованы различия в структурах поверхностей, ограничивающих сверху и снизу рудные тела /нижняя - скульптурный слепок с рельефа депрессии, верхняя-, в первом приближении, пологонаклонная или субгоризонтальная плоскость/. Поэтому с учетом наличия у поля свойства случайной составляющей между морфометрическими характеристиками залежей осадочного генезиса должны иметь место следующие основные корреляционные зависимости: для рудных тел пластообразной формы, у которых пространственные соотношения поверхностей кровли и подошвы конкордантны,  $h_k = f(h_n)$ , а  $m \neq f(h_n)$ ; для линзобразных тел, поверхности кровли и подошвы которых залегают относительно друг друга дискордантно, аналогичные зависимости будут обратными -  $h_k \neq f(h_n)$ , а  $m = f(h_n)$ , что отражено на принципиальных схемах /рис.14/.

Геологическая интерпретация результатов морфометрических исследований для конкретных объектов разведки состоит в сопоставлении реальных зависимостей с теоретическими моделями. При соответствии реальных зависимостей одной из теоретических моделей имеются весьма серьезные основания утверждать, что образование рудного тела не противоречит гипотезе осадочного происхождения. Однако, если такое соответствие отсутствует, то альтернативное утверждение будет справедливо лишь при условии, что это несоответствие не является следствием особенностей строения рельефа депрессии аккумуляции или влияния пострудной тектоники.

Особенности рельефа депрессии аккумуляции приходится учитывать, когда в его строении чередуются резко выраженные западины с относи-



тельно слабо переуглубленными участками. При заполнении такой депрессии образуется пластообразная залежь, условленная снизу линзообразными выступами, пространственные соотношения между морфометрическими параметрами которой будут описываться комбинацией корреляционных зависимостей, свойственных для рудных тел прессых форм.

Тектоническая нарушенность сплошности и падения рудных тел также требует вносить коррективы в исходные теоретические модели. При этом, если изменение углов падения рудных тел влечет за собой лишь поворот линий регрессий относительно осей координат, то их дизъюнктивная нарушенность — разрыв структур корреляционных полей. Как следствие, каждый тектонический блок в поле корреляции морфометрических параметров обособляется и описывается специфическими зависимостями, кратчайшие расстояния между аппроксимирующими прямыми которых соответствуют амплитудам относительного перемещения блоков.

Влияние пликативной составляющей для осадочных рудных тел может быть исключено, если за начало отсчета измерений морфометрических параметров брать не абсолютные, а относительные отметки: относительно какого-либо осадочного маркирующего горизонта, залегающего в кровле вмещающего рудное тело пород, или, что значительно хуже, относительно осредняющей плоскости, проведенной параллельно кровле рудного тела. Пересчет параметров полезно осуществлять особенно в тех случаях, когда изменения углов падения сочетаются с усложнениями форм залежей. Они в совокупности дают суммарный эффект, схожий с влиянием пострудных дизъюнктивов. Кроме того, выявление дизъюнктивов само по себе имеет важное практическое значение, поскольку они влияют на квалификацию запасов минерального сырья и оценку горно-технических условий разработки месторождений.

На рис.15 приведены результаты морфометрического анализа по Второму рудному телу Талганского месторождения, выполненному по данным Поляновской ГРП. Второе рудное тело вскрыто скважинами в слепом залегании, падение кровли залежи пологое /3-10°/ восточное. Руда преимущественно вкрапленная, медноцинковая. Контакты с вмещающими породами нечеткие. Судя по результатам геометризации, рудное тело представляет собой по форме пластообразную залежь, осложненную в центральной части линзой. Для пластообразной части характерно наличие зависимости  $h_k = f(h_n)$  и её отсутствие между  $m$  и  $h_n$ . Для линзообразной части эти соотношения обратные. Следовательно, относительно формы образования Второго рудного тела месторождения не противоречит гипотезе вулканогенно-осадочного генезиса.

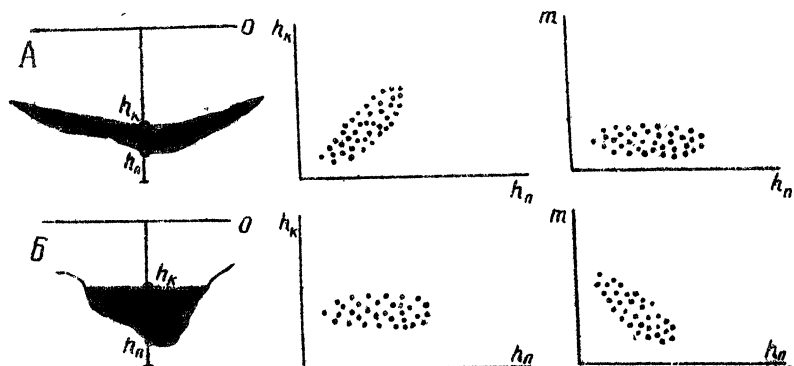


Рис. 14. Принципиальные модели корреляционных зависимостей морфометрических параметров для рудных тел: пластовидной (А) и линзовидной (Б) форм.

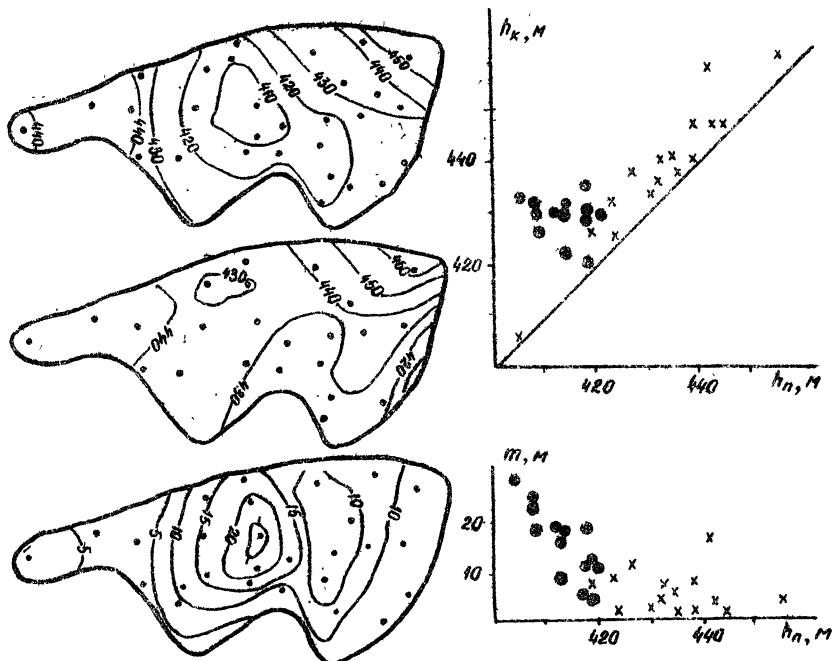


Рис. 15. Структура морфометрических полей рудного тела и корреляционные соотношения их параметров: А - кривая, Б - подошва, В - мощность

## ЛИТЕРАТУРА

1. БУКРИНСКИЙ В.А. Вопросы геометризации физико-технических и горно-геологических показателей месторождения для моделирования на ЦВМ.- М.: изд. МГИ, 1966.-128 с.
2. ВАХРАМЬЕВ Г.С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений.- М.: Недра, 1978.
3. ВИНОГРАДОВА Н.А. и др. Некоторые примеры использования рентгено-радиометрического анализа при геохимических поисках. В кн. Методы обработки цифровой информации при геохимических поисках. М.: ИМГРЭ, 1975, с. 83-92.
4. ГРИГОРЯН С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке гидротермальных месторождений.- Сов. геология, 1973, № I, с. II-17.
5. ЗЕНКОВ Д.А. Морфологический анализ оруденения с точки зрения разведки.- В кн. Материалы - по методике разведки полезных ископаемых. М.: Госгеолтехиздат, 1962, с. 97-104.
6. КАЛЛИСТОВ П.Л. Изменчивость оруденения и плотность наблюдений при разведке и опробовании.- Сов. геология, 1966, сб. 53, с. 118-151.
7. КОГАН И.Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений.- М.: Недра, 1971.- 196 с.
8. КОЦ Г.А., ЧЕРНОУЯТОВ С.Ф., ШМАНЕНКОВ И.В. Технологическое опробование и картирование месторождений.- М.: Недра, 1980.- 288 с.
9. МЯТКОВ В.Ф. Вопросы теории математической обработки геохимической информации при поисках месторождений.- В кн.: Методы обработки цифровой информации при геохимических поисках.- М.: ИМГРЭ, 1975, с. 3-13.
10. МЯТКОВ В.Ф. Геометризация и анализ геологических полей месторождений полезных ископаемых.- Изв. вузов. Горный журнал, 1982, № 10, с. 30-37.
11. МЯТКОВ В.Ф. Структурная геометро-статистическая модель строения геологических полей и методика решений геологоразведочных задач.- Изв. вузов.- Геология и разведка, 1984, № 3, с. 44-58.
12. МЯТКОВ В.Ф. Геохимический метод парагенетического анализа руд.- М.: Недра, 1984. 126 с.
13. МЯТКОВ В.Ф., РАБОТКИН А.С. Сравнительная оценка эффективности применения методов ВП и ЕП при поисках меднопорфировых месторождений.- Уч. зап. ПТУ, 1972, № 292, с. 110-113.
14. ПЕРИС А.М. Определение и учет ураганных проб.- М.: Недра, 1974.- 104 с.
15. СОБОЛЕВСКИЙ П.К. Современная горная геометрия.- Социалистическая наука и реконструкция, 1932, № 7, с. 32-65.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ . . . . .	3
1.1. Геометризация свойств тел полезных ископаемых как основа решения геологоразведочных задач . . . . .	3
1.2. Понятие геологического поля . . . . .	4
1.3. Способы задания аппроксимирующих геологические поля функций. Понятие о регулярной и случайной составляющих геологических полей . . . . .	5
1.4. Математические действия с заданными графически функциями . . . . .	9
1.5. Типизация математических решений геологоразве- дочных задач . . . . .	12
2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ . . . . .	18
2.1. Изучение закономерностей распределения компо- нентов в залежах полезных ископаемых . . . . .	18
2.2. Выделение аномалий ослабленной контрастности в средах рассеяния вещества . . . . .	20
2.3. Обоснование систем разведочной сети и опробо- вания . . . . .	25
2.4. Оценка качества минерального сырья в недрах . . . . .	28
2.5. Обработка сопряженных измерений. Составле- ние данных разведки и эксплуатации . . . . .	35
2.6. Морфометрический анализ рудных тел пласте- и линзовидных форм . . . . .	39
Л и т е р а т у р а . . . . .	43

Методическая разработка по курсу "Математические методы в геологии" (раздел: "Геометризация и анализ геологических полей месторождений полезных ископаемых") для студентов специальности 0101 "Геологическая съёмка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых"

Составили: В.Ф.Мягков, проф. д.г.т.м.н.

Рецензент: В.В.Бабенко, с.н.с., к.г.т.м.н.

Ответственный

за выпуск: А.Г.Баранников, доц., к.г.т.м.н.

Корректурa кафедры поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

---

Подписано к печати 10.10.84г. Формат бумаги 60х84 I/16  
Печ.л. 2,8 Уч.-изд.л. 2,44 Тираж 300 экз. Заказ 660  
Бесплатно

---

Ротапринт СГИ, Свердловск, Куйбышева, 30



Сканирование - Беспалов  
DjVu-кодирование - Беспалов

