

## Общие сведения о теории надежности геолого-исследовательских систем

В.А. Цыганов

(автореферат докторской диссертации, защищена в 1994 г.)

### Краткое содержание

Предмет, целевое назначение и задачи теории надежности геолого-исследовательских систем. Понятия системы, качества, надежности, отказов, объектов поисков. Количественные критерии качества и надежности. Принципы построения классификации отказов. Отказы вещественно-индикационного, ландшафтно-геологического, технико-метрологического, геолого-интерпретационного и заверочного модулей. Понятие о резервировании малонадежных элементов геолого-исследовательских систем, виды и приемы резервирования. Виды и этапы оценки надежности. Количественные оценки качества и надежности систем.

### Предмет, целевое назначение и задачи теории надежности геолого-исследовательских систем.

Теория надежности геолого-исследовательских систем является специфическим прикладным научным направлением из области геологических наук, ориентированным на исследование проблем качества и надежности геологических исследований с позиций специального системного выявления и анализа в них любых событий и явлений, приводящих к невозможности их полного использования по назначению, т.е. к потере качества, и, далее, на разработку целевых геологических систем и технологий, характеризующихся предельной, для конкретного времени, эффективностью, научностью и безотказностью.

Соответственно **предметом** исследований для теории надежности геолого-исследовательских систем являются сами эти системы, а **назначением** – разработка целевых высоконадежных исследовательских технологий на основе выявления и в них малонадежных элементов и разработки методов повышения их качества и надежности.

Тогда конкретными **задачами** рассматриваемого направления являются:

- 1) Определение основных понятий теории надежности: геолого-исследовательская система, геолого-поисковая система, качество и надежность систем, отказ системы и элементов, резервирование малонадежных элементов системы.
- 2) Разработка общих принципов количественной оценки эффективности или результативности геологических работ с позиций вероятностно-статистического подхода, количественных критериев качества и надежности геолого-исследовательских систем.
- 3) Разработка методики выделения отказов геологических методов, геолого-исследовательских технологий в различных их элементах и звеньях, принципов классификации и типизации отказов.
- 4) Разработка общих подходов к повышению надежности элементов и звеньев геолого-исследовательских систем с низкими количественными характеристиками качества и надежности (резервирование малонадежных элементов), разработка видов и способов резервирования.

Теория надежности геолого-исследовательских систем разработана и апробирована на примере геолого-поисковых работ ( , , и др.). Ее адаптация к геолого-исследовательским системам другого назначения осуществляется, но пока не завершена. Поэтому далее, по тексту настоящей главы приводятся положения, оценки, примеры, из раздела теории, связанного с геолого-поисковыми системами. В рамках общего контекста всей предлагаемой работы по геологической психологии такой подход представляется вполне оправданным и достаточным

### Понятия системы, качества, надежности, отказов, объектов поисков.

Можно называть **геолого-поисковой системой** некоторую совокупность конкретных знаний, методов, технологий, технических средств, организаторов и исполнителей работ, выступающую в виде единой организованной управляемой структуры, имеющей на входе геолого-экономические задачи, ресурсы, а на выходе - конкретные данные о распределении в недрах промышленно-ценных скоплений конкретного минерального сырья.

При системном подходе к анализу эффективности геологических поисков очевидным и не требующим доказательств является положение о том, что безотказность геолого-поисковой системы в целом определяется безотказностью работы всех без исключения ее элементов. Отмеченное положение предполагает возможным для анализа эффективности геологоразведочного процесса и его элементов использовать, соответствующим образом адаптированный, понятийный и количественный аппарат теории надежности систем.

Тогда под **качеством геолого-поисковой системы** или ее элементов можно понимать их способность к непропуску поисковых объектов независимо от изменчивости их индикационных свойств и особенностей строения вмещающей ландшафтно-геологической среды. В этом случае под **надежностью системы**

**и ее элементов** можно понимать их способность сохранять качество на заданный объем работы, или, в нашем случае, способность к непропуску поисковых объектов в пределах заданной территории независимо от изменчивости их индикационных свойств и особенностей строения вмещающей ландшафтно-геологической среды.

В теории надежности систем основным понятием, определяющим возможность исследования эффективности функционирования системы и ее составляющих, является понятие отказа - такого события, при котором происходит утрата системой или элементом свойств, позволяющих использовать их по назначению. При этом, как правило, сам факт отказа рассматривается как событие очевидное. В нашем случае, т.е. для систем геолого-поисковых и слагающих их элементов, отказ в большинстве случаев не является очевидным событием. Мы можем в результате проведения поисков не обнаружить поисковый объект, фактически существующий на участке, и не узнать об этом.

Следовательно, под **отказом** геолого-поисковой системы или ее элемента можно понимать любое действительное (т.е. установленное) или возможное (вероятное) событие, которое приводит (привело) или может привести, в конечном счете, к пропуску на площади работ хотя бы одного минимально-промышленного объекта поисков.

Под **объектом поисков** можно понимать как конкретное месторождение полезного ископаемого – **конечный объект поисков**, так и территорию, перспективную для локализации нескольких месторождений: рудное поле, рудный узел – **промежуточные поисковые объекты**, а также и некоторые особенности геологического строения территории, определяющие локализацию (поисковые предпосылки), либо отражающие сам факт локализации (поисковые признаки) конечных и промежуточных поисковых объектов – **частные объекты поисков**.

Известная технология поисков месторождений полезных ископаемых на основе определенной последовательности перехода по цепочке промежуточных поисковых объектов к конечному, выделения для них предпосылок и признаков поискового прогнозирования позволяет распространять приведенные выше

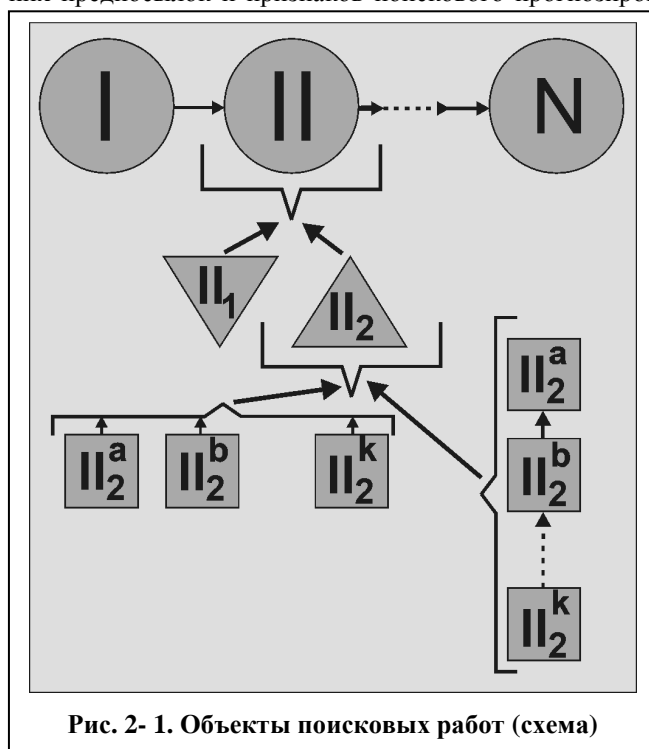


Рис. 2- 1. Объекты поисковых работ (схема)

определения на целую совокупность поисковых объектов, последовательное обнаружение которых обеспечивает, в конечном счете, обнаружение месторождения.

Характеристики качества и надежности геолого-поисковых систем определяются характеристиками качества и надежности элементарных пар «поисковый объект – поисковый метод», совокупность которых и слагает каркас геолого-поисковой системы.

Рис.№ 2-1. иллюстрирует взаимоотношение между перечисленными типами поисковых объектов. Здесь латинскими индексами (I, II, ... N) обозначен иерархический ряд промежуточных объектов поисков от наиболее мелкомасштабных (I), например провинция или субпровинция, через среднемасштабные объекты, например, рудное или алмазное поле (II), к конечному объекту поисков - промышленному месторождению (N).

Выделение любого промежуточного или конечного объектов поисковых работ обычно осуществляется на основе научных знаний о закономерностях его положения в геологической структуре района исследований, т. е. на основе поисковых предпосылок (на рисунке II<sub>1</sub>) и на основе поисковых признаков (на рисунке II<sub>2</sub>). Т.е. предпосылки и признаки здесь выступают как частные поисковые объекты.

Очевидно, что конкретные предпосылки и признаки могут выделяться по формам отражения в конкретных геолого-геофизических и минералого-геохимических полях своими специфическими формами отражения – различного рода аномалиями, которые представляют собой элементарные объекты поисков (на рисунке II<sub>1</sub><sup>a</sup>, II<sub>1</sub><sup>b</sup>, ... II<sub>1</sub><sup>k</sup>). Выделение прогнозного фактора может осуществляться как некоторой совокупности таких аномалий параллельно или последовательно.

Тогда исследование качества и надежности геолого-поисковых систем может быть сведено к выделению в них всех составляющих пар «элементарный объект – поисковый метод» с дальнейшим исследованием качества и надежности его функционирования.

### Количественные критерии качества и надежности.

Для исследования качества и надежности геолого-поисковых систем можно использовать **количественные характеристики качества и надежности**. Прежде всего, к ним относятся две вероятностные характеристики. Это характеристика качества системы или элемента - **средняя единичная вероятность безотказной работы**  $[p_i]$ . Она характеризует среднюю вероятность пропуска поискового объекта при единичном испытании. И это **вероятность безотказной работы системы или ее элемента на весь объем выполняемых поисковых работ** -  $[P(S)]$ , где  $[S]$ , например, площадь поискового участка. Последняя характеристика позволяет оценить вероятность пропуска объекта на всей территории исследований. Первая из этих характеристик широко известна и часто используется в практике работ, либо в виде средней вероятности подсечения объекта поисков, либо - проявления у него тех или иных индикационных свойств, либо в виде средней вероятности его правильной идентификации. Однако эта величина обычно не связывается с количеством реализаций случайного или не случайного процесса, имеющего место в реальной практике работ.

Действительно, примем, что под отказом метода прямого подсечения месторождения горными выработками или буровыми скважинами понимается такое событие, при котором после проведения поисков на участке остается хотя бы одно место, где поисковый объект может уместиться, не будучи при этом подсеченным хотя бы одной точкой наблюдений. Тогда, очевидно, что при значении средней единичной вероятности  $[p_i]$  отличном от 1,0 (средняя вероятность подсечения объекта заданного размера и формы поисковой сетью с фиксированными параметрами), вероятность  $[P(S)]$  убывает с увеличением площади поискового участка. Обозначим в рассматриваемом примере через  $T_{max}$  - максимальное количество минимально-промышленных поисковых объектов, которое может разместиться на площади работ при их плотнейшей упаковке. Этот параметр можно называть максимально возможным количеством отказов. При округлой форме объекта поисков величина этого параметра равна частному от деления площади участка на площадь сечения поискового объекта с поправкой на взаимоперекрывание объектов при их плотной упаковке. Тогда

$$[P(S)] = \frac{T_{max}}{p_i} \quad [2.1]$$

На рисунке N 2.2. приведен пример отказа метода прямого подсечения, вероятность которого (как дополняющая к единице вероятность безотказной работы) оценивается приведенным выше выражением.

Кроме этой характеристики, для оценки показателей качества и надежности систем и элементов целесообразно использовать такие параметры как средняя интенсивность отказов на единичный объем наработки  $[\lambda]$  и средняя наработка на отказ или средняя наработка до первого отказа  $[S_{cp}]$ . В нашем примере средняя интенсивность отказов характеризует общее количество мест, в которых может разместиться поисковый объект, не будучи подсеченным, на одном км. кв., т.е.:

$$\square = \frac{1 - p_i}{s k}, \quad [2.2]$$

где  $s$  - площадь минимально-промышленного поискового объекта в км.кв., а  $k$  - коэффициент, учитывающий взаимоперекрывание между объектами при полном заполнении участка ( $k=0,827$ ).

Средняя наработка на отказ равна площади работ, на которой в среднем, после проведения поисков будет иметься одно неопределенное место, достаточное для размещения одного минимально-промышленного поискового объекта:

$$S_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{s k}{p_i}, \quad [1.3]$$

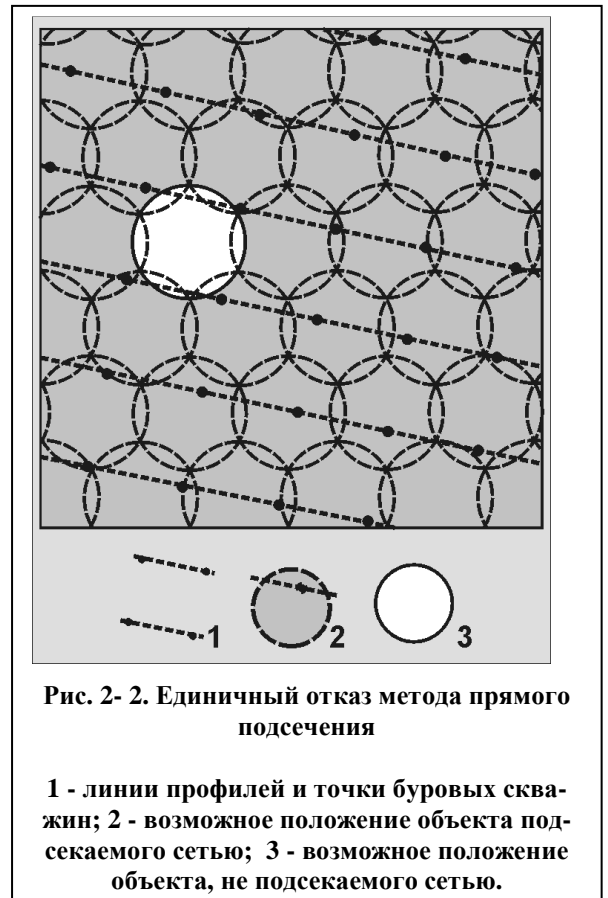


Рис. 2- 2. Единичный отказ метода прямого подсечения

1 - линии профилей и точки буровых скважин; 2 - возможное положение объекта подсекаемого сетью; 3 - возможное положение объекта, не подсекаемого сетью.

Приведенная схема оценки количественных характеристик качества и надежности, в отличие от традиционной схемы простых оценок вероятностей, имеет, на наш взгляд, существенные преимущества:

1. Для использования рекомендуемых количественных характеристик не требуется предположения о случайности и равновероятности расположения объектов поисков на площади. Такое предположение, часто принимаемое за аксиому при планировании поисковых работ, на наш взгляд, не соответствует действительности, так как расположение объектов поисков всегда конкретно и закономерно, даже в случае, при котором эта закономерность не известна.

2. Проведенный переход от анализа вероятностей подсечения поисковых объектов к анализу отказов, в нашем случае - возможных пропусков, делает правомочным вероятностно-статистический анализ надежности в связи с большими, как правило, значениями максимального количества возможных отказов на участке. По опыту работ параметр  $T_{\max}$  на перспективных участках измеряется значениями в десятки, сотни, а иногда и тысячи единиц.

3. Приведенные характеристики надежности имеют реальное смысловое содержание, достаточно простую интерпретацию и позволяют, в тоже время, проводить оценку надежности весьма сложных геолого-поисковых систем.

### Принципы построения классификации отказов.

Целенаправленный анализ отказов элементарных пар "объект - метод" включает в себя следующие основные операции:

- конкретизация понятия "отказ" для рассматриваемой пары и составление общего перечня отказов с классификацией их по форме и причинам проявления;
- предварительное изучение частоты встречаемости отказов каждого вида в конкретной исследуемой геолого-поисковой технологии применительно к реальным геологическим и ландшафтно-геологическим условиям поисков; типизация отказов по частоте встречаемости и влиянию на эффективность поисков;
- проведение исследований каждого отказа с установлением причины его проявления, подбором геологической и математической модели, определением количественных параметров и их изменчивости по площади работ либо в зависимости от других факторов;
- определение характера и количественных характеристик связей между различными видами отказов внутри их отдельных классификационных групп и между группами;
- определение общего алгоритма расчета качества и надежности для исследуемой пары в зависимости от всех меняющихся по площади участка природных и других факторов;
- составление карты районирования исследуемой территории по надежности опосредования на заданный частный объект поисков конкретным методом;
- общий анализ структуры отказов метода с выделением главных направлений, требующих разработки мероприятий по повышению надежности.

Проведенный анализ причин возникновения отказов при поисках месторождений полезных ископаемых показал, что кроме отказов связанных с поломками технических средств, которые в настоящей работе не рассматриваются, все остальные отказы отчетливо разделяются на два главных типа.

К первому из них относятся ситуации, связанные с недостатком знаний о вещественно-индикационных свойствах поискового объекта и вмещающей его ландшафтно-геологической среде. Второй тип отказов объединяет ситуации связанные с не использованием, неполным или ошибочным использованием имеющихся знаний на этапах планирования и проведения полевых и аналитических работ; на этапе обработки и интерпретации полевых и аналитических материалов; а также на этапе заверочных работ при проверке прогнозных рекомендаций. Отмеченное обстоятельство позволяет выделять пять основных условий, определяющих безотказность работы любого метода в паре "объект-метод":

**А** - по отношению к поисковому методу, используемому в паре, объект поисков должен обладать минимально-аномальным значением соответствующего индикационного параметра, например, для магниторазведки - быть намагниченным, а для шлихо-минералогического метода - содержать индикаторные минералы;

**В** - на фоне вмещающих и перекрывающих пород, компонентов ландшафта на принятой поверхности наблюдений объект поисков должен создавать аномалию, фиксирование которой принципиально возможно при современном уровне измерительной техники или при разумных объемах опробования;

**С** - расположение точек наблюдения на местности и применяемая точность (представительность) наблюдений должны гарантировать подсечение аномалии от объекта необходимым количеством точек (т.е. существующая в реальном поле аномалия должна найти отражение в измеренном поле);

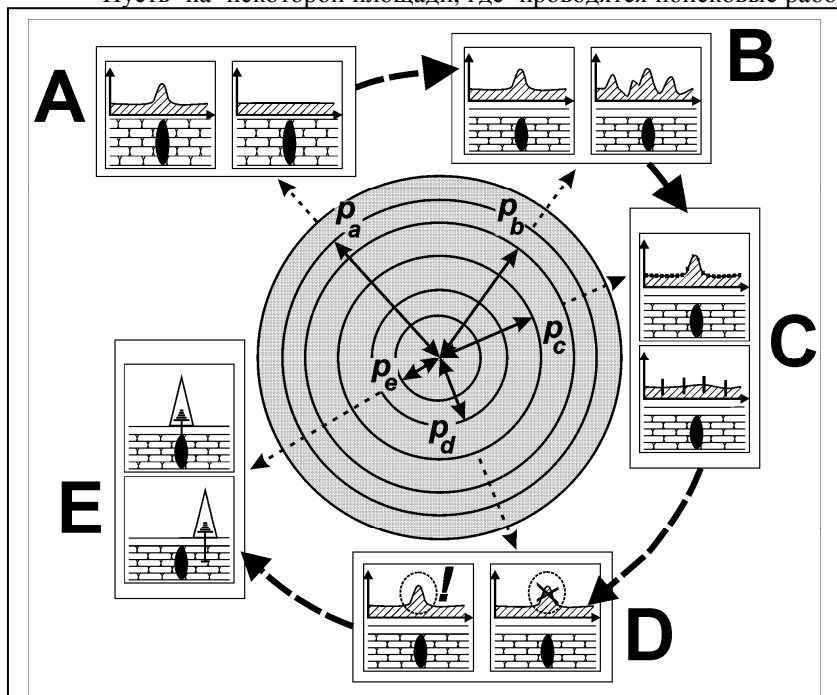
**Д** - измеренная аномалия от поискового объекта должна быть выделена, правильно проинтерпретирована, т.е. отнесена к группе аномалий, требующей заверки, с правильным определением местоположения аномалообразующего объекта

**Е** - применяемая система заверочных работ (либо переход на следующую стадию исследований) должна гарантировать вскрытие аномалообразующего объекта.

Очевидно, что при нарушении любого из перечисленных условий поисковый объект пропускается.

Перечисленные группы событий позволяют выделять для каждой элементарной пары «объект-метод» **ПЯТЬ СТРУКТУРНЫХ МОДУЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**, которые далее в соответствии с причинами отказов или условиями безотказной работы и обозначаются на схемах следующим образом: **А** – вещественно-индикационный, **В** - ландшафтно-геологический, **С** - технико-метрологический, **Д** - геолого-интерпретационный, **Е** - заверочный. Названные модули универсальны, могут использоваться при исследовании качества и надежности любой элементарной пары "объект - метод". Они же являются основой при классификации отказов для конкретных пар. На рисунке №2-3 предлагаемая схема классификации отказов иллюстрируется при помощи логической диаграммы Эйлера.

Пусть на некоторой площади, где проводятся поисковые работы, имеется достаточно большое количество поисковых объектов.



**Рис. 2-3. Общая модель выделения и классификации отказов для элементарных пар «объект – метод» на основе логической диаграммы Эйлера**

На рисунке все они условно образуют совокупность точек в пределах внешней окружности, т. е. каждая точка внутри этого круга - поисковый объект.

Пусть часть этих объектов обладает повышенной контрастностью индикационного свойства, интенсивность которого достаточно для обнаружения объектов соответствующим поисковым методом в наиболее благоприятных для поисков ландшафтно-геологических и прочих условиях. Другая же часть объектов пусть такой интенсивностью параметра не обладает. На рисунке совокупность точек, соответствующих достаточно контрастным объектам расположена в пределах круга с радиусом  $r_a$ , а точки, соответствующие

неконтрастным объектам расположены в пределах первого внешнего кольца. В соответствии с рассматриваемой моделью, отношение площади окружности с этим радиусом к площади большей окружности может рассматриваться как вероятность безотказной работы вещественно-индикационного модуля -  $r_a$ . Очевидно, что рассмотрение четырех остальных модулей целесообразно только для поисковых объектов достаточно контрастных – точки в окружности с радиусом  $r_a$ .

Пусть теперь из объектов, обладающих повышенным уровнем индикационного параметра (круг с радиусом  $r_a$ ), одна часть в реальной ландшафтно-геологической ситуации может создавать достаточные по контрастности аномалии, обнаружение которых возможно при благоприятном сорасположении аномалии и точек наблюдения (окружность с радиусом  $r_b$ ), а аномалии от другой части объектов экранируются компонентами вмещающей ландшафтно-геологической среды (кольцо между указанными радиусами). В этом случае вероятность безотказной работы второго модуля поискового метода (ландшафтно-геологического), т.е. вероятность события, что любой из объектов, обладающий повышенным индикационным параметром, способен отразится достаточно контрастной аномалией, равна отношению площадей меньшего круга к большему из рассматриваемой пары. Из приведенного рассуждения видно, что вероятность для второго модуля является условной вероятностью и вычисляется, если имеет место первое событие, т.е. для части объектов поисков, обладающих повышенным уровнем индикационного параметра.

Пусть теперь на площади работ проведены поисковые работы соответствующим методом, однако плотность расположения точек наблюдений и точность или представительность наблюдений оказались недостаточными для отражения в соответствующем методу поле всех поисковых объектов. Т.е. часть из них отразилось метрически достоверными аномалиями, а часть нет. В нашем случае отразившиеся объекты образуют совокупность точек расположенных в пределах окружности с радиусом  $r_c$ . Тогда вероятность безотказной работы технико-метрологического модуля поискового метода, т.е. вероятность события, что любой из объектов, обладающий повышенным индикационным параметром и, залегающий в благоприятной ланд-

шафтно-геологической среде, фактически отразится достаточно контрастной аномалией, равна отношению площадей меньшей окружности (с радиусом  $p_c$ ) к большей (с радиусом  $p_b$ ).

Аналогичным образом можно описать вероятности безотказной работы для геолого-интерпретационного и заверочного модулей (вероятности  $p_d$  и  $p_e$ ).

В результате полученных помодульных характеристик качества может быть определена обобщенная характеристика качества поискового метода, реализованного или проектируемого для конкретной площади для обнаружения конкретного объекта:

$$P_{a-e} = P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e \quad [2.4]$$

В таблице № 2-1 приведен фрагментарный пример классификации отказов на примере шлихо-минералогического метода поисков кимберлитов в закрытых районах Западной Якутии.

**Таблица №2-1. Классификация отказов шлихо-минералогического метода поисков кимберлитов по индикаторным минералам (Мало-Ботуобинский и Далдыно-Алакитский районы Западной Якутии) (фрагментарно)**

Наименование модуля (аксиоматическое условие эффективности метода)	Формы проявления и возможные причины отказов
<p><b>А. Вещественно-индикационный</b> (наличие аномальной минералогической продуктивности эродированной части кимберлитового тела по индикаторным минералам с размером зерен более 0,25 мм)</p>	<p><b>Формы проявления отказов:</b>  <i>Несоответствие модели объекта поисков, используемой в практике шлихо-минералогических работ, реальному распределению индикаторных минералов в эродированной части кимберлитового тела, в том числе:</i>            А.а. По общей минералогической продуктивности эродированной части конкретного кимберлитового тела в отношении индикаторных минералов, используемых при поисках.            А.б. По соотношению различных минеральных видов в группе индикаторных минералов кимберлитов.            А. в. По соотношению различных гранулометрических классов индикаторных минералов.</p> <p><b>Возможные причины отказов:</b>            А.1. Весьма малое содержание индикаторных минералов кимберлитов в эродированной части кимберлитовой трубки, обусловленное существенным разубоживанием диатремы ксеногенным материалом (кратерные фации трубок).            А.2. То же, обусловленное процессом гипергенного растворения минералов вплоть до полного уничтожения в результате развития корообразовательных процессов на верхней части трубки до ее эрозии.            А.3. То же, обусловленное исходной обедненностью кимберлитовой магмы (флюида) типоморфными ассоциациями индикаторных минералов малой и средней глубинности (красный и оранжевый пироп, пикроильменит) .            ... и т.д. всего 9 возможных причин отказов в первом модуле.</p>
<p><b>В. Ландшафтно-геологический</b> (наличие шлихо-минералогической аномалии от объекта поисков в реально существующей среде по предлагаемому горизонту опоискования в классе с диаметром более 0,25 мм).</p>	<p><b>Формы проявления отказов:</b>  <i>Несоответствие используемой в практике модели строения и развития среды, обуславливающей формирование шлихо- минералогического ореола, реальной ландшафтно- геологической ситуации около конкретного кимберлитового тела, приводящее в конечном счете к:</i>            В. а. Невыделению шлихо-минералогической аномалии от трубки из-за отсутствия в тяжелой фракции шлихов индикаторных минералов кимберлитов;            В. б. Невыделению локальной шлихо-минералогической аномалии на фоне регионального аномального поля;            В. в. Принципиальной невозможности правильного определения местоположения аномалообразующего коренного источника (в рамках шлихо-минералогического метода).</p> <p><b>Возможные причины отказов:</b>            1. Явления, обуславливающие эффект статистического экранирования сигнала.            В.1. Низкая контрастность аномалии от объекта поисков на фоне анома-</p>

	<p>лии от другого кимберлитового тела (известного или неизвестного).</p> <p>В.2. То же , на фоне аномалии от промежуточного коллектора.</p> <p>В.3. Существенная изменчивость содержаний и гранулометрических классов индикаторных минералов в различных литологических типах пород, приводящая к значительному искажению аномального сигнала от объекта поисков.</p> <p>... и т.д. всего пять возможных причин отказов связанных со статистическим экранированием сигнала.</p> <p>2. Явления, обуславливающие эффект динамического экранирования сигнала из-за пассивного течения ореолообразующих или в связи с активным течением ореолоразрушающих процессов.</p> <p>...</p> <p>В.10 Непосредственное захоронение кимберлитового тела осадками пелитовой, алевроитовой и мелкопесчанной размерности, образовавшихся в условиях пониженной гидродинамической активности среды.</p> <p>...</p> <p>В.15. Деформация палеорельефа, смещение ореола, отторжение верхней части объекта в результате механического воздействия более поздних магматических процессов (трапповая тектоника) .</p> <p>... и т.д. всего 20 возможных причин отказов во втором модуле.</p>
<p><b>С. Техно-метрологический</b> (получение в результате опробования исследуемого горизонта на этапах рядовых наблюдений и детализации аномалий достаточного количества шлихо-минералогических данных об ореоле для последующего прогнозирования местоположения коренного источника).</p>	<p style="text-align: center;"><b>Формы проявления отказов:</b></p> <p style="text-align: center;"><i>Неподсечение реально существующего в среде шлихо-минералогического ореола применяемой системой наблюдений, опробования и анализа, в том числе:</i></p> <p>С.а. Непопадания в контур ореола достаточного количества точек наблюдения в плане;</p> <p>С.б. Неподсечение ореола в вертикальном разрезе точки наблюдения;</p> <p>С.в. Необнаружение всего количества индикаторных минералов кимберлитов прямого сноса в пробах, отобранных из ореола.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Возможные причины отказов:</b></p> <p>С.1. Редкая проектная сеть буровых скважин.</p> <p>С.2. Несоответствие системы сорасположения точек наблюдения реальным морфологическим особенностям строения конкретного ореола.</p> <p>С.3. Расположение точек наблюдения на местности без учета микрофациальных и геоморфологических особенностей строения и залегания горизонта опробования.</p> <p>...</p> <p>С.6. Отсутствие в технологической схеме опробования процедур повторного отбора проб из точек наблюдений, затрудняющее количественную оценку воспроизводимости результатов опробования.</p> <p>...</p> <p>С.9. Проведение бурения по представительному горизонту с невыполнением требований о проходке укороченными рейсами.</p> <p>...</p> <p>С.18. Ошибки в описаниях шлихов при определении степени сохранности индикаторных минералов.</p> <p>... и т.д. всего 22 возможных причин отказов в третьем модуле.</p>
<p><b>Д. Геолого-интерпретационный</b> (выделение подсеченной шлихо-минералогической аномалии, ее отнесение к группе кимберлитоперспективных; правильное</p>	<p style="text-align: center;"><b>Форма проявления отказов:</b></p> <p>Д.а. Невыделение на этапе первичной обработки данных шлихо-минералогической аномалии, соответствующей реальному неизвестному поисковому объекту;</p> <p>Д.б. Отнесение на этапе классификации выделенной аномалии от реально существующего тела, к группе бесперспективных или малоперспективных</p>

определение границ участка, рекомендуемого под вскрытие коренного объекта).	аномалий; D.v. Невключение в контур перспективного участка, выделенного под за- верку, фактического местоположения коренного источника..
	<b>Возможные причины отказов:</b> всего 24 возможных причины отказов в четвертом модуле.
E. <b>Заверочный</b> (подсечение аномалообразующего объекта горной выработкой или буровой скважиной, правильная идентификация).	<b>Формы проявления отказов:</b>  Необнаружение кимберлитового тела на участке работ, выделенном в качестве перспективного по результатам шлихо- минералогического метода.
	<b>Возможные причины отказов:</b> E.1. Использование малонадежной сети заверочных скважин или выработок при попытке подсечения кимберлитового тела. ... E.3. Неподсечение поискового объекта из-за недостаточной переуглубки скважин или выработок в кимберлитовмещающие породы. E.4. Вскрытие выработкой или скважиной трудно диагностируемой разновидности кимберлитов или "плавающего" рифа вмещающих пород. E.5. Аварии в скважинах, низкий выход керна и прочие осознанные и неосознанные отказы, возможные в процессе проведения горных и буровых работ, не отраженные в отчетной документации. Всего 6 возможных причин отказов в пятом модуле.

Приведенный фрагментарный пример классификации отказов по формам проявления и возможным причинам иллюстрирует лишь начальную часть анализа надежности поисковых методов. Далее, на основе такой классификации осуществляется оценка реальной частоты встречаемости описанных ситуаций и масштабов их влияния на эффективность геолого-поисковых работ. Для этого используется два подхода. При первом для соответствующих оценок привлекаются эксперты по конкретным поисковым методам и по конкретным территориям. При втором, оценка отмеченных характеристик проводится на примере эталонных участков или объектов. В результате таких оценок все отказы подразделяются на следующие основные группы:

- 1) отказы, обусловленные ситуациями, систематически встречающимися на исследуемой площади, в существенной мере снижающие эффективность поисков в регионе;
- 2) отказы, обусловленные ситуациями, эпизодически встречающимися, снижающими эффективность поисков на отдельных участках, но практически не определяющие эффективность поисков по региону в целом;
- 3) отказы, частота встречаемости и влияние на эффективность поисков для которых не установлена.

Для первой группы отказов далее разрабатываются специальные методы изучения и минимизации их влияния. Для второй группы отказов разрабатываются рекомендации по их учету в конкретных обстоятельствах. Третья группа отказов выделяется в качестве задач для изучения научно-исследовательскими, тематическими или опытно-методическими коллективами. Кроме подразделения отказов по структурным модулям эффективности методов также события, приводящие к пропуску объекта, могут подразделяться:

- по достоверности самого факта отказа на действительные и вероятные ;
- по времени у становления на отказы, установленные или предполагаемые до проведения работ, в процессе проведения исследований, после завершения поисков.

Выполненные исследования отказов поисковых методов, используемых в практике работ на алмазы и некоторые другие полезные ископаемые, позволили выделить наиболее типичные ситуации, систематически встречающиеся на практике и характеризующиеся существенным влиянием на эффективность геолого-поисковых работ. Кратко рассмотрим помодульно эти ситуации на примере методов направленных на обнаружение коренных месторождений алмазов.

#### **Отказы вещественно-индикационного модуля**

К этой группе отказов относятся такие возможные и действительные ситуации, при которых пропуск поискового объекта происходит из-за отсутствия у него явно выраженного, соответствующего поисковому методу аномального индикационного свойства даже при весьма благоприятной ландшафтно-геологической обстановке, наиболее оптимальной системе наблюдений методом, адекватной интерпретации полученных данных и высоконадежных заверочных работах.

Обычно такие отказы, помимо очевидных ситуаций, связаны с двумя классами событий. Это использование при построении поисковых моделей усредненных индикационных характеристик поисковых объектов, без учета всего диапазона их изменчивости. И это перенос индикационных характеристик, уста-

новленных для объектов уже обнаруженных при поисках в конкретных районах, на объекты, которые в этом же районе предполагается дополнительно обнаружить. Примером отказов, обусловленных первой причиной, может служить анализ вещественно-индикационного модуля для магнитометрического метода поисков коренных месторождений алмазов.

Эффективность магниторазведки в практике поисков кимберлитов хорошо известна. Однако вопрос о полноте опознания территории этим методом прямо зависит от возможной изменчивости намагниченности кимберлитовых пород. Долго считалось, что поисковые сети этим магнитометрической съемки масштаба 1:2000 практически гарантируют вскрытие сырьевого потенциала территорий при благоприятной ландшафтно-геологической обстановке. Однако, проведенный ( ) в этом направлении фактический анализ данных, как по отдельным кимберлитовым телам, по кустам трубок и по кимберлитовым полям показал, прежде всего, что изменчивость намагниченности кимберлитовых пород в кустах и полях хорошо аппроксимируется экспоненциальным законом распределения плотности вероятности. Т.е. при достаточно высоких средних значениях параметра, существенно преобладают слабомагнитные тела над высокомагнитными. Далее, это анализ показал, что намагниченность и алмазность кимберлитовых пород связаны отрицательным коэффициентом корреляции ( ), и слабо магнитные и немагнитные кимберлиты могут слагать целые кимберлитовые поля (Мирнинское поле), кимберлитовые тела в пределах одного поля и отдельные фазы внедрения в пределах отдельных трубок. Последний вывод подтвердился открытие Накынского высокоалмазного кимберлитового поля в Западной Якутии ( ).

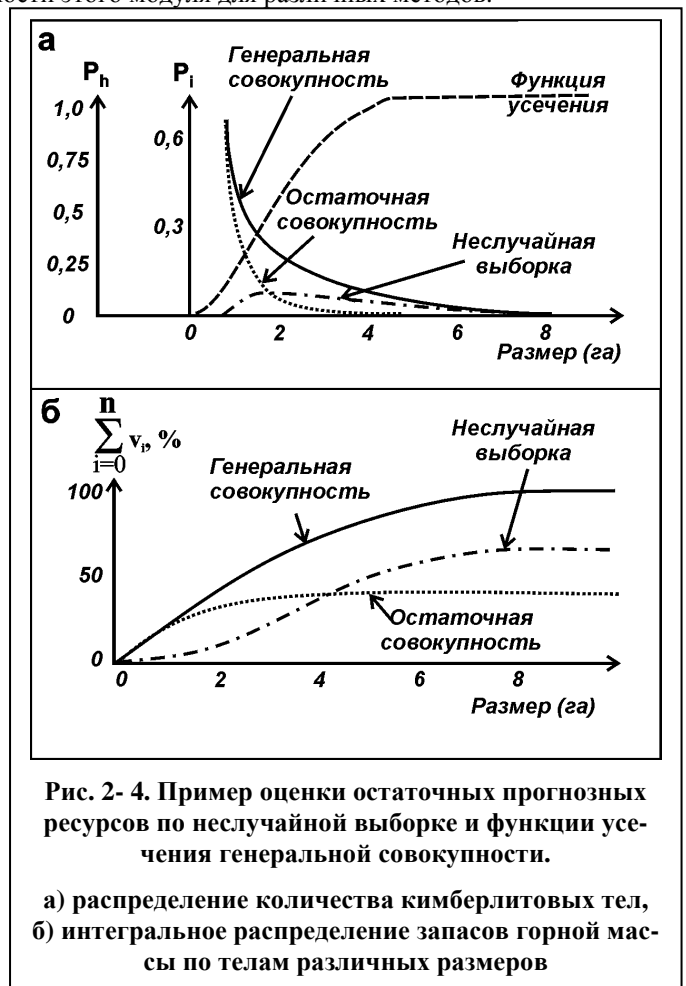
Аналогичным образом для кимберлитов исследованы характеристики вещественно-индикационного модуля других поисковых методов. Все это, в целом, привело к формулированию двух достаточно важных выводов, позволяющих проводить оценку надежности этого модуля для различных методов:

1) Индикационные свойства поисковых объектов отчетливо подразделяются по виду их изменчивости в генеральной совокупности на симметричные (например, нормальное), резкоасимметричные (например, экспоненциальное) и переходные. Для резкоасимметричного вида распределения формирование высоких индикаторных параметров у поисковых объектов относится к явлениям не типичным, а обусловлено совокупностью различных геологических причин, определяющих вместе отклонения от правила. Следовательно, поисковые методы, ориентированные на эти свойства, характеризуются ограниченной геологической эффективностью. Напротив, для симметричного, отличного от фона вида распределения повышенное значение индикаторного параметра является достаточно типичным, и, соответственно, поисковые методы, ориентированные на эти свойства, в отношении отказов вещественно-индикационного модуля могут рассматриваться как достаточно надежные.

2) Индикационные свойства поисковых объектов формируются в результате взаимодействия достаточно сложной суммы геологических процессов, часть которых является обязательной и обуславливает генерацию, транспортировку и аккумуляцию полезного компонента, а часть - сопутствующими и необязательными, а, возможно, и специфически для конкретного тела, поля, района или провинции. Соответственно и индикаторные свойства объектов могут быть как постоянными, так и изменяющимися, не обязательными.

Первый вывод можно рассматривать как статистическое условие надежности вещественно-индикационного модуля, второй - как генетическое условие.

Как уже отмечалось, следующей причиной отказов первого модуля является перенос средних характеристик индикаторных параметров объектов, уже обнаруженных в районах, на объекты, которые обнаружить только предстоит. Отказы этого типа имеют особое значение при поисках в районах действующих горнодобывающих предприятий.



Кратко их сущность заключается в том, что средние характеристики обнаруженных объектов не соответствуют средним характеристикам их генеральной совокупности существующей в природе, а тем более, остаточной совокупности объектов, которую необходимо обнаружить. Это связано с тем, что выборка из обнаруженных объектов не является случайной, так как вероятность обнаружения объектов является функцией контрастности их индикационных свойств. Следовательно, для суждения об остаточной совокупности объектов и их индикационных свойствах необходимо иметь, помимо данных о не случайной выборке, данные о функции усечения генеральной совокупности.

Методом количественного моделирования проведено исследование характера влияния функции усечения генеральной совокупности на характеристики неслучайной выборки и остаточной совокупности. При моделировании с генеральной совокупностью экспоненциального вида получен вывод, что неслучайная выборка практически для всех случаев не полного опосредования территории имеет отчетливое логарифмически-нормальное распределение индикационного параметра ( ).

Проиллюстрируем этот вывод на примере. На рис. 2.-4.а. приведен пример оценки генеральной и остаточной совокупностей по кимберлитовым телам одного из кимберлитовых полей Сибири. Здесь показаны графики, характеризующие:

- распределение известных кимберлитовых тел по площади сечения (неслучайная выборка по индикационному параметру - размеру кимберлитовых тел);
- вероятность подсечения объектов в зависимости от площади сечения тела на поверхности эрозионного среза, т.е. частный вид функции усечения генеральной совокупности;
- определенный, по первым двум графикам вид распределения генеральной совокупности и вид распределения остаточной совокупности.

В результате пересчета полученных данных на объем горной массы кимберлитов, выяснилось, что в этом районе обнаружено около 65%, и может быть еще обнаружено до 35% запасов, о которых до этого и не подозревалось. При этом из приведенных данных видно, что основная часть этих запасов локализуется в телах с размером до 4 га, в то время как распределение размеров в неслучайной выборке по своим средним параметрам значительно выше.

Интересно, что проведенный по хорошо изученным полям Западной Якутии анализ характера распределения для кимберлитов основных индикационных свойств, показал, что большинство этих характеристик описывается четкими зависимостями экспоненциального вида. Этот вывод может использоваться для предварительной оценки территорий по полноте опосредования: при получении графиков распределения индикационных параметров, отличных от экспоненциального вида в сторону симметричного распределения можно предполагать возможность обнаружения новых объектов.

Приведенные рассуждения и примеры позволяют сделать вывод о необходимости специального исследования случайности выборок и специального анализа для определения индикационных характеристик остаточной совокупности объектов поисков. Последнюю, после исключения объектов с параметрами меньшими, чем минимально-промышленные, можно называть поисковой совокупностью для конкретного района. Статистические данные по поисковой совокупности позволяют оценить надежностные характеристики первого модуля для конкретных поисковых методов и обосновать необходимость и направления повышения его надежности.

### **Отказы ландшафтно-геологического модуля**

Проведенные исследования отказов второго модуля поисковых методов, т.е. ситуаций, при которых пропуск поискового объекта, обладающего достаточно высоким значением индикационного параметра, происходит из-за неблагоприятного воздействия на условия поисков компонентов вмещающей ландшафтно-геологической среды, показали, что может быть выделено три основных группы действительных или возможных событий такого типа. Это отказы, связанные со статистическим, физическим и динамическим экранированием сигнала от поискового объекта.

Первые из них, т.е. **отказы статистического экранирования**, объединяют ситуации, при которых необнаружение объекта возможно из-за высокого уровня дифференциации фонового поля, не позволяющей выделить метрически достоверный «сигнал» на фоне «помех». Это, например, имеет место при поисках кимберлитовых тел магниторазведкой на площадях распространения высокомагнитных траппов, обычно перекрывающих объекты поисков.

Для второй группы, т.е. для **отказов физического экранирования**, пропуск объектов обуславливается наличием физического экрана между объектом и поверхностью исследований, как, например, горизонты высокопроводящих пород между дневной поверхностью и поверхностью, на которой предполагается аномальный эффект электропроводности от поискового объекта.

И, наконец, третья группа отказов модуля - **отказы динамического экранирования** - объединяет ситуации, при которых аномалия от объекта уничтожена, либо разобщена с ним в результате протекания процессов формирования и изменения компонентов вмещающей ландшафтно-геологической среды. Примеры ситуаций третьей группы широко распространены в Западной Якутии, когда трапповые образования непо-

средственно залегают на кимберлитовмещающих породах с уничтожением в процессе их внедрения шлихо-минералогических ореолов от трубок в верхнепалеозойских отложениях.

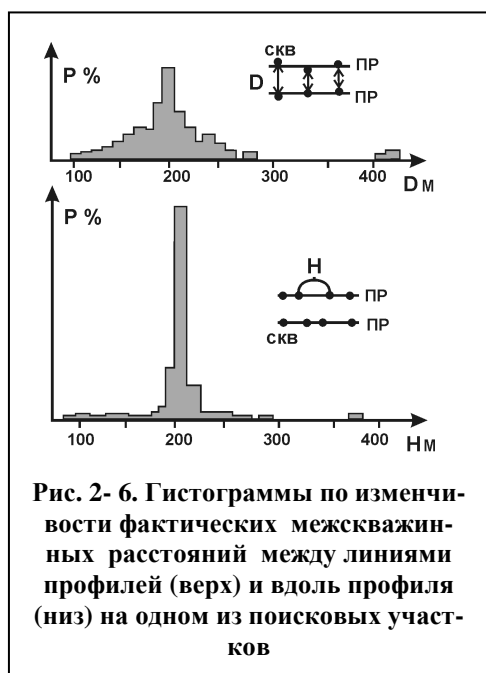
Очевидно, что рассмотренные варианты экранирования являются крайними случаями. В реальной же практике работ возможны их различные сочетания.

Исследование надежности опоискования конкретной перспективной территории определенным комплексом поисковых методов на заданную поисковую совокупность объектов невозможно осуществить без детальной разработки, на основе классификации отказов второго модуля, по каждому из методов легенды для карты ландшафтно-геологических условий поисков применительно к конкретному масштабу работ. Только составление такой карты, в конечном счете, может позволить получить достоверные данные об изменчивости количественных характеристик надежности второго модуля по площади исследований. Подбор количественных или качественных моделей отказов позволяет получить карту районирования территории по надежности опоискования в отношении отказов второго модуля.

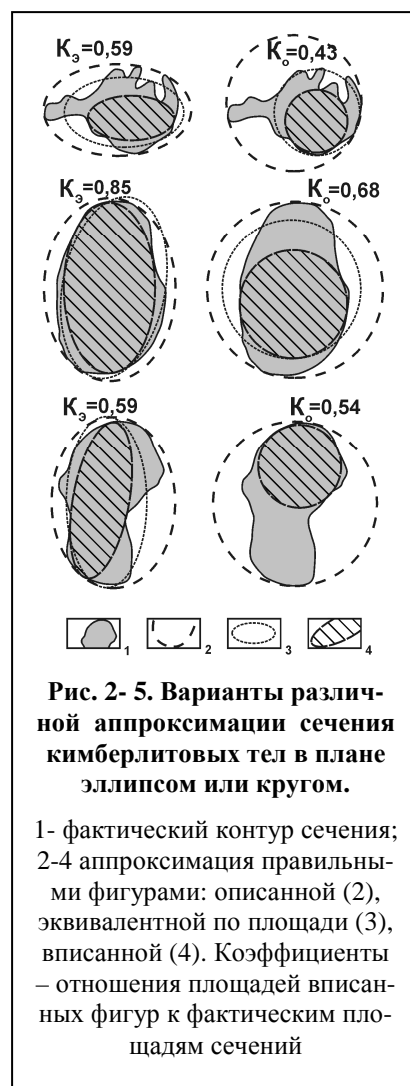
### Отказы технико-метрологического модуля

К отказам третьего модуля поисковых методов отнесены ситуации, при которых пропуск объектов поисков происходит или может происходить, даже при наличии в реальном исследуемом поле достаточно контрастной аномалии от объекта, из-за несоответствия параметров поисковой сети и точности наблюдений (или представительности опробования) реальным размерам и контрастности соответствующих аномалий.

При анализе отказов этой группы прежде всего необходимо остановиться на отказах, обусловленных несоответствием между, с одной стороны, геометрическими параметрами аномалий или объектов, а с другой- плотностью и конфигурацией поисковой сети. Возможны две причины такого несоответствия. Это несоответствие либо заложено в проекте работ из-за недооценки минимальных размеров поисковых объектов, представляющих промышленный интерес, и морфологической сложности строения объектов, либо это несоответствие обусловлено не учитываемыми отклонениями от проекта, возникающими в ходе проведения поисков



**Рис. 2- 6. Гистограммы по изменчивости фактических межскважинных расстояний между линиями профилей (верх) и вдоль профиля (низ) на одном из поисковых участков**



**Рис. 2- 5. Варианты различной аппроксимации сечения кимберлитовых тел в плане эллипсом или кругом.**

1- фактический контур сечения; 2-4 аппроксимация правильными фигурами: описанной (2), эквивалентной по площади (3), вписанной (4). Коэффициенты – отношения площадей вписанных фигур к фактическим площадям сечений

На рис. N. 2.-5. приведены реальные формы сечения кимберлитовых тел по поверхности эрозионного среза. Из рисунка следует, что реальные объекты по своей морфологии обычно существенно отличаются от простых геометрических фигур в виде круга или эллипса, на основании которых обычно осуществляется расчет поисковых сетей. Это отличие обуславливает реальную возможность пропуска сложных построенных поисковых объектов, что имеет весьма существенное значение в районах действующих добывающих предприятий. Отмеченное несоответствие широко распространено в практике геолого-поисковых работ. Его устранение, а соответственно и повышение надежности модуля может быть осуществлено переходом от планирования сетей через правильные эквивалентные фигуры к планированию через выделение регулярных составляющих формы поисковых объектов, т.е. с использованием в расчетах параметров вписанных геометрических фигур. Разработаны соответствующие методики расчета сетей через регулярные составляющие формы поисковых объектов, гарантирующие подсечение объекта любой формы ( ).

На рис. N. 2.-6. приведены гистограммы, характеризующие отличие фактических межскважинных расстояний от проектных по одному из поисковых участков. Проведенное исследование отказов этого вида позволило разработать специальную номограмму, по которой требования к точности переноса проекта по-

исковой сети на местность обосновываются через площадь участка, размеры поискового объекта и вероятность безотказной работы рассматриваемого модуля.

Переходя к анализу отказов третьего модуля, обусловленных несоответствием между необходимыми и фактической точностью или воспроизводимостью наблюдений, можно констатировать, что используемые в практике геолого-поисковых работ методы с рассматриваемых позиций могут быть разделены на три группы: количественные, полуколичественные и качественные.

Для первых из них, т.е. для количественных методов, воспроизводимость результатов измерений легко определяется из контрольных операций, а соответственно, и весьма просто оцениваются количественные характеристики надежности модуля.

Для второй группы методов, результаты которых обычно используются в количественном виде, но без исследования воспроизводимости данных, примером может служить шлихо-минералогический метод. Его реализация на практике включает операции по отбору пробы, ее промывке, делению на фракции и минералогическому анализу фракций. Ни одна из этих операций практически не исследуется, по крайней мере, достаточно полно на воспроизводимость результатов. В то же время, имеются, хотя и ограниченные, публикации о весьма значительных вариациях результатов этих операций в зависимости от целого ряда различных факторов. Из сказанного представляется очевидным, что анализ надежности третьего модуля рассматриваемых методов, прежде всего, предполагает разработку и широкое внедрение в практику системы контрольных процедур для каждой из операций, составляющих метод, а уже затем оценку количественных показателей его надежности.

**Третья группа поисковых методов, основанная на качественном описании результатов наблюдений, является важнейшей в геолого-поисковых работах.** Необходимо отметить, что качественный характер описаний здесь не является недостатком этих методов, а в значительной степени обусловлен невозможностью и нецелесообразностью сведения всего качественного многообразия элементов геологического строения территории или обнажения к простым количественным характеристикам. Однако, важнейшим недостатком сегодняшнего проведения исследований указанными методами является отсутствие каких-либо сведений о воспроизводимости результатов.

Интересно отметить, что практика использования положений инженерной психологии при анализе надежности систем типа "человек - техника" свидетельствует о целесообразности специальных инженерно-психологических исследований даже таких простых операций, как считывание прибора или управление механизмами, с выработкой решений о такой конструкции прибора или механизма, при которой вероятность безотказной работы оператора максимальна. В то же время, для геолого-поисковых систем, относимых к сложным исследовательским системам типа "человек - природа", считывание геологической информации с керна скважин, стенок или забоев обнажений является задачей, на наш взгляд, не менее ответственной и несоизмеримо более сложной. В нашей отрасли пока не известны случаи подобных исследований с составлением инженерно-психологического паспорта неявно выраженных руд или поисковых признаков.

Предварительный же **анализ геологических исследований с указанных позиций, проведенный нами в ходе выполнения настоящей работы, свидетельствует о возможности широкого распространения отказов, связанных с деятельностью человека**, которые кроме очевидных причин, в значительной степени обусловлены причинами, требующими специального психологического и социологического анализа.

Проведенные и проводимые нами исследования проблем качества и надежности геолого-поисковых работ применительно к практике работ на алмазы и другие полезные ископаемые показали, что в значительной мере безотказность поисков определяется потенциальной способностью, подготовленностью, заинтересованностью и свободой в принятии решений каждого исполнителя работ ("документатора", "интерпретатора", "администратора", "учителя" и др.).

Существующие методические рекомендации, инструкции, директивные документы обычно ориентированы на исполнителя работ, существенно идеализированного как по возможности адекватного выполнения директивного алгоритма, так и по способности принятия решений в трудно формализуемых ситуациях. При анализе надежности поисковых работ было выделено три группы причин, обуславливающих отклонения от идеализированного "исследователя" и, соответственно, обуславливающих реальность пропусков поисковых объектов:

**А. Неспособность исполнителя работ к устойчивой безотказной работе**, обусловленная недостаточным уровнем профессиональной подготовки, опытом работы, несоответствием между психическим типом личности и типом решаемой геологической задачи. Анализ специфики работ, выполняемых в процессе поисков документатором, интерпретатором и, отчасти, администратором (выполняет функцию принятия решения и организации его выполнения), свидетельствует о достаточной распространенности ошибок, связанных с переносом стереотипных решений предшествующих задач на задачи, вновь решаемые. Широко распространено явление "старения" элементов системы, связанных с деятельностью конкретного исполнителя или группы исполнителей. Развито спонтанное колебание внимания из-за продолжительного отсутствия положительной поисковой информации. Весьма часто исполнители работ, обычно неосознанно, в своей практике существенно абсолютизируют контрастность индикационных свойств поисковых объектов или

недооценивают сложность влияния компонентов среды, даже при наличии соответствующих данных в специальной литературе. Последнее является проявлением специфического стабилизационного механизма личности - психологической защиты. Имеют место многочисленные попытки решения задач, поставленных некорректно и фактически нерешаемых. Из-за отсутствия опыта открытий и ограниченности наблюдений у многих исполнителей часто отсутствует чувственно-зрительный образ поисковых объектов или других геологических явлений, определяющих эффективность прогнозирования (на пример, внутреннее строение разрывных нарушений, географические обстановки, экстраполированные в прошлое и т.д.).

**Б. Внешние и внутренние внегеологические факторы, обуславливающие не заинтересованность исполнителя в безотказной работе** (вплоть до заинтересованности в противоположном). В основном, влияние этой группы факторов определяется несовпадением мотивов (совокупностей условий, вызывающих активность субъекта и определяющих ее направленность) деятельности отдельных личностей с общей целью геолого-поисковых исследований и частными задачами, решаемыми в рамках отдельных элементов геолого-поисковой системы. Хорошо известный затратный механизм в организации геологических поисков, отсутствие у значительной части исполнителей (особенно технических профессий) какой-либо заинтересованности в качестве решения задач - порождает поток осознанных и неосознанных отказов на многих этапах исследований, весьма часто приводит к потере исполнителями квалификации, порождает невосприимчивость геолого-производственных организаций к методическим, аппаратурно-техническим и другим разработкам исследовательских коллективов.

**В. Внешние внегеологические факторы, обуславливающие невозможность принятия правильного решения или осуществления адекватного поступка при потенциальной способности исполнителя к безотказной работе и заинтересованности в положительных результатах труда.** Сюда относятся, прежде всего, часто встречаемые противоречия между материалами, определяющими методику проведения поисковых работ и инструктивными документами, регламентирующими деятельность геологических организаций; противоречия между содержанием геологической задачи, ее обеспеченностью необходимым фактическим материалом и сроками работ, директивно установленными для ее "окончательного" решения, при фиксированном уровне ассигнований и ограниченности в различного рода ресурсах. В результате инертности организационных структур, определяющих разделение труда между различными группами исполнителей, имеют место многочисленные примеры использования малоэффективных в геологическом и экономическом отношениях технологических процессов там, где уже разработаны и апробированы передовые технологии. Отмеченные противоречия в существенной мере оказывают влияние на конкретных исполнителей работ, лишая их возможности свободного принятия решений, основанных только на логике исследовательского процесса в рамках исследовательской системы "человек-природа".

Возвращаясь к общей группировке отказов третьего модуля, связанных с низкой точностью наблюдений, можно констатировать наличие соответствующего математического аппарата для анализа надежности количественных методов, возможность его применения для методов полуколичественных и очевидную целесообразность разработки для методов качественных.

### **Отказы геолого-интерпретационного модуля**

К отказам четвертого модуля поисковых методов отнесены реальные и возможные ситуации пропуска поискового объекта, зафиксированного в исследуемом поле или полях метрически-достоверной аномалией, из-за ошибок в процедурах выделения, классификации, количественной оценки аномалий и собственно прогнозирования по наблюдаемым данным. Аномалии от объекта в таких случаях либо отбраковываются, либо местоположение аномалообразующего объекта определяется ошибочно.

Не останавливаясь подробно на анализе структуры отказов этого типа, отметим лишь, что в большинстве случаев последние возникают из-за нарушения требования соответствия между реальной, всегда конкретной геологической и экономической ситуацией на конкретном поисковом участке или площади и используемой схемой интерпретации и прогнозирования, основанной часто на усредненных и даже абстрактных критериях принятия решения.

Так, например, при использовании статистических методов выделения аномалий на фоне помех весьма часто используются критерии, основанные на предположении о равенстве априорных вероятностей. Фактически же для любого поискового участка эти величины не равны, а всегда конкретны и могут использоваться в расчетах, принципиально меняя пороги принятия решений.

Также весьма существенной ошибкой, приводящей к отказу модуля, является абсолютизация точности прогнозирования поисковых объектов. Для методов, у которых поисковый объект связан с создаваемой им аномалией, детерминировано, т.е. преимущественно для геофизических методов, вероятность таких отказов невелика. Но для методов с вероятностно-статистической связью такие ошибки, по-видимому, достаточно распространены.

Широкое внедрение в практику прогнозирования математических методов и ЭВМ не всегда приводит к существенному улучшению показателей качества и надежности модуля. Этот факт обусловлен тем, что известные алгоритмы машинного прогнозирования недостаточно учитывают качественное специфиче-

ское разнообразие геологических явлений различного порядка и форм отражения этих явлений в исследуемых полях. Обычно такие алгоритмы акцентированы на внешних, статических сторонах природных процессов, обуславливающих конкретное местоположение поисковых объектов и особенности воздействия объектов на окружающую среду (поисковые предпосылки и признаки), а также особенности влияния последней на экранирование форм отражения прогнозных факторов. Эти алгоритмы малоэффективны из-за их ориентировки не на содержательную часть исследуемых явлений, а на комбинации внешних характеристик или, другими словами, на "комбинации ощущений".

Проведение классификации и исследование структуры отказов четвертого модуля позволяет, прежде всего, оценить соответствие алгоритма, используемого при интерпретации и прогнозировании, фактическому уровню знаний о проблеме, конкретном районе или участке. Последнее, в свою очередь, обуславливает возможность количественной оценки надежности всего алгоритма, выделения в нем наименее надежных элементов и разработку приемов их резервирования.

### Отказы заверочного модуля

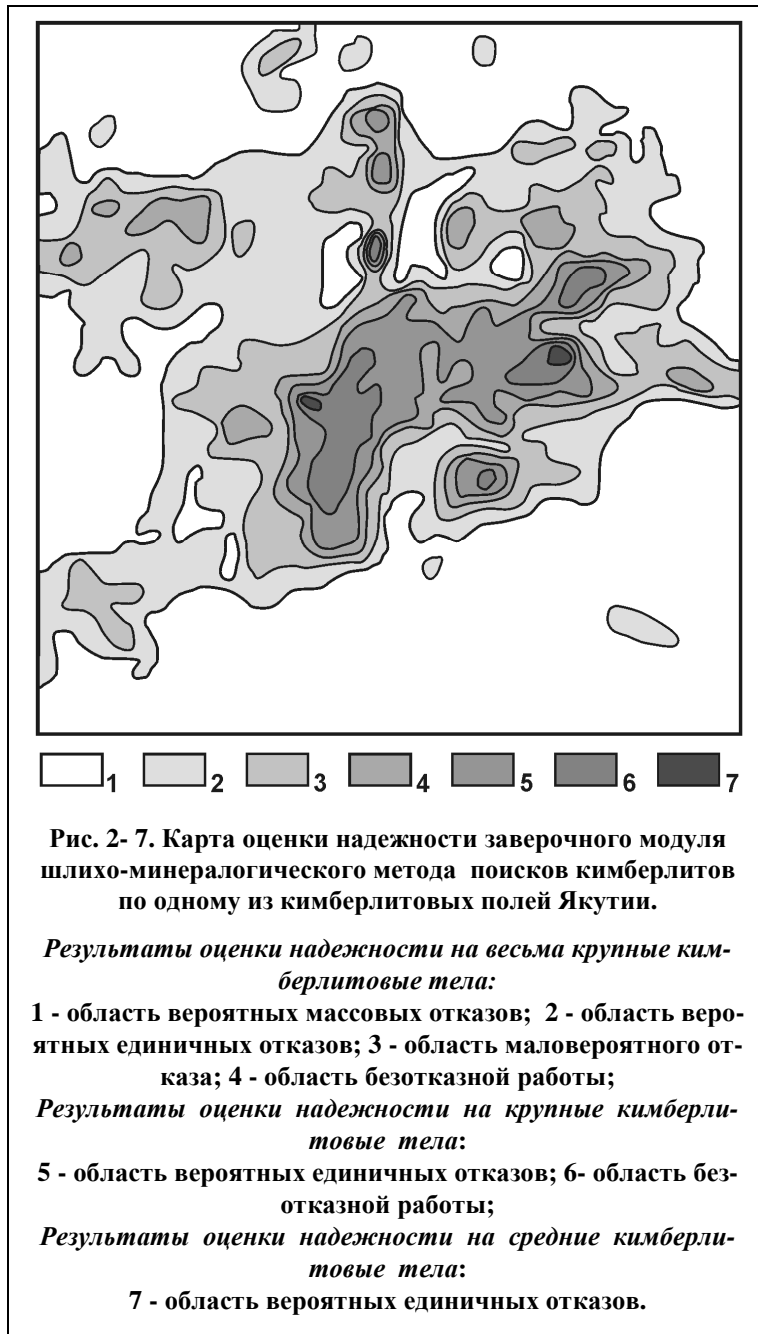
Последним, пятым модулем, определяющим надежность геолого-поисковых работ, является заверочный. К его отказам отнесены возможные и действительные ситуации, обуславливающие пропуск поискового объекта из-за его неподчинения при проверке прогнозных рекомендаций.

Для поисковых методов, характеризующихся детерминированным типом пространственной связи "аномалия-объект", исследование надежностных характеристик модуля не вызывает существенных затруднений. В данном случае среднее значение единичной вероятности его безотказной работы может быть оценено из соотношения количества аномалий с достоверно установленной геологической природой к общему количеству аномалий, рекомендованных для заверки. При наличии зависимости между интенсивностью аномалий и вероятностью их принадлежности к поисковым объектам, надежностные характеристики могут быть определены в соответствии с этой зависимостью.

Для поисковых методов с вероятностно-статистической пространственной связью "аномалия-объект" оценка надежности этого модуля выглядит иначе. В этом случае целесообразно выделение двух способов заверки: попытки непосредственного вскрытия поискового объекта системой горных выработок или буровых скважин и заверки рекомендаций одного метода другим или переходом с одной стадии работ на другую.

Оценка надежности первого варианта заверочных работ достаточно проста при известных геометрических характеристиках регулярной составляющей минимально - промышленного поискового объекта. На рисунке №2.-7. приведена карта районирования одного из кимберлитовых полей Якутии в соответствии с надежностными характеристиками пятого модуля шлихо-минералогического метода.

Здесь, в зависимости от размеров объекта, выделены области, характеризующиеся практически гарантированной безотказной работой модуля, области возможных массовых отказов и области вероятных единичных отказов. В соответствии с приведенной картой указанный район можно считать практически не



опоискованным на средние, мелкие и очень мелкие объекты, в то время как уже имеется опыт промышленной отработки весьма мелких трубок.

Второй вариант заверочных работ предполагает необходимым помодульный анализ надежностных характеристик метода, используемого при заверке, или комплекса методов, применяемых на следующей стадии или подстадии работ.

### **Понятие о резервировании малонадежных элементов геолого-исследовательских систем, виды и приемы резервирования**

Проведенное выделение отказов для поисковых методов и прогнозно-поисковых комплексов предполагает разработку таких мероприятий, технологических схем и отдельных приемов, которые либо позволят полностью исключить возможность соответствующих отказов, либо, по крайней мере, в значительной степени минимизировать вероятность их проявления. Система таких мероприятий, очевидно, должна существенно увеличить надежность и геологическую эффективность поисков.

В практике геолого-поисковых работ широко распространены приемы комплексирования различных поисковых и вспомогательных методов. При этом использование нескольких методов или нескольких модификаций одного метода обычно предпринимается для решения как задачи повышения вероятности правильной идентификации аномалий от поисковых объектов, так и для решения задачи о повышении вероятности отображения объекта поисков в системе наблюдений хотя бы одним методом. С другой стороны, из практики проведения поисков широко известны такие, например, частные приемы повышения надежности, как: детализация электроразведочных аномалий, выявленных в результате электропрофилирования, методами электротондирования; локализация аномалий, выявленных при помощи аэромагнитной съемки, наземной магниторазведкой; проведение дополнительного бурения или опробования в точках, в которых по материалам рядовых работ получены аномальные характеристики; использование специальных систем заземления электродов при проведении электроразведочных работ в неблагоприятных для измерения уровнях; бурение параметрических скважин для проведения интерпретации геофизических данных; разработка мероприятий по повышению выхода керна, предупреждения и ликвидации аварий в скважинах, и т.д. и т.п.

С позиций теории надежности систем все методические приемы, мероприятия и технологические схемы выполнения работ, включая и комплексирование методов, направленные, в конечном счете, на повышение надежности систем и их элементов можно объединить в одну группу операций - **РЕЗЕРВИРОВАНИЕ МАЛОНАДЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**.

В основу **классификации приемов и способов резервирования** для повышения надежности геолого-поисковых систем представляется целесообразным положить классификацию отказов рассмотренную выше. При этом будем называть резервированием **внутренним**, если оно осуществляется в рамках основного поискового метода, **внешним**, если резервирование предполагает замену одного метода на другой. При этом внешнее резервирование может быть **общим**, если один метод полностью заменяется другим, или **раздельным**, если вспомогательный метод используется для повышения надежности только одного из модулей основного метода. В зависимости от времени установления отказа основного метода резервирование также подразделяется на **постоянное и замещением**. Первое из них используется в ситуациях, когда отказ основного метода вероятен, но точно не определен, второе - в ситуациях, при которых отказ установлен либо в ходе работ, либо после их окончания. Для каждого из перечисленных приемов разработаны способы количественной оценки соответствующих надежностных параметров ( ). Так же для каждого из пяти модулей существуют свои специфические приемы резервирования.

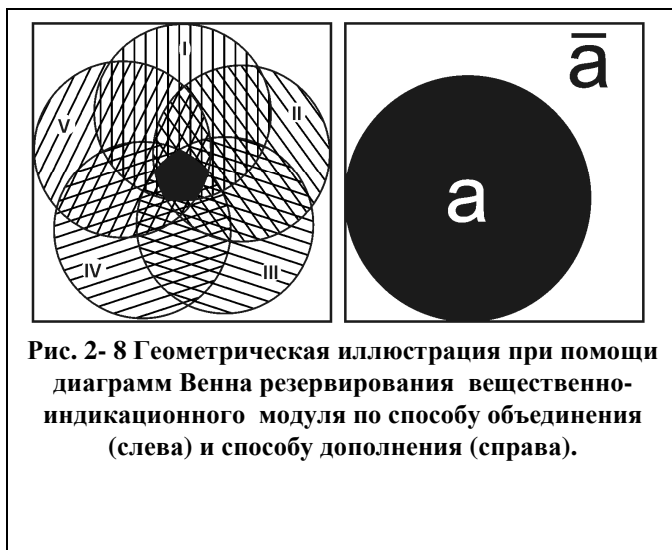
Методика резервирования поисковых методов в **ВЕЩЕСТВЕННО-ИНДИКАЦИОННОМ** модуле определяется, главным образом, статистическими и вещественно-генетическими связями между индикационными свойствами поисковых объектов. На рис. № 2.-8. (левая часть) при помощи логической диаграммы Венна иллюстрируется резервирование поискового комплекса в первом модуле **по способу объединения**. Здесь условно вся совокупность поисковых объектов показана в виде совокупности точек составляющих площадь квадрата. При этом часть объектов обладает одним индикационным свойством, часть вторым, часть третьим и т.д. (показаны окружностями с римскими цифрами). Важно, что для ситуации изображенной на рисунке проявление одних индикационных свойств не связаны с проявлением других какой-либо значимой корреляционной связью.

Тогда, очевидно, что при выделении аномалий раздельно по каждому из методов, основанному на соответствующих индикационных свойствах, вероятность отражения объекта по совокупности признаков существенно возрастает (отношение общей заштрихованной площади в квадрате к площади квадрата), т.е. в данном случае выделение аномалий по каждому из методов осуществляется независимо от результатов работ остальными методами. Очевидно, что при положительной корреляционной связи контрастности проявления индикационных свойств увеличения вероятности безотказной работы первого модуля поискового комплекса может не происходить (совмещение окружностей).

Важным следствием из анализа рисунка является вывод о том, что при попытке выделить такие аномальные участки, которые бы отражались во всех пяти (из показанных на рисунке) исследуемых полях соответствующими аномальными эффектами, вероятность отражения объекта резко уменьшается (отношение площади черного пятиугольника к площади квадрата).

Интересно, что в практике поисков кимберлитовых трубок в Якутии одно время широко использовался прием разбраковки (классификации) локальных магнитных аномалий по степени кимберлитоперспективности при помощи легких модификаций электроразведки. Предполагалось, что трубки достаточно магнитны и высокопроводящи, и что количество локальных магнитных аномалий, передаваемых для заверочного бурения, на этой основе будет существенно уменьшено. Однако, как показали дальнейшие исследования, корреляционной связи между намагниченностью и электропроводностью трубок не наблюдается, а высокомагнитные и хорошо проводящие трубки встречаются вообще в единичных случаях.

В правой части рисунка 2-8, также при помощи диаграммы Венна иллюстрируется резервирование **по способу дополнения**. Этот способ основывается на индикационных свойствах поисковых объектов, контрастность проявления которых связана обратной корреляционной связью.



**Рис. 2-8** Геометрическая иллюстрация при помощи диаграмм Венна резервирования вещественно-индикационного модуля по способу объединения (слева) и способу дополнения (справа).

В этом случае вероятность отражения объекта хотя бы одним методом в комплексе из двух методов в наиболее простом случае равна сумме двух единичных вероятностей.

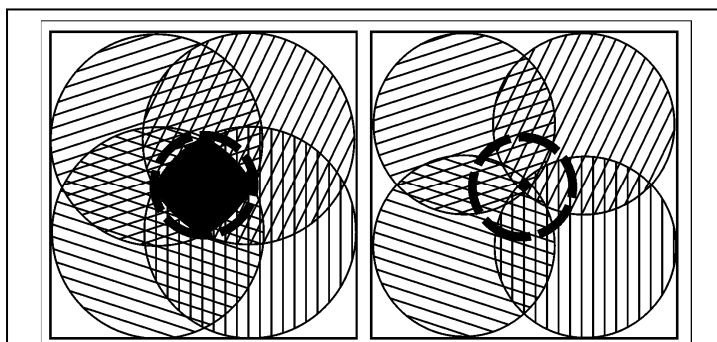
В качестве примера внешнего резервирования по способу дополнения можно привести данные по содержанию в кимберлитах серы и магнитной восприимчивости этих пород. Обратная корреляционная связь между этими параметрами свидетельствует, по-видимому, о влиянии режима сера-кислород на минеральную форму железа в некоторых разновидностях кимберлитов и позволяет предполагать эффективность метода вызванной поляризации при поисках слабомагнитных железистых диатрем. Это предположение нашло подтверждение и на

практике.

Имеются и описаны также другие примеры резервирования методов по способам объединения и дополнения, разработаны методика количественной оценки результатов резервирования, принципы построения высоконадежных поисковых комплексов с малой вероятностью отказа в первом модуле.

Резервирование малонадежных элементов во втором, в **ЛАНДШАФТНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ** модуле может быть проведено использованием нескольких поисковых методов или их модификаций, основанных на индикационных параметрах, связанных в объекте положительной корреляционной связью, в отличие от компонентов вмещающей среды.

На рис. № 2.-9. при помощи диаграмм Венна иллюстрируется логический смысл этого приема резервирования, названного резервированием **по способу пересечения**. Здесь вся совокупность точек, составляющих поисковый участок, показана в виде площади квадрата. Та часть точек, которая соответствует поисковым объектам, показана в виде центрального круга. Другими кругами показаны совокупности точек на площади, обладающих аномальными значениями различных индикационных свойств. Очевидно, что при наличии корреляционных связей в объекте и их отсутствии во вмещающей среде удастся обнаружить большую часть поисковых объектов (рис. 2.-9. слева). При не выполнении этого условия (рис. . 2.-9. справа) возможна ситуация, что по совокупности аномалий объекты вообще не будут обнаружены.



**Рис. 2-9.** Геометрическая иллюстрация при помощи диаграмм Венна резервирования ландшафтно-геологического модуля по способу пересечения. Слева - индикационные характеристики объектов поисков обладают положительной корреляцией, Справа - характеристики без значимой корреляции.

Примером такого типа резервирования является использование мультипликативных и аддитивных показателей в практике геохимических поисков. Для рассмотренного способа резервирования также разработаны принципы количественных оценок и построения высоконадежной поисковой технологии ( ).

Резервирование второго модуля поискового метода может быть также внешним с применением соответствующего виду возможного отказа вспомогательного метода. Так, например, применение метода объемного моделирования магнитного поля на площадях распространения пород трапповой формации позволило разработать методику геологической редукции сложно дифференцированного магнитного поля с выделением остаточных аномалий. При этом интенсивность выделяемых перспективных на трубки аномалий оказалась существенно ниже, чем вариации фонового поля на площадях распространения траппов.

Резервирование отказов **ТЕХНИКО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО** модуля по отношению к количественным и полуколичественным методам не требует специальных пояснений. Разработаны и описаны методики и алгоритмы построения поисковых сетей, гарантирующих подсечение объектов простых и сложных конфигураций ( ). Описаны приемы повышения надежности работ для полуколичественных методов.

Применительно к качественным методам документации повышение надежности поисков может быть достигнуто путем специального **психолого-профессионального исследования конкретной поисковой технологии**. В результате, в системе работ могут быть вычленены основные элементы, функционирование которых в значительной степени определяется личностными качествами исполнителей. Для каждого такого элемента может быть составлен **геолого-психологический паспорт**, содержащий в себе, с одной стороны требования к исполнителю (по уровню и специализации образования, по необходимому уровню специальной практики, психическим особенностям личности), а с другой стороны, необходимую форму организации "рабочего места" по внешним условиям (освещенность, температура воздуха), по обеспеченности аппаратурными, лабораторно-аналитическими, компьютерными и другими средствами, по оптимальным режимам выполнения работы, не допускающим перегрузку или другой дискомфорт исполнителя.

Также эффективными для повышения надежности поисков могут оказаться специальные приемы подбора исполнителей (профессиональное и психологическое тестирование), подготовки (создание и развитие у исполнителей адекватных чувственно-зрительных образов поисковых объектов, компонентов ландшафтно-геологической среды и др.) и поддержания у них высокой постоянной безотказной работоспособности. Для решения последней группы задач представляется весьма эффективным разработка специализированных имитационных геолого-поисковых игр, адаптированных к условиям поисков на конкретной территории.

При разработке приемов резервирования **ГЕОЛОГО-ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО** модуля целесообразно учитывать степень сложности решаемых интерпретационных задач.

Разработанные и описанные количественные характеристики применимы преимущественно для анализа качества и надежности работы исследователя при решении простых задач и в меньшей степени задач сложных.

Рассматривая варианты повышения надежности решения интерпретационных и прогнозных задач, отметим, что высокая вероятность безотказной работы здесь достигается благодаря использованию следующих основных методических приемов. Прежде всего, система свертки разнообразной геолого-геофизической и минералого-геохимической информации должна основываться на учете качественного разнообразия геологических явлений и форм их отображения в исследуемых полях, учитывать иерархию природных геологических систем и **строиться на основе логического правила о соподчинении понятий**, с включением в анализ ретроспективного и динамического аспектов. В результате, вся используемая при построении прогноза исходная информация должна быть сведена к трем основным группам факторов с их картографическим отображением по площади: поисковым предпосылкам, поисковым признакам, ландшафтно-геологическим условиям проведения работ.

При этом разработка легенды для карты условий поисков должна предполагать возможность оценки надежности выделения каждого из факторов поискового прогнозирования.

Вторым условием повышения надежности рассматриваемого модуля является **разработка альтернативных вариантов** прогноза. Здесь подразумевается, что в тех звеньях алгоритма интерпретации и прогнозирования, в которых однозначное решение недостаточно надежно, целесообразно использование нескольких его вариантов, составляющих в целом практически полную группу возможных событий. Важно отметить, что необходимость альтернативного прогнозирования вытекает не только из ограниченности конкретных знаний по проблеме, но и из возможного многообразия статических форм отображения единого динамического процесса рудообразования.

И, наконец, третьим условием повышения надежности интерпретации и прогноза является использование **принципа непрерывности** в этих операциях. Кроме естественной и очевидной одной стороны этого принципа, заключающейся в непрерывной коррекции результатов интерпретации и прогноза в соответствии с новыми поступающими данными, здесь имеется и вторая сторона. Ее сущность - в разработке и реализации на основе классификации отказов четвертого модуля: конкретной целенаправленной системы научно-исследовательских, опытно-методических и опытно-производственных работ, ориентированных на повышение надежности характеристик всех элементов этих операций.

Таким образом, анализ надежности геолого-интерпретационного модуля поисковых методов и прогнозно-поисковых комплексов, проводимый на основе классификации и исследования его возможных и действительных отказов, позволяет разделить элементы, составляющие алгоритмы названных процедур на достаточно надежные и ненадежные. На основе первых, т.е. надежных элементов, и с резервированием вторых, очевидно, может быть построена система непрерывного и альтернативного прогнозирования, наиболее адекватная реальным условиям состояния изученности проблемы и конкретной территории проведения поисков. Работы исследовательской и методической направленности, выступающие в такой системе как обязательные составляющие, гарантируют устойчивость системы по отношению к ее цели и изменчивость в соответствии с изменчивостью внешних условий.

Резервирование отказов **ЗАВЕРОЧНОГО** модуля для поисковых методов с детерминированной связью "аномалия - объект" не требует дополнительных обсуждений при заверке аномалий горно-буровыми работами. В этом случае система заверки должна основываться на разработке геометрической схемы расположения скважин или выработок, гарантирующей подсечение аномалообразующего объекта, разработке требований по глубине бурения и системам исследования в скважинах, включающих и геофизические методы, гарантирующих вскрытие объекта и его однозначную идентификацию. Для наиболее сложных случаев система заверочных работ должна обеспечивать необходимые данные для решения прямых задач и сравнения вычисленных аномальных эффектов от вскрытых аномалообразующих объектов с характеристиками аномалий, полученными при проведении полевых работ.

Для аномалий с пространственной вероятностной связью с объектом при небольших размерах выделяемых перспективных участков целесообразен также переход к методу прямого подсечения с расчетом сетей по приведенным в работах алгоритмам на минимально-промышленные поисковые объекты. В случае значительных размеров выделяемых перспективных территорий и использовании в качестве заверочных других поисковых методов или их комплексов необходима специальная оценка надежности последних.

#### **Виды и этапы оценки надежности.**

Познавательный, в значительной степени исследовательский характер геологоразведочного процесса при существенной неопределенности в знаниях о строении земных недр принципиально отличает геолого-поисковые системы от систем технических. И главное отличие между ними заключается в невозможности для многих реальных ситуаций получения абсолютно достоверных количественных характеристик каждого элемента, слагающего геолого-поисковую систему. Тем не менее, планирование геологических поисков предполагает необходимым определение методики работ, параметров поисковых сетей, представительности опробования и т.д., основанных на конкретных количественных расчетах.

Все это в целом, а именно: не возможность абсолютных решений, с одной стороны, и необходимость решений, приближенных к абсолютным, с другой стороны, позволяет использовать для количественной оценки надежности геолого-поисковых систем **итерационные методы решения** задачи, т.е. методы приближенного решения, основанные на последовательном приближении к конечному результату путем многократного применения вычислительной процедуры. При этом исходными данными для каждой последующей процедуры должны являться результаты предыдущих процедур, - а в нашем случае - апробация предыдущего решения на практике. Следствием этого процесса, очевидно, является некоторая последовательность решений, которая при выполнении определенных условий сходится к решению задачи, т.е. имеется возможность получения приближения, сколь угодно мало отличающегося от истинного решения.

В свете изложенного целесообразно **выделить три основных этапа оценки надежности** для каждой площади или региона. Условно их можно назвать подготовительным, текущим и завершающим. Основной **задачей подготовительного этапа** проведения исследований является адаптация теории надежности геологических поисков к практике работ в конкретном регионе и на конкретное полезное ископаемое. Этот этап включает в себя, прежде всего, системный анализ имеющихся данных по району с указанных позиций, проведение специальных исследований по получению дополнительных характеристик элементов, слагающих конкретную геолого-поисковую систему. В результате работ этого этапа может быть составлена технологическая схема оценки надежности производственных геолого-поисковых работ и сформулированы задачи перед тематическими, опытно-методическими и научно-исследовательскими работами, решение которых направлено на повышение устойчивости прогнозно-поисковых комплексов.

Оценка надежности поисков, осуществляемая **на текущем этапе**, предполагает соответствующие количественные расчеты при проектировании производственных исследований, при составлении отчета.

**Завершающий этап** оценок целесообразно осуществлять при завершении поисков по конкретному региону, району или участку. Важно отметить, что завершающий этап, как таковой, может рассматриваться лишь относительно некоторой исходной концептуальной схемы, определенной модели постановки и решения проблем, т.е. **по отношению к определенной парадигме, объединяющей геологические и экономические знания на конкретное время.**

Внутри отмеченных этапов, в зависимости от полноты используемых данных, целесообразно **выделение прикладного, ориентировочного и окончательного видов оценки надежности.** Первый из них

может использоваться, например, при формулировании геологического задания, второй - при составлении проекта или программы на производство работ и последний - при написании отчета .

### Количественные оценки качества и надежности систем.

Выше (см. рис 2.-3 и выражение 2.4) было показано, что **характеристика качества** простого (нерезервированного) поискового метода: средняя вероятность безотказной работы, определяется как произведение условных вероятностей безотказной работы каждого из пяти модулей.

Наиболее сложно оказывается обычно определить вероятность безотказной работы для первого, вещественно-индикационного модуля. Тем не менее, эта проблема практически всегда находит решение, на основе априорной информации по исследуемой территории, на основе адекватных аналогий, путем решения задачи о неслучайной выборке. На основе этого решения обычно устанавливается объем поисковой совокупности и диапазон ее вещественно-индикационных характеристик ( , ).

Количественные значения вероятности безотказной работы второго, ландшафтно-геологического модуля, по отношению к отказам, связанным со статистическим экранированием сигнала, довольно точно просчитываются на основе вероятностно статистических моделей. То же для отказов в связи с физическим экранированием определяется из соответствующих физических моделей. Отказы же из-за динамического экранирования моделируются на основе логико-семантических геологических моделей ( ).

При наличии данных о параметрах поисковой совокупности, изменчивости ландшафтно-геологической среды разработаны и используются количественные решения для определения вероятностей подсечения аномальных объектов различной контрастности, которые в большинстве случаев позволяют получить удовлетворительные решения для определения вероятности безотказной работы третьего, технико-метрологического модуля.

Аналогичным образом, как условные вероятности, вычисляются вероятностные характеристики качества для геолого-интерпретационного и заверочного модулей. Для четвертого модуля значение вероятности равно отношению количества аномалий, переданных под заверку, к их общему количеству, формально удовлетворяющим условиям аномальности для рассматриваемого метода. Для пятого модуля средняя единичная вероятность безотказной работы определяется из соотношения количества аномалий, заверка которых выполнена удовлетворительно, к их общему количеству, рекомендованному для проведения заверочных работ

В результате полученных помодульных характеристик качества может быть определена обобщенная характеристика качества поискового метода, реализованного или проектируемого для конкретной площади:

Переход от единичных вероятностных оценок качества к **количественным характеристикам надежности**, зависящим от объема реализаций (см. выражение 2.1), т.е. от  $T_{max}$ , для каждого из пяти модулей различен. Для первого модуля максимальное количество отказов оценивается через объем поисковой совокупности, для второго - через ее часть, обладающую повышенными значениями индикационного параметра. Для третьего модуля эта величина определяется из соотношения площади поискового участка и размера объекта поисков, для четвертого - через общее количество аномалий, выделяемых на площади, а для пятого - через их часть, рекомендованную для заверки. В результате, вероятность безотказной работы метода или комплекса методов, зависящая от объема наработки, определяется через произведение соответствующих помодульных вероятностей. Здесь, также как и в других случаях, для получения гарантированных результатов целесообразно использовать значения вероятностей с учетом их доверительных интервалов.

\*\*\*

Рассматривая надежностный подход при исследовании геологической эффективности геолого-поисковой системы, выше и в других публикациях, по возможности максимально строго, мы попытались провести "красной нитью" всего одно положение: **в результате осуществления комплекса геолого-поисковых работ в пределах перспективного участка или площади должны быть обнаружены практически все месторождения полезных ископаемых, представляющие реальную ценность для хозяйства в условиях данного геолого-промышленного района.** Само это положение вполне очевидно, лежит в основе проектирования любого комплекса геолого-поисковых работ и не требует каких-либо доказательств. Однако, в процессе исследования факторов, определяющих полноту его осуществления в конкретных условиях, и в результате попытки адаптации некоторых положений теории надежности систем к практике геологических поисков оказалось, что в целом ряде случаев, если не в большинстве из них, отмеченное положение не выполняется, по крайней мере, достаточно строго.

Рассмотренная концепция исследования эффективности геолого-поисковых работ с позиций теории надежности систем не претендует на полноту, законченность, внутреннюю непротиворечивость. На наш взгляд, выше описаны лишь некоторые основы подхода, которые нуждаются в доработке и прежде всего в доработке со стороны количественных методов исследования качества и надежности. Тем не менее, предла-

гаемый подход уже позволил получить много интересных и важных выводов для геологической практики, получить первые положительные геологические результаты.