

## **ЕДИНЫЙ ЦИКЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРОБОВАНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**Ю.Т. Усиков**

При поисках и разведке месторождений полезных ископаемых для оценки качественных и количественных их характеристик в нашей стране и за рубежом широко используются геофизические методы опробования. Как правило, большинство из них обеспечивают оперативность получения результатов опробования и высокую их достоверность.

Обоснование эффективности тех или иных геофизических способов опробования связано с организацией и проведением специальных исследований с целью проверки выполнения следующих требований:

- минимизации трудовых и материальных затрат геофизического способа опробования по сравнению с геологическим (борозда, керн, задира, валовая проба и т. п.);
- достоверности результатов геофизического опробования, которая должна быть сопоставима или выше достоверности материального геологического, выступающего в качестве контрольного.

Если проверка выполнения первого требования не представляет особых трудностей, то этого нельзя сказать в отношении второго по причине разнообразия и противоречивости предлагаемых решений (многочисленные методические указания, инструкции, стандарты, рекомендации) [2, 4]. Их критический анализ [5] показал, что все они прямо или косвенно базируются на единой «теории ошибок», разрабатывающей схемы экспериментов, модели измерений и математические приемы выявления и оценки грубых, систематических и случайных погрешностей. При проведении такого рода экспериментальных работ, как правило, результаты геофизического опробования сопоставляются с данными сопряженных контрольных геологических проб, достоверность которых удовлетворяет практиков при решении задач той или иной стадии геологоразведочного процесса. Надежность результатов таких исследований зависит от четкости и последовательности выполнения основных методических требований теории ошибок (обоснование схем экспериментов, моделей измерений, оптимальной системы аксиоматических построений теории ошибок и адекватных ей математических методов обработки экспериментальных данных; определение необходимого и достаточного объема контрольных выборок). Кроме этого необходимо соблюдения и технологических правил, т. е. воспроизводимости основных и контрольных замеров, а также достоверности последних. Что касается уровня погрешностей геофизических способов опробования, то он зависит от технических и геологических факторов, т.е. разрешающей способности применяемых средств и приемов измерений, состава и строения материала области замера, ее размеров и геометрии.

Результаты системного анализа существующих и официально принятых методик экспериментальной оценки точности геофизических способов опробования [2, 4, 5] свидетельствуют о том, что все перечисленные выше требования и правила часто не выполняются. Так, при организации и проведении контроля не всегда должное внимание уделяется обоснованию достоверных контрольных замеров и созданию условий максимальной сопряженности (повторяемости) основных и контрольных наблюдений, а также геологической обстановке экспериментальных работ. Схемы экспериментов и модели измерений обычно вообще не рассматриваются. Рекомендуемые различными методическими документами статистические методы оценки погрешностей характеризуются разнообразием и противоречивостью. Так, в ряде случаев, для решения одних и тех же задач они совпадают, но иногда существенно отличаются, что обусловлено отступлениями от классической системы аксиоматических построений теории ошибок при обосновании этих методов. Напомним, что классическая система аксиоматических построений теории ошибок предполагает следующие допущения: случайные погрешности измерений подчиняются нормальному закону с нулевым центром и не зависят от уровня измеряемых величин, а систематические постоянны по модулю и знаку во всем диапазоне измерений этих величин. При этом должны выполняться еще два важных требования – воспроизводимость (повторяемость) основных и контрольных замеров, а также достоверность контрольных. Таким образом, надежность результатов контроля точности измерений в геологии зависит от соблюдения всех этих требований, связанных как с технологическими условиями экспериментальных работ, т.е. степенью воспроизводимости основных и контрольных замеров и достоверностью последних, так и с методикой их проведения (схемы экспериментов, модели измерений, математические приемы выявления и оценки погрешностей).

Системный анализ существующих методик экспериментальной оценки точности геофизических способов опробования [5] и сама практика контроля свидетельствуют о том, что имеют место инвариантные научные факты, не укладывающиеся в рамки классической системы аксиоматических построений теории ошибок и противоречащие основным положениям этой теории. К ним относятся:

- зависимость абсолютных погрешностей от уровня значений измеряемых свойств и разнообразие форм их статистических распределений (методические факты);
- часто наблюдаемая невозможность воспроизводимости основных и контрольных замеров, обусловленная действием эффекта «неповторимости», а также отсутствие во многих практических ситуациях достоверных контрольных наблюдений (технологические факты).

Все вышеизложенное свидетельствует о необходимости развития теории и формирования единых методических и геолого-технологических основ экспериментальной оценки точности геофизических

измерений, а также обоснования эффективной системы контроля, иначе единого и рационального цикла такого рода исследований.

### **Формирование методических основ контроля**

Допустим, что технологические условия экспериментальных работ соответствуют требованиям теории ошибок. Тогда надежность результатов контроля полностью зависит от выполнения методических правил, т.е. обоснованности схем экспериментов, моделей измерений и эффективности математических методов выявления и оценки погрешностей, а также обоснования необходимого и достаточного объема контрольных выборок.

*Схемы экспериментов*, применяемые в геологии, зависят от решаемых задач контроля и условий его проведения. В принципе все они могут быть сведены к двум основным – схеме многократного контроля на одном уровне и схеме однократного выборочного контроля. Последняя является наиболее распространенной, обеспечивает минимум затрат, проста в организационном отношении и позволяет осуществлять оценку точности измерений на разных уровнях значений анализируемых геопараметров. Поэтому эта схема нами рассматривается как базовая.

*Модели измерений* зависят от схем экспериментов и функционального назначения контрольных наблюдений. Они служат для обоснования эффективных статистических методов оценки погрешностей измерений с учетом принятой системы аксиоматических построений теории ошибок. В условиях однократного выборочного контроля возможны две такие модели.

**Модель 1:**  $Z, X \{Z_j, X_j\} \dots j=1, 2 \dots q$ , где  $Z_j$  и  $X_j$  - пары точных и контролируемых замеров на разных уровнях  $j$ ,  $q$  - количество пар сопоставлений;  $X_j = Z_j + \Delta_j \{X\} + \Delta_{cj} \{X\}$ , где  $\Delta_j \{X\}$  - случайная погрешность,  $\Delta_{cj} \{X\}$  - систематическое смещение.

**Модель 2:**  $X_1, X_2 \{X_{1j}, X_{2j}\} \dots j=1, 2 \dots q$ , где  $X_{1j}$  и  $X_{2j}$  - пары равноточных замеров на уровне  $j$ ;  $X_{1j} - X_{2j} = \Delta_{1j} \{X_{1j}\} - \Delta_{2j} \{X_{2j}\}$ , где  $\Delta$  - случайные погрешности первого и второго замеров.

*Математическое обеспечение экспериментов.* Оценка погрешностей тех или иных средств и приемов измерений – это проблема метрологии [1]. Однако предлагаемые в настоящее время, математические методы ее решения не могут быть признаны достаточно надежными и эффективными. Особенно остро в технической литературе обсуждается вопрос выявления, оценки и исключения систематических погрешностей путем полной или частичной их компенсации. Основные трудности, часто непреодолимые, заключаются в самом обнаружении систематических погрешностей. Что касается их оценки и приемов исключения, то здесь вообще не существует общепризнанных рекомендаций. Поэтому в геологии обычно довольствуются приближенными решениями, а основное внимание направлено на выявление наличия систематических погрешностей и обоснование методических и технических решений их исключаящих. Согласно теории ошибок математические методы обработки контрольных выборок зависят не только от схем экспериментов и моделей измерений, но и принятой системы аксиоматических построений этой теории.

В условиях первой модели измерений и классической системы аксиоматических построений теории ошибок аналитическое выражение этой модели принимает следующий вид:

$$X_j = Z_j + \Delta_c \{X\} + \Delta_j \{X\} \text{ или } X_j = Z_j + \Delta_j \{X\},$$

где  $\Delta_c \{X\}$  - постоянное систематическое смещение,  $\Delta_j \{X\}$  - случайная погрешность, которая не зависит от уровня  $j$  и подчиняется нормальному закону,  $\Delta_j \{X\}$  - общая погрешность ( $\Delta_j \{X\} = \Delta_c \{X\} + \Delta_j \{X\}$ ). Для этих условий несложно обосновать универсальные и эффективные модели оценки систематических и случайных погрешностей контролируемого метода измерений:

$$\Delta_c \{X\} = \Sigma (Z_j - X_j) / q, \quad X'_j = X_j + \Delta_c \{X\},$$

где  $X'_j$  - исправленное на систематическое смещение значение  $X_j$ . Тогда общие ( $\Delta_j$ ) и случайные погрешности ( $\Delta_j = X'_j - Z_j$ ) не зависят от уровня  $j$ , подчиняются нормальному закону, а их стандартные отклонения могут быть вычислены по формуле:

$$S \{\Delta\} = [\Sigma (X_j \{X'_j\} - Z_j)^2 / q]^{0.5}.$$

Границы доверительных интервалов распределения этих погрешностей ( $L_{1,2,j}$ ) определяются из выражения:

$$L_{1,2,j} = \bar{X}_j + t \cdot S \{\Delta\},$$

где  $\bar{X}_j$  - номинальное значение уровня замераемой величины,  $t$  - коэффициент вероятности, соответствующий нормальному интегралу вероятностей.

В условиях второй модели измерений возможна оценка только случайных погрешностей контролируемого метода и соответствующих им границ доверительных интервалов посредством вычисления среднеквадратического их отклонения по формуле:

$$S \{\Delta\} = [\Sigma (X_{1j} - X_{2j})^2 / 2q]^{0.5}.$$

Таким образом, при выполнении классической системы аксиоматических построений теории ошибок, достаточно легко сформулировать содержание основных понятий контроля, обосновать оптимальные характеристики точности результатов измерений и методы нормирования погрешностей.

Однако системный анализ существующих методик экспериментальной оценки точности геофизических способов опробования [5] и сложившаяся практика свидетельствуют о разнообразии и противоречивости математических моделей, предлагаемых для выявления и оценки систематических и случайных погрешностей.

Обычно применяются модели, базирующиеся на классической системе аксиоматических построений теории ошибок, но для узких классов контрольных выборок, в предположении, что в каждом из них абсолютные погрешности не зависят от уровня значений анализируемых величин [2] (анализ на уровнях). Но иногда для оценки погрешностей используются модели, учитывающие независимость от этого уровня относительных погрешностей [4] (общий анализ), что не требует разбиения контрольных выборок на классы. Все это связано с попытками преодолеть отрицательное влияние на надежность результатов контроля действия эффекта “относительности”, иначе зависимости погрешностей, форм и параметров их статистических распределений от уровня значений оцениваемых геопараметров [5]. Учет этого эффекта с помощью моделей трехпараметрической логнормальной функции позволил обосновать обобщенную систему аксиоматических построений теории ошибок, достаточно хорошо адаптированную к условиям контроля точности измерений в геологии. При этом используются преобразования исходных переменных типа:

$$Y_j = \text{Ln} | X_j \{ Z_j \} + C |,$$

где  $Y$  и  $X \{ Z \}$  – новые и исходные переменные,  $C$  – постоянная величина.

Тогда обобщенная система аксиоматических построений теории ошибок может быть сформулирована следующим образом: *систематические и случайные погрешности, как составляющие общей погрешности измерений, линейно связаны с уровнем значений оцениваемых геопараметров; при этом систематические смещения постоянны по знаку, а случайные характеризуются отклонениями противоположного знака с нулевым центром, подчиняясь трехпараметрическому логнормальному закону.*

С помощью трехпараметрических логнормальных преобразований исходных переменных были обоснованы математические модели выявления грубых, систематических и случайных погрешностей геофизических способов опробования, адекватные этой системе аксиоматических построений [5, 7]. Они учитывают линейную зависимость абсолютных погрешностей от уровня значений оцениваемых геопараметров и асимметрию случайных равновероятных погрешностей противоположного знака, т.е. трехпараметрический логнормальный закон их распределения.

#### Математические модели оценки погрешностей

1. Оценка однородности экспериментальной выборки по критерию Кочрена:

$$G = \max. (Y_{1j} - Y_{2j})^2 / \sum (Y_{1j} - Y_{2j})^2 \dots, \quad (1)$$

где в условиях модели измерений 1 имеем:  $Y_{1j} = \text{Ln} | X_j + C |$  и  $Y_{2j} = \text{Ln} | Z_j + C |$  или в условиях модели 2:  $Y_{1j} = \text{Ln} | X_{1j} + C |$  и  $Y_{2j} = \text{Ln} | X_{2j} + C |$ . Эмпирическое значение  $G$  сравнивают с теоретическим  $G_r$  для принятого уровня значимости и числа степеней свобод. Если  $G < G_r$ , то гипотеза об однородности контрольной выборки не отвергается и наоборот. Необходимое условие:  $r (|Y_{1j} - Y_{2j}|, X_j) = 0$ , где  $r$  – коэффициент корреляции.

2. Оценка общих или случайных абсолютных  $M_{aj} \{ X \}$  и относительных  $M_{oj} \{ X \}$  погрешностей:

$$M_{aj} \{ X \} = (X_j + C) \cdot (\exp(\pm t \cdot S_y) - 1) \dots, \quad (2)$$

$$M_{oj} \{ X \}, \% = 100 \cdot M_{aj} \{ X \} / \bar{X}_j \dots, \quad (3)$$

где  $\bar{X}_j$  – номинальный уровень исходной переменной;  $S_y$  – среднее квадратическое отклонение новой переменной, определяемое по формулам:  $S_y = [\sum (Y_{1j} - Y_{2j})^2 / q]^{0.5}$  (модель измерений 1) или  $S_y = [\sum (Y_{1j} - Y_{2j})^2 / 2 \cdot q]^{0.5}$  (модель измерений 2);  $t$  – коэффициент вероятности, соответствующий нормальному интегралу вероятностей.

3. Определение границ доверительных интервалов распределения общих или случайных погрешностей заданной вероятности:

$$L_{1,2j} = \bar{X}_j + M_{aj} \{ X \} \dots \quad (4)$$

4. Оценка значимости систематических смещений между результатами основных и контрольных замеров по критерию Стьюдента:

$$T = | \bar{d} | \cdot \sqrt{q} / S_d \dots, \quad (5)$$

где  $T$  – эмпирическое значение критерия;  $\bar{d} = \sum d_j / q$ ;  $d_j = Y_{1j} - Y_{2j}$ ;  $S_d$  – среднее квадратическое отклонение  $d_j$ ;  $q$  – объем контрольной выборки. Значения  $T$  сравниваются с теоретически возможными  $T_r$  при принятом уровне значимости и числе степеней свобод. Если  $T < T_r$ , то гипотеза об отсутствии систематических смещений принимается и наоборот.

5. Исключение значимых систематических погрешностей из контролируемых замеров.

5.1. Модель трехпараметрической логнормальной функции:

$$X_j' = \beta + \gamma \cdot X_j \dots, \quad (6)$$

где  $X_j$  и  $X_j'$  – основные и исправленные значения,  $\gamma = \exp(\Delta_c)$ ,  $\Delta_c = \sum (\text{Ln} | Z_j + C1 | - \text{Ln} | X_j + C1 |) / q$ ,  $\beta = C1 \cdot (\gamma - 1)$  при  $r ( (\text{Ln} | Z_j + C1 | - \text{Ln} | X_j + C1 |), X_j ) = 0$ .

5.2. Модель, учитывающая постоянство относительных отклонений новой переменной:

$$X_j' = A + K \cdot X_j \dots, \quad (7)$$

где  $K = (\bar{Z}_j + C1) / (\bar{X}_j + C1)$  и  $A = C1 (K - 1)$  при  $r ( |Z_j + C1| / |X_j + C1|, X_j ) = 0$ .

#### Формирование геолого-технологических основ контроля

На качество контроля точности геофизических измерений в геологии и уровень погрешностей влияют геологические и технологические факторы [6]. К технологическим факторам, от которых зависит надежность результатов контроля, относятся:

- отсутствие во многих практических ситуациях достоверных контрольных замеров;
- нарушение условий воспроизводимости основных и контрольных наблюдений.

Что касается уровня погрешностей, то он обусловлен геологическими и техническими факторами. Действительно, рассматриваемые в качестве контрольных, результаты геологических способов опробования по причине погрешностей их определения не всегда безоговорочно могут приниматься за истинные значения измеряемых геологических свойств. С другой стороны, на надежность результатов экспериментальных работ оказывает влияние и действие принципа “неповторимости” основных и контрольных замеров, так как обычно они производятся в пространственно несовпадающих областях. Таким образом, часто нарушаются основные технологические требования теории ошибок, т.е. обязательная воспроизводимость измерений и достоверность контрольных.

*Формализация основных понятий контроля и причины погрешностей.* Основными понятиями метрологического обеспечения контроля точности измерений в геологии выступают замер (результат опробования) в пункте наблюдения и его точность, рассматриваемая с позиции надежности замера и его представительности. Для формализации этих понятий воспользуемся аппаратом теории множеств. С этой целью введем следующие обозначения - область регистрации (ОР) и область отнесения (ОО). Первое - это подпространство, в котором непосредственно производится измерение, а второе - подпространство, к которому отнесено (приписано), замеренное в области регистрации свойство. Тогда прямой замер или данные опробования, в том числе и геофизического, того или иного геопараметра в пункте наблюдения - это результат измерения, произведенного в области регистрации, для которого последние пространственно совпадают ( $ОР = ОО$ ) или не совпадают ( $ОР \neq ОО$ ) с областью отнесения. В первом случае точность замера определяет его надежность, которая зависит от технических погрешностей, обусловленных разрешающей способностью средств и приемов измерений (применяемой геофизической аппаратуры и условий ее использования, методов интерпретации результатов геофизических измерений и т. д.); от размеров и геометрии областей регистрации и особенностей объекта измерения (минералогический и элементарный состав материала области регистрации, текстурно-структурные особенности его строения и т. п.). Во - втором, точность замера определяет его представительность, которая отражает уровень соответствия результата замера, произведенного в области регистрации, его математическому ожиданию в области отнесения (забой, ближайший район, разведочный блок и т. д.). Количественной характеристикой локального замера выступает сумма технических погрешностей и погрешностей распространения (аналогии) результата замера на область отнесения. В общем случае представительность локального замера зависит от его технических погрешностей, размеров и геометрии области отнесения и пространственной изменчивости, оцениваемых геопараметров в этой области, т. е. от тех факторов, которые непосредственно связаны с геостатистикой пространственных переменных.

*Эффект «неповторимости».* Как уже отмечалось, на надежность результатов контроля точности применяемых способов опробования, в том числе и геофизических, существенное влияние оказывает действие эффекта «неповторимости», т. е. пространственного несовпадения областей регистрации основных (ОРО) и контрольных (ОРК) замеров в предположении, что область отнесения того и другого замеров совпадает с областью регистрации контрольного ( $ОРК = ОО$ ). Теория множеств позволяет рассмотреть возможные модели взаимодействия всех этих областей и их границ, а, следовательно, и уровень надежности результатов экспериментальных работ по этому фактору (см. рис. 1). При этом  $ОРК \subset ОО$ ,  $ОРК = ОО$  и  $ОРК \cup ОО = 1$ , где  $\subset$  – символ включения множеств,  $(=)$  – символ совпадения множеств,  $\cup$  – символ пересечения множеств.

Классификация важнейших отношений между ОРО, ОРК и их границами позволяет выявить уровень надежности экспериментов в зависимости от силы действия эффекта “неповторимости” рядовых и контрольных замеров (табл. 1).

Таблица 1 – Важнейшие отношения между ОРО, ОРК и их границами

Модель	I	II	III	IV
$\Phi_1$	1	0	0	0
$\Phi_2$	1	1	0	0
$\Phi_3$	1	1	1	0

Признаки  $\Phi_1 - \Phi_2$  имеют следующий смысл:

$\Phi_1 = 1$  при  $ОРО = ОРК$  и  $\Phi_1 = 0$  при  $ОРО \neq ОРК$ ;

$\Phi_2 = 1$  при  $ОРО \cup ОРК = 1$  и  $\Phi_2 = 0$  при  $ОРО \cup ОРК \neq 1$ ;

$\Phi_3 = 1$  при  $ОРО_{г.} \cup ОРК_{г.} = 1$  и  $\Phi_3 = 0$  при  $ОРО_{г.} \cup ОРК_{г.} \neq 1$ .

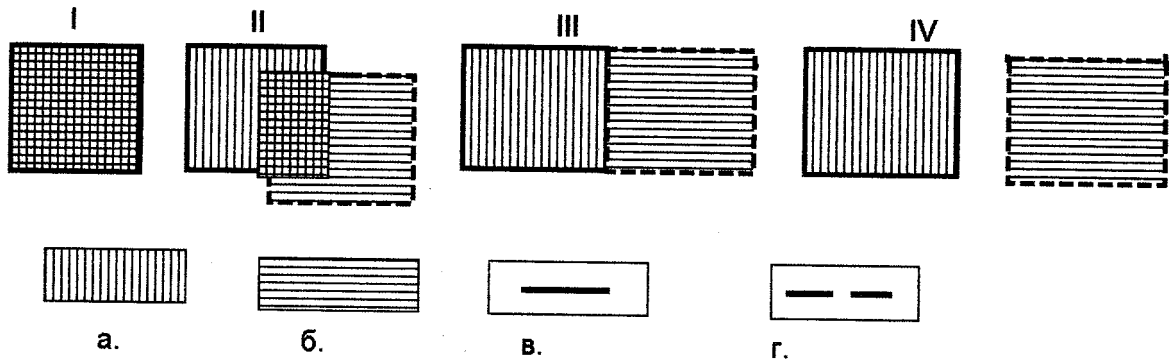


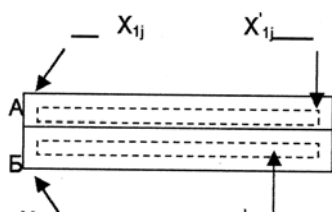
Рисунок 1 – Основные модели, отражающие действие эффекта «неповторимости» рядовых и контрольных замеров: а и б - области регистрации рядовых (ОРО) и контрольных (ОРК) замеров; в и г - границы областей регистрации контрольных (ОРК<sub>г</sub>) и рядовых (ОРО<sub>г</sub>) замеров

**Оптимизация технологии контроля.** Возможности экспериментальных работ при решении тех или иных задач контроля во многом зависят от выполнения основных требований теории ошибок к технологии ведения этих работ. Поэтому необходима их оценка для различных технологических ситуаций:

**Ситуация 1.** Основные и контрольные замеры разной точности (модель измерения 1.), когда последние могут рассматриваться как прецизионные (эталонные), и  $ОРО=ОРК=ОО$  (модель I. действия принципа «неповторимости»). В этих условиях по формулам 1 ÷ 7 возможна оценка технических погрешностей (общих, систематических и случайных) анализируемого метода измерений. При сопоставлении пар равноточных замеров (модель измерения 2) можно оценить лишь случайные технические погрешности контролируемого приема измерений.

**Ситуация 2.** Области регистрации основных и контрольных замеров по размерам и геометрии одинаковы, но пространственно не совпадают ( $ОРО \neq ОРК$ ). В этих условиях возможны модели «неповторимости» II, III и IV (рис. 1), что, как правило, не позволяет уверенно определять технические погрешности контролируемого метода измерений, и особенно при значительном уровне пространственной изменчивости анализируемого геопараметра. В этом случае в условиях модели измерений 1. по формулам 1 ÷ 3 возможна оценка уровня общих отклонений между результатами основных и контрольных замеров, а также наличие и величина систематических погрешностей результатов контролируемых измерений по сравнению с контрольными (формулы 5÷7). Даже в условиях модели измерений 2 определить случайные технические погрешности контролируемого метода не представляется возможным. Только посредством организации сопоставлений пар основных и контрольных способов опробования иногда удается произвести сравнительную их оценку по представительности (рис. 2), когда разности между замерами зависят от их технических погрешностей и погрешностей «аналогии». Сопоставление под номером 1. позволяет оценить правильность результатов контролируемого способа опробования по сравнению с контрольным (систематические смещения), а под номером 2 – допустимый уровень погрешностей геофизического способа опробования, определяемый путем сравнения серии парных равноточных замеров, полученных по данным геологического опробования в условиях различных ситуаций действия эффекта «неповторимости». Сопоставления под номерами 3, 4 и 5 позволяют оценить представительность геофизического способа опробования по сравнению с геологическим.

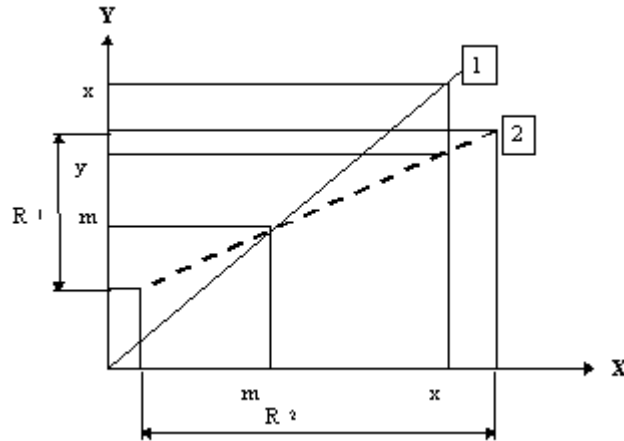
**Ситуация 3.** Эта ситуация практически мало отличается от предыдущей и лишь тем, что размеры и геометрия областей основных и контрольных замеров не совпадают. Так, часто области контролируемых геофизических способов опробования по этим параметрам отличаются от контрольных (борозда, керн, задирка, валовая проба). В этих условиях возможно проявление эффекта «крайгинга» [3], т. е. кажущееся систематическое смещение между результатами этих замеров. На низких уровнях значений исследуемых геопараметров, в условиях значительной пространственной их изменчивости, результаты геофизических замеров, размеры областей регистрации которых значительно меньше, чем у контрольных, оказываются ниже, а на высоких – выше по сравнению с контрольными. Причиной действия этого эффекта является высокий уровень изменчивости исследуемых геопараметров в области сопряженных замеров и отличие их геометрических баз, что приводит к нарушению эквивалентности между ними. Для выявления эффекта «крайгинга» необходимо провести сопоставления под номером 1 (рис.2.) и по критерию Стьюдента (5) оценить значимость систематических смещений между анализируемыми рядами  $X_j$  и  $X'_j$ . При отсутствии систематических погрешностей выявить действие эффекта «крайгинга» можно сравнением их дисперсий по критерию Фишера  $F=S^2\{X'_j\}/S^2\{X_j\}$ . При равенстве этих дисперсий замеры признаются эквивалентными, т.е. одинаковой представительности, и наоборот. Таким образом, в условиях рассмотренной ситуации при правильных контрольных замерах возможна оценка значимости систематических смещений контролируемых методов измерений и уровня их представительности по сравнению с контрольными.



1.  $X'_{1j} - X_{1j}$  и (или)  $X'_{2j} - X_{2j}$
2.  $X_{1j} - X_{2j}$
3.  $X'_{1j} - X'_{2j}$
4.  $X'_{1j} - X_{2j}$
5.  $X'_{2j} - X_{2j}$

Рисунок 2 – Полная система видов парных сопоставлений в условиях однократного выборочного контроля: А и Б – области парных основных и контрольных замеров (модель «неповторимости» II, III, IV); 1 ÷ 5 – полная система видов парных сопоставлений;  $X'_{1j}$  и  $X_{1j}$  – результаты основного (геофизического) и контрольного (геологического) опробования;  $X'_{2j}$  и  $X_{2j}$  – то же для второй пары замеров

Рисунок 3 – Эффект “крайгинга”: Y – шкала контрольных замеров (y); X – то же по данным геофизического опробования (x); m –



генеральное среднее ( $m = \bar{y} = \bar{x}$ ); 1. – линия равенства ( $y=x$ ); 2. – прямая регрессии, характеризующая действие эффекта “крайгинга”;  $R_1$  и  $R_2$  – размах значений ( $y$ ) и ( $x$ )

Действие эффектов “неповторимости” и “крайгинга”, а также отсутствие надежных контрольных наблюдений, во многом усложняют экспериментальную оценку точности геофизических способов опробования и снижают ее эффективность. Поэтому необходимы мероприятия (технические, методические), направленные на противодействие этим эффектам и фактам. К ним относятся: обоснование надежных эталонных замеров и максимальная их сопряженность с контролируемыми; соблюдение равных размеров и геометрии областей регистрации этих замеров с целью исключения действия эффекта “крайгинга”; разбиение контрольных выборок на классы с учетом моделей эффекта “относительности” и т. п. С другой стороны, в условиях однократного выборочного контроля на его эффективность существенное влияние оказывает выбор и обоснование необходимой и достаточной системы видов парных сопоставлений (см. ситуацию 2). Полная система всех возможных парных видов сопоставлений, как выяснилось, определяется числом сочетаний  $C^2_4 = 6$ , но часто для решения основных задач контроля можно ограничиться оптимальной триадной системой 1, 2 (3 или 4 или 5) и даже одним видом парных сопоставлений, если  $OPO = OPK$  (см. рис. 2).

**Пример 1.** Оценка значимости и уровня систематических погрешностей результатов рентгенорадиометрического опробования оловорудной зоны по сравнению с бороздовым.

Для определения уровня систематических смещений использовался фактический материал, приведенный в методических указаниях “Оценка достоверности данных ядерно-геофизических методов опробования, получаемых при разведке месторождений твердых полезных ископаемых” [4] (РД 41–06–125–90). Здесь на стр. 39 (табл. 1, 2, 3) приводятся результаты сопоставления геологического (ГО1) и рентгенорадиометрического (РРО) опробования 98 рудных интервалов. При этом весь диапазон содержаний олова разбивался на 5 классов. Анализ по этим отдельным классам показал, что данные ЯГМО систематически занижены по сравнению с данными геологического опробования (критерии знаков и Стьюдента). Также отмечалось, что систематические погрешности зависят от уровня содержаний олова, но как оценивать и исключать эти погрешности четких указаний не приводится.

Используя предлагаемую методику, были произведены вычисления систематических смещений данных ЯГМО без разбиения контрольной выборки на дробные классы. Ситуация 3. Схема эксперимента – однократный выборочный контроль. Вид сопоставлений 1 (рис. 2). Решаемые задачи – выявление и оценка общих и систематических погрешностей ЯГМО.

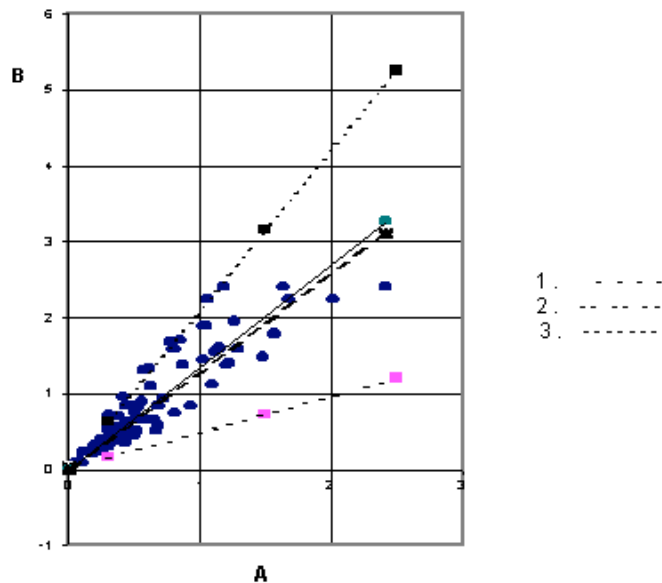


Рис.4. Диаграмма сопоставлений результатов основного рентгенорадиометрического (А) и контрольного геологического (В) опробования: 1 – границы доверительных интервалов общих погрешностей заданной вероятности  $P = 0.95$ ; 2 – прямая, исключающая систематического смещения в данных ЯГМО с помощью модели трехпараметрической логнормальной функции (формула 6); 3 – то же с учетом постоянства относительных отклонений новой переменной (формула 7)

#### Оценка однородности выборки и выявление систематических смещений.

По критерию Кочрена оценивалась однородность контрольной выборки по формуле 1, где  $Y_{1j} = \text{Ln}|X_j + C|$ ,  $Y_{2j} = \text{Ln}|Z_j + C|$ ,  $X_j$  – результаты геофизических измерений,  $Z_j$  – данные геологического опробования,  $C = -0.04$ . Эмпирическое значение критерия  $G = 0.049 < G(0.05) = 0.13$ , что свидетельствует об однородности выборки. По формуле 5 в этих же условиях вычислялось значение критерия Стьюдента ( $T$ ). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что систематические смещения в данных ЯГМО имеют место ( $T = 8.0 > T(0.05) = 2$ ).

#### Исключение систематических погрешностей

Исключение значимых систематических погрешностей из контролируемых замеров предлагается производить одним из двух приемов по формуле 6 или 7.

1. Модель трехпараметрической логнормальной функции (формула 6):

$$X'_j = -0.01 + 1.29 \cdot X_j,$$

когда  $C = -0.04$  и  $r((\text{Ln}|Z_j + C| - \text{Ln}|X_j + C|), X_j) = 0$ .

2. Модель, учитывающая постоянство относительных отклонений новой переменной (формула 7):

$$X'_j = -0.01 + 1.33 \cdot X_j,$$

когда  $C = -0.02$  и  $r(|Z_j + C| / |X_j + C|, X_j) = 0.009 \approx 0$ .

На рис. 5 приводится график сопоставления результатов ЯГМО и борзодового опробования, на котором отражены доверительные интервалы общих погрешностей при заданной вероятности  $P = 0.95$  (формулы 2, 4) и прямые, вычисленные разными способами для исключения систематических смещений. Результаты применения двух способов практически мало отличаются между собой. Согласно ситуации 3 и одному виду сопоставлений возможной оказалась лишь оценка систематических погрешностей ЯГМО. В этих условиях сравнение применяемых методов по их точности невозможно. Выявление действия эффекта “крайгинга” также невозможно по причине наличия систематических погрешностей.

Результаты опробования

а	0,26	0,22	0,16	0,19	1,15	0,09	0,14	0,09	0,08	0,47	1,41	0,12	0,14	0,29	0,07
б	0,27	0,25	0,21	0,13	1,1	0,09	0,27	0,07	0,08	0,62	1,24	0,16	0,12	0,21	0,14
в	0,2	0,18	0,19	0,28	0,76	0,06	0,07	0,1	0,04	0,56	0,81	0,34	0,14	0,14	0,35

Рисунок 5 – Результаты основных и контрольных способов опробования оловорудной зоны: 1 - кварциты, 2 - жилы и минерализованные прожилки, 3 - хлоритовые метасоматиты, 4 - тектонические трещины, 5 - грейзена, 6 - секции рядовых и контрольных борзодовых проб: а. - содержание олова по рядовой борзде (ГО1), б. - результаты рентгено-радиометрического опробования (РРО) по следу рядовой борзды, в. - содержание олова по контрольной борзде (ГО2)



**Пример 2.** Контроль представительности геологического и геофизического способов опробования на оловярудном месторождении.

Информация заимствована из инструкции по рентгенорадиометрическому опробованию малосульфидных оловярудных месторождений [2]. - Л.: "Руд.геофизика", 1985, стр.55. Контроль выполнялся в следующей последовательности (рис. 5):

- произведены рентгенорадиометрические измерения по полотну канавы в интервалах длиной 1 м. (РРО);
- по следу измерений отобраны метровые бороздовые пробы шириной 10 и глубиной 5 см. (ГО1);
- в сопряжении с основными отобраны контрольные при ширине борозды 20 и глубине 5 см. (ГО2).

Таким образом, наблюдается ситуация 3. Схема экспериментов - однократный выборочный контроль.

**Ситуация 3.** Рассматриваются три вида парных сопоставлений (рис. 2). Решаемые задачи - оценка уровня представительности геологического и геофизического способов опробования.

Результаты статистической обработки данных опробования по трем видам сопоставлений  $\{PPO(X1) - GO1(X2), GO1(X1) - GO2(X2) \text{ и } PPO(X1) - GO2(X2)\}$  приведены в табл. 2, где через X1 и X2 обозначены исходные данные опробования для каждого конкретного варианта сопоставлений.

Анализ статистических параметров вычисленных по формулам 1 – 5 показал:

- уровень сходимости результатов по трем способам опробования достаточно высокий ( $r\{X1, X2\} > 0.89$ );
- абсолютные значения расхождений между исходными данными основного и контрольного приемов опробования зависят от уровня содержаний олова в пробах ( $r\{|X1-X2|, X1\} > 0.61$ );
- такие же расхождения, но между трансформированными данными опробования, практически не зависят от уровня содержаний ( $r\{|Y1-Y2|, X1\} < 0.01$ );
- отсутствуют ураганные значения разностей результатов опробования ( $g\{Y1-Y2\} < g(0.01)=0.57$ );
- систематические смещения между анализируемыми рядами статистически незначимы ( $T\{Y1-Y2\} < T(0.05)=2.14$ ).

Результаты вычислений случайных погрешностей для каждого варианта сопоставлений, полученные по формулам  $2 \div 4$  приводятся в табл. 3.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки контрольных выработок по трем видам сопоставлений

Статистические показатели	Виды сопоставлений		
	РРО-ГО1 (X1,X2)	ГО1-ГО2 (X1,X2)	РРО-ГО2 (X1,X2)
Количество сопоставлений	15	15	15
Среднее содержание Sn (%) по ряду X1	0,331	0,325	0,331
Среднее содержание Sn (%) по ряду X2	0,325	0,281	0,281
Дисперсия содержание, D {X1}	0,134	0,163	0,134
Дисперсия содержание, D {X2}	0,163	0,060	0,060
Коэффициент корреляции, r {X1,X2}	0,98	0,89	0,91
Коэффициент корреляции, r {X1-X2 ,X1}	0,61	0,84	0,79
Константа в выражении $Y=Ln(X+C)$ , C	0,20	0,03	0,08
Коэффициент корреляции, r {Y1-Y2 , X1}	0,008	0,004	0,002
Критерий Кочрена, $g\{Y1, Y2\}$	0,33	0,42	0,30
Критерий Стьюдента, T{Y1,Y2}	0,82	0,13	0,58
Стандарт разностей (Y1-Y2), Sy	0,103	0,377	0,283

Таблица 3 – Случайные погрешности по трем видам сопоставлений при заданной вероятности  $P=0,68$  ( $t=1$ )



Вид сопоставлений	Величины погрешностей для 3-х уровней содержания Sn					
	Уровень 0,5%		Уровень 1%		Уровень 1,5%	
	$M_a$	$M_b$	$M_a$	$M_b$	$M_a$	$M_b$
РРО - ГО1	+0,08-0,07	+15,2-13,7	+0,13-0,12	+13,0-11,7	+0,18-0,17	+12,3-11,1
ГО1 - ГО2	+0,24-0,17	+48,5-33,3	+0,47-0,32	+47,2-32,3	+0,70-0,48	+46,7-32,0
РРО - ГО2	+0,19-0,14	+37,9-28,6	+0,35-0,27	+35,3-26,6	+0,52-0,39	+34,4-26,0

Данные этой таблицы свидетельствуют о том, что с ростом уровня содержания олова в пробах абсолютные погрешности возрастают, а относительные незначительно уменьшаются. При этом уровни погрешностей по результатам сопоставлений ГО1 - ГО2 выше, чем для РРО - ГО2 и поэтому представительность РРО не ниже представительности рядового геологического опробования ГО1.

На рис.6. приводится диаграмма сопоставлений результатов основного рентгенорадиометрического (РРО) и контрольного геологического (ГО1) опробования, а на рис. 7 – зависимость относительных отклонений между ними от уровня содержания олова.

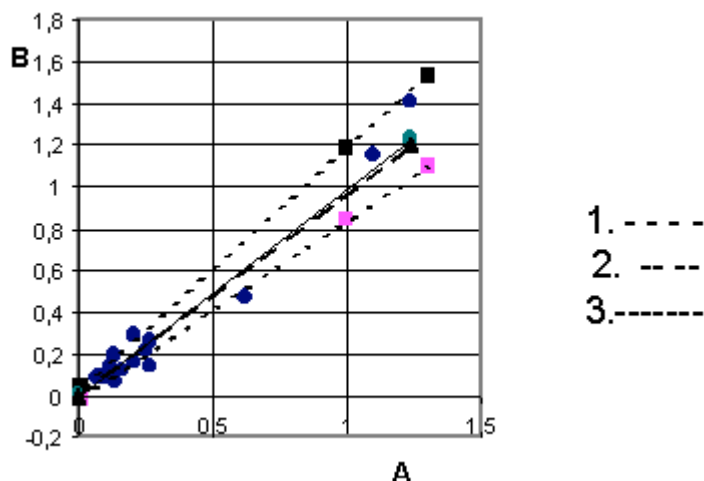


Рисунок 6 – Диаграмма сопоставлений результатов основного рентгенорадиометрического (А) и контрольного геологического (В) опробования: 1 – границы доверительных интервалов общих погрешностей заданной вероятности  $P=0.68$ ; 2 – прямая, исключающая систематические смещения в контролируемых замерах (А) с помощью модели трехпараметрической логнормальной функции (формула 6); 3 – то же с учетом постоянства относительных отклонений новой переменной (формула 7)

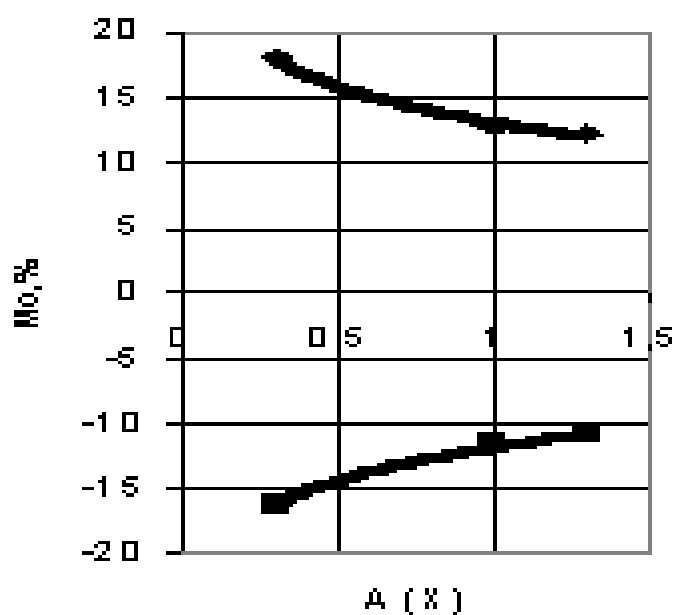


Рисунок 7 – Зависимость относительных отклонений между результатами основных и контрольных замеров (табл. 3., вид сопоставлений РРО - ГО1) от уровня содержания олова

Так как систематические погрешности при всех 3-х видах сопоставлений не обнаружены, то о проявлении эффекта "крайгинга", в первом приближении, можно судить по оценкам дисперсий распределений исходных переменных (табл. 2). Для первого вида сопоставлений он практически отсутствует. Что касается 2-

го и 3-го вариантов, то этот эффект возможно и имеет место (ограниченный объем выборки). Об этом свидетельствуют вычисленные значения критерия Фишера при теоретическом его значении  $F(0,05)=2,5$ :  $F(РРО-ГО1)=1,22$ ;  $F(ГО1-ГО2)=2,72$ ;  $F(РРО-ГО2)=2,23$ .

Таким образом, представительность рентгенорадиометрического опробования выше, чем бороздового. Учитывая его оперативность и низкую себестоимость, этот способ оценки качества оловянного оруденения в данных конкретных технологических условиях можно признать более эффективным по сравнению с геологическим.

#### Литература

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М.: Стандарт, 1985.
2. Инструкция по рентгенорадиометрическому опробованию малосульфидных оловорудных месторождений. Ленинград: Рудгеофизика, 1985.
3. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968.
4. Методические указания: Оценка достоверности данных ядерно-геофизических методов опробования, получаемых при разведке месторождений твердых полезных ископаемых (РД41 – 06 – 125 – 90). – Ленинград: Рудгеофизика, 1990.
5. Усиков Ю.Т. Достоверность геологоразведочной информации. М.: Недра, 1988.
7. Усиков Ю.Т. Экспериментальная оценка точности геологоразведочной информации // Разведка и охрана недр, 1992. № 8. С. 13-16.
8. Усиков Ю.Т. Оценка систематических погрешностей геологоразведочной информации в условиях однократного выборочного контроля // Разведка и охрана недр, N 2, 1997, с. 19-21.