

Глава 8 ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Современные геологоразведочные работы представляют собой сложный процесс, состоящий из ряда последовательных стадий исследования, на каждой из которых решают определенный круг задач по изучению закономерностей размещения полезных ископаемых и выявлению промышленных месторождений. Так как ресурс легкооткрываемых месторождений практически исчерпан, то основной тенденцией развития геологоразведочных работ является переход к решению более сложных геологических задач: расширению минерально-сырьевой базы на промышленно-освоенных территориях за счет выявления слабопроявленных (глубокозалегающих, слепых и погребенных) залежей; изучению труднодоступных малоосвоенных районов; поисков и разведки месторождений с низкими концентрациями полезных компонентов, но с большими запасами руд; переходу к выявлению нефтегазовых залежей неструктурного типа, в более сложных геологических условиях, в том числе в областях развития траппов.

Все это требует увеличения глубинности поисков, выявления слабоконтрастных по физическим свойствам объектов на фоне помех, поисков полезных ископаемых по косвенным признакам. Сложность решаемых задач и неоднозначность геологической интерпретации геофизических данных приводят к необходимости комплексирования, т.е. оптимального сочетания ряда геофизических, геологических, геохимических, аэрокосмических методов и горно-буровых работ. Рассмотрим в основном проблемы комплексирования именно геофизических методов, обусловленного неоднозначностью качественных (определение местоположения и природы) и количественных (определение геометрии) заключений об объекте исследования, которые получают по результатам одного метода. Как правило, один метод дает сведения лишь о горизонтальных границах раздела, другой — о вертикальных, третий позволяет оценить свойства объекта, когда известны лишь его геометрические размеры, и т. д. Основная цель комплексирования геофизических методов — *обеспечение надежности однозначного решения поставленных геологических задач* и определения основных параметров исследуемых объектов и вмещающей среды.

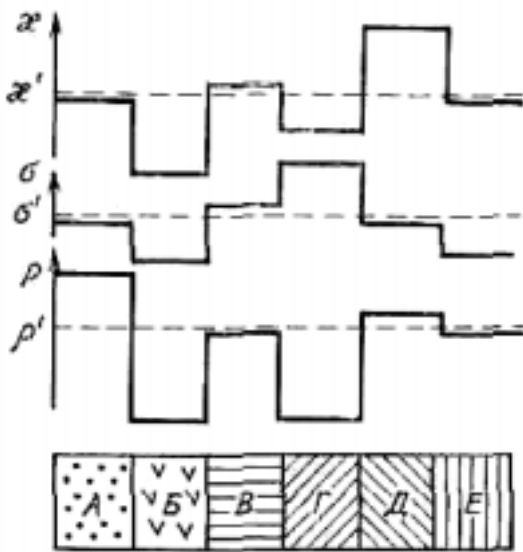


Рис.8.1 Распределение свойств пород по комплексу методов

Рассмотрим пример однозначного решения задачи распознавания пород разных типов при картировании. Пусть свойства пород шести основных типов (*A, B, V, G, D, E*), слагающих район исследований, представлены в виде распределений свойств (рис. 8.1). Если значение магнитной восприимчивости опознаваемого комплекса k' , то этот комплекс можно отнести к одному из трех типов пород *A, B, E*. Если определена еще его плотность σ' , то комплекс можно отнести к одному из двух классов *A* и *B*. Наличие третьей характеристики ρ' позволяет однозначно определить его принадлежность к классу *B*. Анализ рис. 8.1 показывает, что любая из пород

шести типов по данным трех методов (магнито-, грави- и электроразведки) опознается однозначно. Аналогичная ситуация возникает и при определении количественных

параметров объектов. Если по данным одного метода неопределенность количественных оценок весьма велика, то совместная количественная интерпретация двух геофизических полей или более, основанных на разных физических принципах, позволяет существенно сузить пределы неоднозначности.

Поэтому комплексирование геофизических методов является одним из ведущих направлений научно-технического прогресса в геологии, способствующих повышению эффективности геофизических работ при решении различных задач поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Совместная обработка комплекса геофизических данных, направленная на решение широкого круга геологических задач с необходимой детальностью и надежностью, требует очень больших объемов расчетов и в полной мере может быть реализована лишь при использовании ЭВМ, банков данных и автоматизированных систем обработки информации.

8.1 Комплексы геофизических методов

Геофизические методы имеют ряд характерных особенностей, способствующих комплексированию. К ним можно отнести высокую производительность при относительно низкой себестоимости работ и возможность выполнения измерений несколькими геофизическими методами по единой сети наблюдений, что особенно характерно при проведении работ с корабля, самолета или в скважине. Прибавление при таких работах других геофизических методов незначительно повышает стоимость работ, но может существенно увеличить их геологическую эффективность.

При объединении методов в единый комплекс стремятся достичь двух целей: уменьшить неоднозначность интерпретации и, по возможности, решить все задачи, возникающие на данной стадии работ. Для этого в комплекс включают ряд методов, подобранных по следующим принципам: а) каждый метод решает одну из задач; б) некоторая задача решается лишь сочетанием ряда методов; в) задача решается несколькими методами, но каждым из них недостаточно уверенно, а в результате применения нескольких методов обеспечивается необходимая надежность ее решения. При выборе комплекса приходится учитывать экономическую эффективность, т.е. искать такое решение геологических задач, которое, обеспечивая надежность их решения, требует минимально возможных затрат времени и средств.

8.1.1 Типовые и рациональные комплексы

Различают типовые и рациональные комплексы. **Типовым** называют комплекс геофизических методов, применение которого целесообразно на данной стадии работ при изучении объектов определенного типа. При выборе типового комплекса методов обычно используют инструкции, методические пособия, руководства, справочники, дающие общие сведения о методах без учета конкретных природных условий. В исследуемом районе такой комплекс может оказаться избыточным. Типовой комплекс может быть взят за основу при выборе рационального комплекса.

Рациональный комплекс — это экономически обоснованное сочетание методов, обеспечивающих надежное решение поставленных геологических задач в конкретных условиях изучаемого района. Рациональный комплекс предусматривает выбор методики работ (сети и точности наблюдений), последовательности применения методов, способов интерпретации и дальнейшего использования получаемых данных. Рациональный комплекс практически создается на основе аналогий или натурального моделирования. В первом случае используют уже имеющийся опыт работы на этой же территории или в аналогичных условиях. Во втором — проводят специальные опытно-методические работы избыточным набором методов на хорошо изученных эталонных участках.

В зависимости от решаемых задач различают комплексы широкого и узкого спектра действия или многоцелевые и специализированные Комплексы первого типа предназначены для решения широкого круга геологических задач при съемке, прогнозе и поисках месторождений всех видов полезных ископаемых на конкретной территории. Комплексы второго типа используют для решения частных геологических задач, поисков месторождений определенного типа, изучения детализационных участков.

8.1.2 Технологические комплексы

При проведении работ с использованием самолетов, судов, иногда автомашин, при измерениях в скважинах используют технологические комплексы геофизических методов. Они позволяют проводить одновременно измерения нескольких геофизических параметров. Технологические комплексы отличает общность технических средств измерения и методики проведения работ. Такие комплексы обеспечивают высокую производительность, точную взаимную привязку разных параметров, позволяют перейти к цифровой регистрации данных с последующей обработкой их на ЭВМ.

Например, аэрогеофизическая станция «СКАТ-77» имеет каналы для регистрации магнитного поля ДТ, естественной гамма-активности, напряженности поля СДВ-радиостанций. Морские геофизические работы можно проводить с использованием эхолотного промера глубин, непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП), морской магнито- и гравиметрии и в благоприятных условиях — электроразведки. Комплекс для работ на мелководных акваториях (реках, озерах), созданный на кафедре сейсмометрии геологического факультета МГУ, включает НСП, непрерывные электрические зондирования методом ВЭЗ, регистрацию разностей потенциалов естественного электрического поля (ЕП) по трем взаимно перпендикулярным направлениям, резистивиметрию (измерение $\rho_{уд}$ воды) и термометрию. Информацию записывают в цифровом коде на магнитную ленту для последующего ввода в ЭВМ и в аналоговом виде (графически) для оперативного анализа данных. При наземной съемке используют автомобильные станции, позволяющие регистрировать в движении магнитное поле, радиоактивность, параметры высокочастотного электромагнитного поля.

Наблюдения на одном уровне (горизонте) называют комплексированием по горизонтали. Сочетание наземных и подземных, или наземных, аэро- и космических наблюдений называют комплексированием по вертикали. Последний вид работ все шире используют в практике геологических исследований.

8.1.3 Формы регистрации геофизических данных

Полевые геофизические работы, как правило, проводят по правильной геометрической сети на площади или с постоянным шагом по профилям. Их результаты представляют в количественной форме, т.е. набором чисел в отличие от геологических работ, данные которых часто качественные, т.е. в виде описаний и зарисовок. Кроме того, геологические съемки проводят по выборочным криволинейным маршрутам или отдельным точкам. Измерения, выполненные с помощью приборов, объективны, формализованы, практически готовы для хранения в банках данных в вычислительных центрах. Однако аналоговая форма записи (графики, планы и карты, полевые журналы) неудобны для ввода в ЭВМ. Поэтому многие геофизические станции в настоящее время оборудуют устройствами для полевой магнитной записи результатов измерений в цифровом коде, пригодной для передачи данных в ЭВМ, минуя операции оцифровки. В первую очередь на цифровую запись переведены почти 100 % полевых сейсмических станций, большинство электроразведочных, аэрогеофизических, каротажных и морских геофизических станций.

8.2 Задачи комплексирования геофизических методов

8.2.1 Стадийность и задачи геологоразведочных работ

Геофизические исследования, включенные в геологоразведочный процесс, предназначены для решения конкретных геологических задач. В большинстве случаев эти задачи так или иначе связаны с поисками и разведкой месторождений полезных ископаемых, которые осуществляют по единой последовательной схеме геологоразведочных работ. В соответствии со стадийностью работ изменяются геологические задачи, комплексы геофизических методов и характер получаемой геолого-геофизической информации. Например, при региональных исследованиях рудоперспективных территорий в масштабе 1:1000000 объектом изучения может служить рудная провинция, для исследований масштаба 1:200000 — 1:100000 — рудный пояс, для геологосъемочных работ масштаба 1:50000 — 1:25000 — рудный район, на подстадии поисков — рудное поле, для поисково-оценочных работ — месторождение, для разведочных работ — отдельные рудные тела. Смена объекта изучения влияет на выбор геофизических методов.

8.2.2 Физико-геологические модели

Существенную помощь для анализа условий применимости и эффективности геофизических методов оказывает создание физико-геологической модели (ФГМ) изучаемой геологической среды. Понятие физико-геологической модели играет большую роль в теории комплексирования. Под физико-геологической моделью понимают совокупность абстрактных возмущающих тел, обобщенные размеры, форма, физические свойства и взаимоотношение которых с той или иной степенью детальности аппроксимируют реальную геологическую обстановку.

Физико-геологические модели должны отражать представление о целой группе геологических объектов данного класса, например об определенном геологическом типе месторождений. Главная цель создания ФГМ — математическое моделирование ситуации, т.е. расчет различных физических полей. Составляющие ФГМ объекты должны иметь относительно простые геометрические формы, а все параметры модели — пределы допустимых изменений. Это необходимо для расчета полей при различных значениях физических и геометрических параметров и получения предельных условий надежной регистрации объектов.

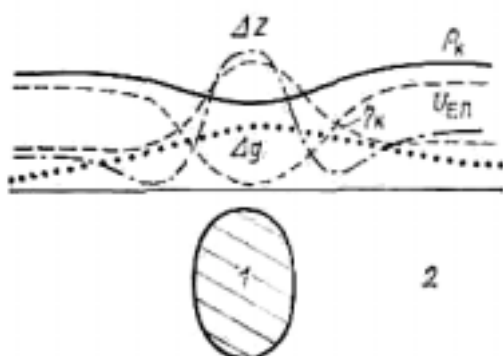


Рис.8.2. Физико-геологическая модель линзы сульфидных руд.

- 1 — рудное тело;
- 2 — вмещающие породы

Простейшая физико-геологическая модель рудного тела приведена на рис.8.2. Рудное тело, сложенное массивными сульфидами, залегает в однородной по свойствам вмещающей среде. Форма тела — шар или эллипсоид. Заданы физические свойства тела и вмещающей среды (ρ , η , σ , κ и др.). Изменяя глубину залегания или размеры тела, можно рассчитать реакцию физических полей на эти изменения и определить наиболее подходящий набор геофизических методов для различных физических свойств и размеров тела. Реальные ФГМ могут иметь и более сложный вид. В верхней части разреза можно поместить слой

рыхлых отложений, для каждого физического поля задать уровень помех, задать более сложное блоковое строение вмещающей среде и самому объекту.

8.2.3 Условия эффективного применения геофизических методов

Условиями, определяющими успех применения конкретного геофизического метода для решения геологической задачи, являются: контрастность физических свойств искомых геологических объектов и вмещающей среды, относительные геометрические размеры вызывающих аномалии объектов и уровень помех геологического и негеологического происхождения. В простейшем случае представления о физических свойствах объекта и вмещающей среды сводятся к значению их средних значений. Более полную характеристику дают как средние значения, так и их дисперсия. С этой целью по результатам массовых измерений свойств определенных комплексов пород строят вариационные кривые.

Понятия о дифференциации (контрастности) физических свойств изменяются в зависимости от метода и решаемых геологических задач. Например, для гравиразведки контрастность свойств оценивают значением избыточной плотности, а для электроразведки — отношением удельных сопротивлений. Для поисков рудных тел гравиразведкой необходимы перепады плотности около $0,3\text{—}0,4\text{ г/см}^3$, а для решения структурных задач достаточны $0,1\text{ г/см}^3$, что связано с размерами разведываемых объектов. Для структурной электроразведки методом ВЭЗ достаточно отношения удельных сопротивлений порядка $2\text{—}5$, а для поисков рудных тел методом индуктивного профилирования перепад сопротивлений должен составлять $2\text{—}3$ порядка и более.

Кроме контрастности средних значений свойств, важное значение имеет дисперсия. При одинаковой разнице средних значений породы на рис. 8.3 (а) разделяются более надежно, чем на рис. 8.3 (б).

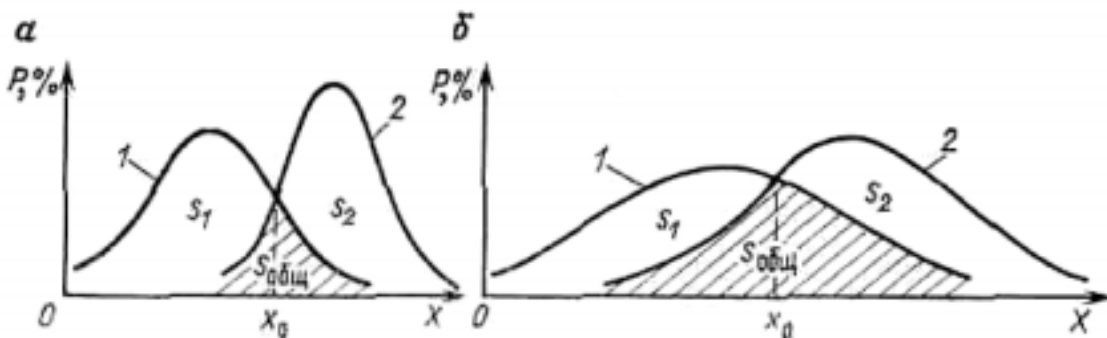


Рис.8.3 Вариационные кривые физических свойств пород двух типов (1, 2) при разной дисперсии свойств (а, б)

Удобной количественной мерой различия свойств является надежность разделения $\gamma = 1 - q$, где q — отношение площади перекрытия вариационных кривых к сумме полных площадей под вариационными кривыми. Надежными для различия свойств считают значения γ от 75 до 100%.

Величины аномалий от объектов, кроме контрастностей физических свойств, определяются геометрическими соотношениями размеров объекта и глубины его залегания. Например, в электроразведке методом ВЭЗ надежное определение слоя возможно, если отношение его мощности h к глубине залегания H удовлетворяет условию $h/H > 2\text{—}10$. Слой практически не выделяется, если $h/H < 0,1$. Предельная глубина залегания изометричных тел, определяемая разными методами геофизики, зависит от отношения радиуса тела R к глубине H . Например, величины аномалий над сферой пропорциональны для Δg — R^3/H^2 , для ΔZ — R^3/H^3 , для U_{EP} — R^2/H^2 , поэтому скорость убывания поля с удалением от источника, а следовательно, и глубина исследования этими методами будут различными.

Еще одним важным условием применимости геофизических методов является уровень помех. Различают помехи геологического и негеологического происхождения. К первым относят влияние перекрывающих и подстилающих пород, рельефа местности, неоднородности свойств вмещающих пород и т. д. Для электроразведки наибольшее значение имеют рыхлые проводящие отложения в верхней части разреза и слои высокого сопротивления (каменная соль, ангидрит, межпластовые интрузии) на глубине, так называемые экраны. Экраны высокого сопротивления являются препятствием для методов постоянного тока, но проницаемы для переменного тока. Подстилающие породы оказывают заметное влияние на данные грави- и магниторазведки. Рельеф влияет на результаты электроразведки и очень сильно усложняет анализ данных гравиразведки. Толщи многолетнемерзлых пород, распространенные во многих районах нашей страны, создают трудности при проведении электро- и сейсморазведки (устройствозаземлений, возбуждение взрывами).

К помехам негеологического происхождения относят временные вариации геофизических полей. В гравиразведке такие вариации вызываются относительными перемещениями Солнца и Луны и относятся к предсказуемым; в магниторазведке — солнечной активностью и ее воздействием на ионосферу Земли, они непредсказуемы и требуют учета. Электромагнитные поля характеризуются вариациями теллурических токов, связанных с солнечной активностью, и блуждающих токов техногенного происхождения, а также вариациями полей грозových разрядов. Для большинства методов электроразведки это поля-помехи, требующие средств для их подавления или учета. Однако в некоторых методах электроразведки используют физические поля помех с целью получения полезной геологической информации. Приведенные факты подчеркивают относительность понятия помехи.

В геофизике все более заметными становятся помехи, порождаемые деятельностью человека. Сейсмическая вибрация, блуждающие электрические токи, железные предметы в земле и на ее поверхности, подземные горные выработки, техногенные температурные аномалии нередко оказывают заметное влияние на качество геофизических измерений, а в некоторых случаях делают такие работы невозможными. Борьбу с помехами ведут либо методическими приемами, либо аппаратурными средствами.

К помехам также относят и погрешности измерений. Их делят на три категории: систематические, случайные и грубые (промахи). Систематические погрешности обусловлены недостатками конструкции прибора или несовершенной методикой измерений и могут быть выявлены путем периодических проверок и устранены введением поправок (например, поправкой за сползание нуля-пункта прибора в грави- и магниторазведке). На случайные погрешности влияет множество причин, учесть и устранить которые не представляется возможным. Но влияние случайных погрешностей можно уменьшить статистическими приемами обработки. Грубые погрешности возникают при нарушении условий измерений или ошибок оператора (например, взятие отсчета не по той шкале прибора). Для борьбы с такими погрешностями необходимо на месте анализировать измеряемые значения и при наличии резкого разброса в показаниях проводить повторные замеры.

8.2.4 Погрешности съемок

Общая погрешность геофизической съемки зависит от точности измерений и природной дисперсии измеряемых полей. Аппаратурно-методическую точность съемки оценивают с помощью контрольных измерений по формуле средней квадратической погрешности:

$$\sigma_c = \sqrt{\sum (A_i - A_{cp})^2 / n} , \quad (8.1)$$

где $A_{cp} = (A_i + A_{i \text{ контр}}) / 2$. Квадрат этой величины называют дисперсией съемки σ_c^2 . Общую дисперсию геофизических полей можно определить по измерениям в фоновой области, где заведомо отсутствуют аномалии, по формуле

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sum (A_i - A_{cp})^2 / n, \quad (8.2)$$

где $A_{cp} = \sum A_i / n$. Общая дисперсия съемки

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{\text{геол}}^2. \quad (8.3)$$

Путем решения прямых задач для физико-геологической модели объекта при наиболее неблагоприятных значениях свойств и размеров определяют минимальную интенсивность аномалий. Ее можно определить по измеренным полям на хорошо изученном участке. Оцененные таким образом полезные аномалии должны в 1—3 раза и более превышать **стандарт общей дисперсии поля** $\sigma_{\text{общ}}^2$. Если отношение аномалия/помеха $\mu_I = A_{\text{max}} / \sigma > 3$, то объект выделяется надежно. При $1 < \mu_I < 3$ аномалию называют слабой. Она может быть выявлена статистически, если методика съемки позволяет пересечь объект несколькими профилями и несколькими точками на каждом профиле. В этом случае удобнее использовать другой показатель — **энергетическое отношение аномалия/помеха** ρ_{an} , которое для некоррелированной помехи

$$\rho_{an} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i^2}{\sigma^2} = \frac{\bar{A}^2 \cdot m}{\sigma^2}, \quad (8.4)$$

где \bar{A}^2 — средний квадрат амплитуды аномалии; m — число аномальных значений. Из сопоставления формул для μ_I и ρ_{an} видно, что слабая по μ_I аномалия может быть надежно выявлена по ρ_{an} , если число точек съемочной сети m , попадающих в ее пределы, достаточно велико.

Соотношение σ_c^2 и $\sigma_{\text{геол}}^2$ в формуле (8.3) представляет большой интерес для выбора точности съемки. Если основной вклад в $\sigma_{\text{общ}}^2$ вносят ошибки съемки, то повышение точности измерений повысит общую точность и информативность геофизических работ. Если же преобладающий вклад вносят геологические помехи ($\sigma_{\text{геол}}^2 > \sigma_c^2$), то повышение точности измерений лишь увеличит ее стоимость, но не улучшит выявление аномалий.

8.2.5 Способы оценки эффективности геофизических методов

Физико-геологическая модель, кроме оценки применимости отдельных методов, может быть использована для обоснования рационального комплекса методов, методики проведения работ и выбора поисковых критериев выделения объекта по каждому геофизическому методу. Обоснование рационального комплекса методов проводят путем оценки геологической и экономической (стоимость, производительность) эффективности каждого метода из числа тех, применимость которых для решения данной задачи не вызывает сомнений. Как правило, таких методов оказывается избыточное число.

Одним из способов оценки эффективности методов является расчет нормированных аномалий, или показателей контрастности. Показатель контрастности характеризует отношение аномалия/помеха и, следовательно, надежность выявления аномалии. При равной контрастности двух сопоставляемых методов предпочтение следует отдать методу, дающему более широкие аномалии.

Сопоставление методов можно проводить по величине произведения амплитуды на ширину аномалии. При равенстве этих величин для двух сопоставляемых методов приходится решать, что выгоднее — проводить более точные наблюдения по редкой

сети или получать более контрастные аномалии, но обеспечивать большую детальность наблюдений. Универсальная оценка эффективности метода может быть получена на основе энергетического отношения сигнал/помеха. Существует и ряд других, более сложных способов оценки эффективности геофизических методов.

8.2.6 Поисковые критерии

Поисковыми критериями называют характерные и устойчивые, т.е. обнаруживаемые во всех или в большинстве случаев, особенности геофизических полей над искомыми объектами. Для простой ФГМ (см. рис.8.2) поисковыми критериями являются максимальные значения полей ΔZ , Δg , η_k и минимумы ρ_k и U_{EP} . В более сложных условиях для поисковых критериев устанавливают один или два (нижний и верхний) предела. Например, над промышленными скоплениями руд значения η_k должны быть не менее 5 %, отрицательные аномалии ЕП не менее -150 мВ и т.п. Более сложным поисковым критерием является совпадение нескольких аномалий (η_k , U_{EP} , ΔZ и т.д.), причем каждая из аномалий должна превышать по амплитуде определенный уровень или попадать в установленные пределы.

Если на исследуемой территории имеется ряд известных рудных объектов и над ними зафиксированы аномалии геофизических полей, то появляется возможность оценить надежность поисковых критериев. Наиболее надежными из них считают те, которые отмечаются над всеми промышленными объектами и отсутствуют над непромышленными. Менее надежны те критерии, которые отмечаются лишь над частью объектов и над некоторыми непромышленными залежами. В рациональный комплекс включают методы, обладающие максимальной эффективностью и дающие надежные поисковые критерии.

Для выбранных методов планируют методику работ, т.е. последовательность их применения, сеть наблюдений, точность измерений, принципы обработки и интерпретации. Как правило, происходит разделение методов на основные и детализационные. Первые, более производительные и универсальные, применяют на всей площади, а вторые, более дорогостоящие и специализированные, — для проверки и разбраковки выявленных аномалий.

Выбор сети наблюдений осуществляют исходя из надежности съемки. Она должна быть такой, чтобы все представляющие промышленный интерес рудные тела, т.е. такие скопления полезных ископаемых, которые экономически целесообразно разрабатывать при достигнутом уровне технологии с учетом экономической освоенности конкретного района, могли быть выявлены съемкой с вероятностью 95—100 %.

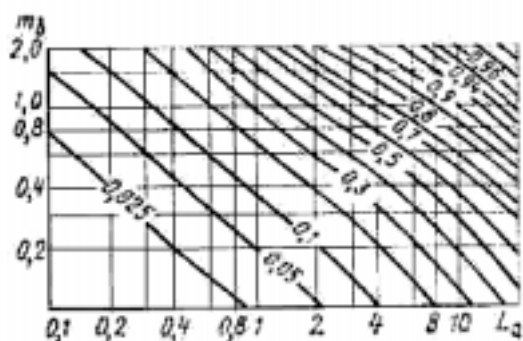


Рис.8.4 Номограмма для определения вероятности подсечения аномалии хотя бы двумя точками наблюдения при произвольном простирании объекта

Шифр кривых — вероятность подсечения

На рис.8.4 приведена номограмма, составленная для оценки вероятности обнаружения произвольно ориентированной аномалии, имеющей форму эллипсоида с длиной L и шириной m , поисковой сетью с расстоянием между профилями a и шагом по профилю b . По осям номограммы отложены $L_a = L/a$ и $m_b = m/b$. Эта номограмма составлена для произвольной ориентации тела относительно сети наблюдений. При извест-

ном и выдержанном простирании тел сеть наблюдений может быть более редкой. Задавшись минимально допустимыми размерами тел и приемлемой вероятностью их обнаружения, можно оценить L_a и m_b , а по ним a и b . Наоборот, задавая несколько пар значений a и b , можно определить вероятности P обнаружения тел и выбрать оптимальную поисковую сеть. Малое значение P говорит о недостаточной надежности поисковой сети.

8.3 Комплексная обработка геофизических данных

В настоящее время количество информации, извлекаемой из геофизических данных, по общему признанию, довольно невелико. Причинами этого являются следующие обстоятельства: часть информации не представляет практического интереса для решения конкретных геологических задач; сведения, получаемые по данным геофизики, не находят объяснения в свете имеющихся геологических концепций и отвергаются как «неудобные»; часть информации скрыта (не визуализирована), и для ее извлечения нужна трудоемкая обработка, не всегда доступная из-за нехватки времени, недостаточной квалификации персонала; во многих производственных организациях на обработку и интерпретацию материалов отводится существенно меньше времени, чем на полевые работы, а глубина осмысливания материалов контролируется в меньшей степени, чем качество их получения в поле.

В повышении качества интерпретации геофизических материалов скрыты большие резервы роста эффективности геологоразведочных работ в целом. Качество обработки должно повышаться в основном за счет автоматизации обработки на ЭВМ, создания более экономичных и геологически эффективных алгоритмов обработки. При этом наибольшая однозначность и надежность геологического истолкования данных достигаются при комплексной обработке.

В процессе интерпретации можно выделить два взаимосвязанных, но различающихся направления — качественной и количественной интерпретации. Основная цель качественной интерпретации — установление положения и природы аномалий, а количественной — получение количественных оценок размеров объекта, глубины его залегания, физических свойств.

8.3.1 Комплексная обработка при качественной интерпретации

Приемы комплексной интерпретации для качественного истолкования геологических и геофизических данных разработаны достаточно хорошо. При этом основными задачами являются: районирование территории по комплексу данных; выделение местоположения аномалий и аномальных участков; объяснение их геологической природы. Обычно используют приемы визуального анализа полей и формализованные процедуры, допускающие использование ЭВМ. Основным принцип качественного истолкования геофизических данных — *принцип аналогии* — состоит из обучения на эталонном участке с известным строением и анализа аналогичного по строению, но неизученного участка. При этом широко используют приемы распознавания образов.

Признаки полей. При качественной интерпретации основными понятиями являются признаки полей. Признаком называют чаще количественный, реже качественный, но кодированный показатель поведения поля в данной точке. Количественный признак — амплитуда геофизического поля, качественный — например, знак поля: положительным значением поля соответствует код +1, отрицательным — код —1, а близким к нулю — код 0. Такой качественный признак, как сложность геологического строения, оцениваемый по карте, может быть закодирован, например, кодом 0 — простое строение, 1 — сложное; 2 — очень сложное строение.

Этот признак можно определить полуколичественно, если разделить геологическую карту на клетки размером, например, 2х2 см и подсчитать число геологических комплексов, попадающих на каждую из них или, как принято говорить, в «окно». Однородная толща получит значение признака 0, геологический контакт в пределах «окна» даст код 1, сочленение трех комплексов получит код 2. В таком скользящем по карте «окне» можно подсчитать интенсивность проявления магматизма, разломной тектоники, направленность разломов и т.п.

Различают признаки первичные, например, амплитуда геофизического поля, непосредственно измеренная в определенной точке, и вторичные (рассчитываемые по первичным), например, среднее значение поля в «окне», простирание изолиний, дисперсия поля или просто разница максимального и минимального значений поля в «окне». Полезными вторичными признаками являются коэффициенты линейной корреляции r_{xy} двух геофизических полей X и Y , рассчитанные в скользящем «окне» по формуле

$$r_{xy} = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right] / (n\sigma_X\sigma_Y), \quad (8.5)$$

где $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$, $\sigma_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n}$;

формулы для Y и σ_Y аналогичны. Физический смысл коэффициента корреляции сводится к оценке связей между полями. Коэффициент корреляции r_{xy} может принимать значения от -1 до 1 . Значения коэффициента корреляции $0,7 < r_{xy} < 1$ говорят о том, что связи между полями не случайны и на данном участке скорее всего обусловлены одним общим источником (процессом или объектом). Отсутствие корреляции ($r_{xy} \approx 0$) говорит о том, что изменения полей вызваны разными и независимыми причинами. Например, массивное рудное тело увеличивает значения η_k и понижает значения ρ_k , измеренные над ним на поверхности земли, тогда как вкрапленные руды, увеличивая η_k , практически не изменяют ρ_k , и коэффициенты корреляции в этих двух случаях будут, естественно, различаться. Высокие диагностические качества на рудоперспективных площадях проявляет коэффициент корреляции магнитного поля и ВП, позволяя выделять рудные аномалии и зоны гидротермально-метасоматического происхождения.

Расчет вторичных признаков позволяет намного увеличить общее число признаков для последующей оценки их эффективности и выбора наиболее информативных из них. Большое число признаков вручную изучить трудно, поэтому такие приемы предполагают широкое использование ЭВМ.

Функция комплексного показателя. Для визуального анализа информации необходимо из многих признаков получить один результат, надежно выделяющий интересующий объект. Наиболее просто этот процесс можно показать на примере расчета функции комплексного показателя (ФКП), предложенной Г.С. Вахромеевым. Расчет ФКП основан на суммировании признаков геофизических полей, осуществляемом таким образом, чтобы максимально усилить полезный эффект от искомого объекта. Например, для ФГМ рудного объекта (см. рис. 8.2) характерны повышенные значения Δg , ΔZ и η_k и пониженные значения U_{EP} и ρ_k . Чтобы усилить эффект всех этих полей, надо взять первые три признака со знаком «плюс», а два вторых — со знаком «минус». Для сложения разных полей используемые параметры необходимо сначала перевести в единую безразмерную форму путем их пересчета в коэффициенты контрастности γ_{ki} , [см. формулу (8.3)], где k — номер признака или метода; i — номер точки наблюдения. Тогда ФКП можно вычислить с помощью весового суммирования:

$$\theta_i = \sum_{k=1}^M C_k \gamma_{ki} - \sum_{k=M+1}^N C_k \gamma_{ki}, \quad (8.6)$$

где знаки «плюс» и «минус» выбраны так, как указывалось выше («плюс» для Δg , ΔZ и η_k и «минус» для $U_{EП}$ и ρ_k).

Весовые коэффициенты C_k оценивают следующим образом. Сначала на основе интуиции или опыта назначают некоторые априорные весовые коэффициенты. Например, после расчета у оказалось, что $U_{EП}$ дает большую по амплитуде аномалию, чем ρ_k , значит, можно взять $C_{EП} = 2$, а $C_\rho = 1$. Аналогично выбирают, например, $C_\eta = 2$, а $C_g = C_z = 1,5$. Далее C_k пересчитывают так, чтобы $\sum_{k=1}^N C_k^2 = 1$. В этом случае функция θ будет иметь единичную дисперсию, и значения $\theta > 3$ можно рассматривать как достоверные аномалии, а $\theta = 1—3$ считать слабыми аномалиями.

Если изменяется задача поиска, то изменяется и набор признаков и их весовые коэффициенты. Например, для поисков вкрапленных руд наибольший весовой коэффициент должен быть у метода ВП.

Разделение объекте на два класса. Часто задача поиска рудных тел ставится как задача разделения всех аномалий на два класса: рудные и безрудные. Для этого можно использовать различные приемы распознавания образов, например, дискриминантный анализ. Поясним этот метод на примере двух признаков. Процесс разделения аномалий происходит в два этапа — обучения и анализа. На первом этапе на площади работ выбирают заведомо рудный и безрудный участки-эталоны. На них по каждому из анализированных признаков геофизических полей строят гистограммы распределения и оценивают степень разделения гистограмм для рудного и безрудного участков или информативность признаков.

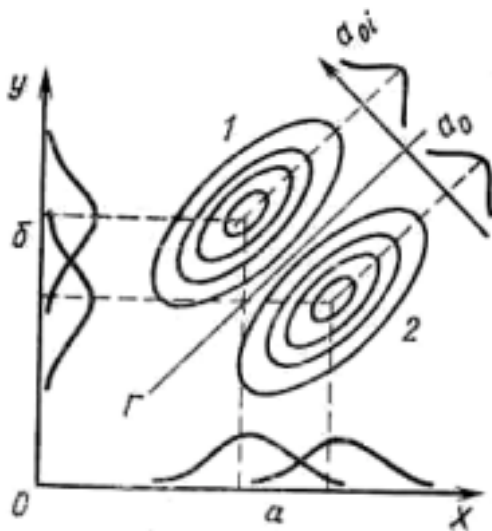


Рис. 8.5. Разделение аномалий на рудный (1) и безрудный (2) классы по двум признакам X и Y .

a — разделение только по X ; $б$ — разделение только по Y ; Γ — линия границы наилучшего разделения по X и Y

XOY облака точек для участков 1 и 2 в центре рис. 8.5 удается разделить линией Γ , уравнение которой

$$Y = a_0 - a_1 X. \quad (8.7)$$

Эта линия или граница позволяет решить задачу об отнесении объектов к рудному или безрудному классу. Если сочетание признаков X и Y для проверяемой аномалии

дает точку выше границы, то объект рудный, а если ниже — безрудный. Вычислением коэффициентов a_0 и a_1 заканчивается этап обучения.

На этапе анализа для всех проверяемых аномалий по значениям признаков X и Y положение точки относительно линии либо определяют графически, либо рассчитывают величину $a_{0i} = Y_i - a_i X_i$, которую сравнивают с a_0 из формулы (8.7). Очевидно, что при $a_{0i} > a_0$ (эталонного) точка окажется выше границы, т.е. будет отнесена к рудному классу, а при $a_{0i} < a_0$ окажется ниже границы и будет отнесена к безрудному классу.

При использовании большего числа признаков ситуацию трудно изобразить графически, но ЭВМ и в таком многомерном пространстве на этапе обучения найдет некую гиперплоскость, разделяющую точки классов 1 и 2. Затем, на этапе анализа, уравнение этой гиперплоскости используют для разбраковки аномалий на два класса.

Разделение полей для целей геокартирования. При решении задачи геокартирования по комплексу признаков возникает необходимость разделения полей не на два, а на большее число классов, соизмеримое с числом различных геологических комплексов на территории съемки. Алгоритм распознавания образов при этом также работает в два этапа: обучения на эталонах и распознавания. В период обучения каждый геологический комплекс характеризуется своим облаком точек в многомерном пространстве признаков, причем облака для разных комплексов, если не разделяются достаточно надежно, подлежат объединению. Для каждого облака оценивают координаты центра (средние значения признаков) и радиус (дисперсию). Совокупность признаков для каждой точки наблюдения дает некоторую точку в многомерном пространстве признаков. Алгоритм распознавания оценивает, к какому облаку-эталону можно отнести эту точку (т.е. к породам какого класса). Если точка не может быть уверенно отнесена ни к одному эталонному классу, то она не подлежит классификации.

Подобный алгоритм требует довольно большого объема вычислений даже с использованием современных ЭВМ. Его работу можно сделать более производительной и надежной, если сначала разделить площадь по комплексу признаков на кусочно-однородные участки. В их пределах средние значения и дисперсия поля сохраняются постоянными, но зато заметно изменяются на границах участков. Далее для каждого такого однородного участка по средним значениям и дисперсии полей проводят опознавание геологической принадлежности этих участков путем сопоставления с эталонами, как описано выше. Использование вместо отдельных точек целых участков заметно повышает надежность распознавания, так как признаки, участвующие в распознавании, становятся более устойчивыми.

Принципы работы алгоритмов распознавания образов описаны в самых общих чертах. На практике применяют несколько десятков алгоритмов распознавания, основанных на рассмотренных или несколько иных принципах. Несильно различаясь по сути, они весьма разнообразны в деталях работы и, как правило, значительно сложнее изложенной выше принципиальной схемы.

8.3.2 Комплексная обработка при количественной интерпретации

Количественная комплексная интерпретация разработана в меньшей степени, чем качественная. Существует несколько подходов, находящих практическое применение.

Совместное решение обратных задач для нескольких геофизических полей. Наиболее разработаны приемы совместной количественной интерпретации для гравитационных и магнитных полей. Сначала для каждого геофизического метода решают обратные задачи. Для этого можно использовать методы касательных и характерных точек, палетки теоретических кривых, или алгоритм подбора. Его суть заключена в следующем. По виду геофизической аномалии делают предположение о форме,

размерах, глубине залегания и физических свойствах вызывающего аномалию тела. По этим данным на ЭВМ решают прямую задачу и теоретически рассчитанное поле сравнивают с экспериментальным. Для уменьшения несовпадения этих полей все параметры модели несколько изменяют, причем направление изменений и их величину определяет ЭВМ. Процесс подбора заканчивают, когда различие полей становится меньше заданного предела или больше не изменяется.

Модели, полученные независимо по двум разным полям, затем начинают изменять совместно, чтобы получить единую форму объекта, удовлетворяющую обоим полям. Такое одновременное совмещение модельных полей с экспериментальными резко уменьшает количественную неоднозначность решения.

Оценка глубины залегания поверхности фундамента по комплексу геофизических полей. В платформенных условиях граница раздела кристаллического фундамента и осадочного чехла характеризуется большим контрастом физических свойств. Это позволяет оценивать глубину залегания фундамента по комплексу полей методом многомерной линейной регрессии. Работа алгоритма распадается на два этапа—обучение и использование. Формула регрессии имеет вид

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i \quad (8.8)$$

где X_i — признаки геофизических полей; — свободный член; a_i — регрессионные коэффициенты; Y — результат, в данном случае глубина залегания фундамента. Коэффициенты a_i , a_0 и множественный коэффициент корреляции r_{k+1} , характеризующий тесноту линейной связи Y с X_i , определяют по формулам

$$a_0 = \bar{Y} - \sum_{i=1}^k a_i \bar{X}_i, \quad a_i = b_i \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_i}}, \quad (8.9)$$

$$r_{k+1} = \sqrt{\sum_{i=1}^k b_i r_{iY}},$$

где $\bar{X}, \bar{Y}, \sigma_X, \sigma_Y$ определяют по формуле (8.5); b_i — вспомогательные коэффициенты, получаемые в ходе решения системы линейных уравнений множественной регрессии; r_{iY} — выборочные коэффициенты корреляции X_i с Y .

Если в ряде точек известна глубина залегания фундамента, то по значениям геофизических признаков в этих точках методом наименьших квадратов оценивают коэффициенты a_0 , a_i и затем вычисляют множественный коэффициент корреляции r_{k+1} . Если значения r_{k+1} достигают 0,7—0,9, то корреляционная связь достаточно устойчива и для расчета глубины залегания фундамента можно использовать формулу (8.8).

Оценка содержаний полезных ископаемых по комплексу признаков. Для решения подобных задач также используют уравнение регрессии, однако в качестве Y на этапе обучения берут содержание полезного ископаемого по данным опробования. Для геофизических исследований скважин при высоких содержаниях рудных минералов коэффициенты корреляции могут достигать 0,9—0,96, т.е. оценка содержаний по данным ГИС оказывается весьма надежной. В благоприятных условиях и по данным наземной геофизики можно получить приемлемые оценки содержаний или запасов руд в зависимости от используемых геофизических признаков и материала обучения.

8.3.3 Автоматизированные системы комплексной обработки данных

Опыт использования приемов комплексной интерпретации данных ряда методов показывает высокую эффективность решения многих геологических задач, недостижимую с помощью одного метода или при раздельном использовании каждого метода. Но обилие перерабатываемой информации делает невозможным (за редкими исключениями) ручную реализацию алгоритмов без применения ЭВМ. Огромные объемы подготовки данных для ЭВМ и трудоемкость этих операций позволяют считать, что процесс комплексной интерпретации в промышленных масштабах невозможен без создания банков данных (БД) и автоматизированных систем обработки данных (АСОД) на ЭВМ.

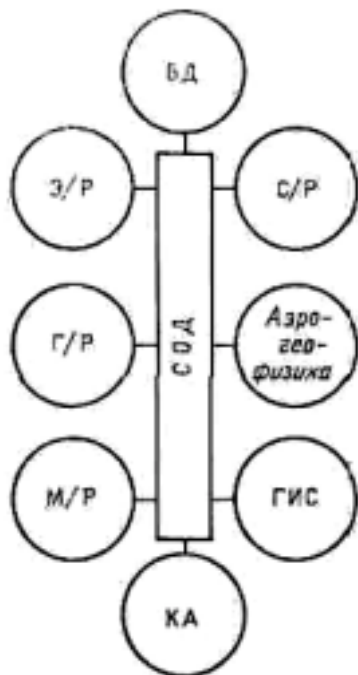


Рис.8.6 Типовая структура АСОД-геофизика

В банке данных накапливается и хранится на магнитных лентах или дисках информация по геологическим, геохимическим и геофизическим исследованиям в регионе. Автоматизированная система позволяет выбрать из БД всю информацию по конкретному участку или ее определенную часть и подвергнуть ее обработке. Типовая структура АСОД-геофизика приведена на рис. 8.6. Она состоит из банка данных (БД) и большого числа программ обработки, объединенных в несколько систем, взаимодействующих между собой с помощью центральной и важнейшей системы оперирования данными (СОД). СОД позволяет выбрать из банка данных информацию, относящуюся к определенной площади, масштабу или методу, преобразовать ее по заданному алгоритму, передать пометодным системам обработки, записать результаты в БД, выдать ее на печать или графопостроитель.

Системы программ по отдельным методам — сейсмо- (С/Р), электро- (Э/Р), грави- (Г/Р) и магниторазведки (М/Р) получают данные из БД, подготовленные с помощью СОД для работы с конкретными алгоритмами пометодной интерпретации. Системы для отдельных видов исследования — скважинных (ГИС), аэрогеофизических — позволяют вести обработку и качественную и количественную интерпретацию данных своих технологических комплексов. Система программ для комплексного анализа (КА) позволяет с помощью СОД объединить данные разных методов в единый массив, провести их комплексную обработку в соответствии с графом обработки (заданием), включающим определенную последовательность операций, выполняемых ЭВМ автоматически или же с контролем промежуточных результатов после отдельных этапов обработчиком, принимающим решения о завершении, продолжении или изменении операций обработки. При наличии графопостроителей результаты расчетов могут быть представлены графически в черно-белом или цветном изображении, в виде графиков, карт, разрезов или в трехмерном изображении в любой нужной проекции.