

48-е заседание Международного научного семинара
им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики
геологической интерпретации геофизических полей»

П.И. Балк, А.С. Долгаль

АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ

РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

(ПРЕЗЕНТАЦИЯ МОНОГРАФИИ)

2022





Балк Петр Исаакович

Родился в 1947 г. в г. Потсдаме (Германия) в семье офицеров Советской Армии. В 1965 г. по месту службы отца окончил среднюю школу в г. Анива Сахалинской области, а в 1970 г. – математический факультет Иркутского государственного университета. В 1970–1973 гг. – стажер-исследователь в Институте геохимии Сибирского отделения АН СССР. В 1973–1975 гг. – аспирант очного обучения. В 1975–1977 гг. – старший научный сотрудник в Иркутском государственном университете. В 1977–1984 гг. – старший научный сотрудник в Иркутском Вычислительном центре Сибирского отделения АН СССР. В 1985–1994 гг. – старший, ведущий и главный научный сотрудник Казахского филиала

Всесоюзного института разведочной геофизики. По совместительству работал профессором в Казахском техническом университете, читал лекции в институтах повышения квалификации в различных городах СССР, работал по научным проектам Немецкого исследовательского сообщества. В 1994 году приглашен в филиал Института прикладной геодезии в г. Потсдам.

В 1975 г. – кандидат, в 1988 г. – доктор физико-математических наук. Область научных интересов: в начальный период – аналитические решения прямых и обратных задач гравитационного потенциала, методы искусственного интеллекта для доказательства теорем единственности (премия Сибирского отделения АН СССР за цикл работ по использованию доказательных вычислений на ЭВМ при изучении свойств линейных отображений); в последующие годы – методология теории решения прикладных обратных задач. Автор более 100 научных работ, преимущественно опубликованных в академических журналах: «Доклады АН СССР» («Доклады РАН»), «Физика Земли», «Геология и геофизика».



Долгаль Александр Сергеевич

Родился в 1958 г. в г. Свердловске. В 1980 г. окончил геофизический факультет Свердловского горного института. В 1980–1983 гг. – геофизик, начальник отряда Центральной геофизической экспедиции (пос. Хасын); в 1983–1986 гг. – старший геофизик партии Северо-Енисейской геофизической экспедиции (г. Лесосибирск); в 1986–1993 гг. – ведущий, главный геофизик партии Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции, в 1993–1997 гг. – главный геофизик Комитета по геологии и использованию недр Таймырского автономного округа (г. Норильск); в 1997–2002 гг. – главный геофизик Южной геофизической экспедиции (г. Абакан); с 2002 г. – ведущий,

главный научный сотрудник Горного института УрО РАН, по совместительству – профессор кафедры геофизики Пермского государственного научно-исследовательского университета (г. Пермь). Доктор физико-математических наук. Область научных интересов – рудная геофизика, математическое моделирование геопотенциальных полей и их источников, комплексирование геофизических методов. Основные труды посвящены математическим методам обработки и интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки, а также вопросам использования геофизических методов для геокартирования, прогнозирования и поисков рудных месторождений. Подготовил 5 кандидатов наук. Автор и соавтор более 300 опубликованных научных работ.



9 785915 224932

**П.И. Балк
А.С. Долгаль**

**АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ
ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ**

П.И. Балк, А.С. Долгаль

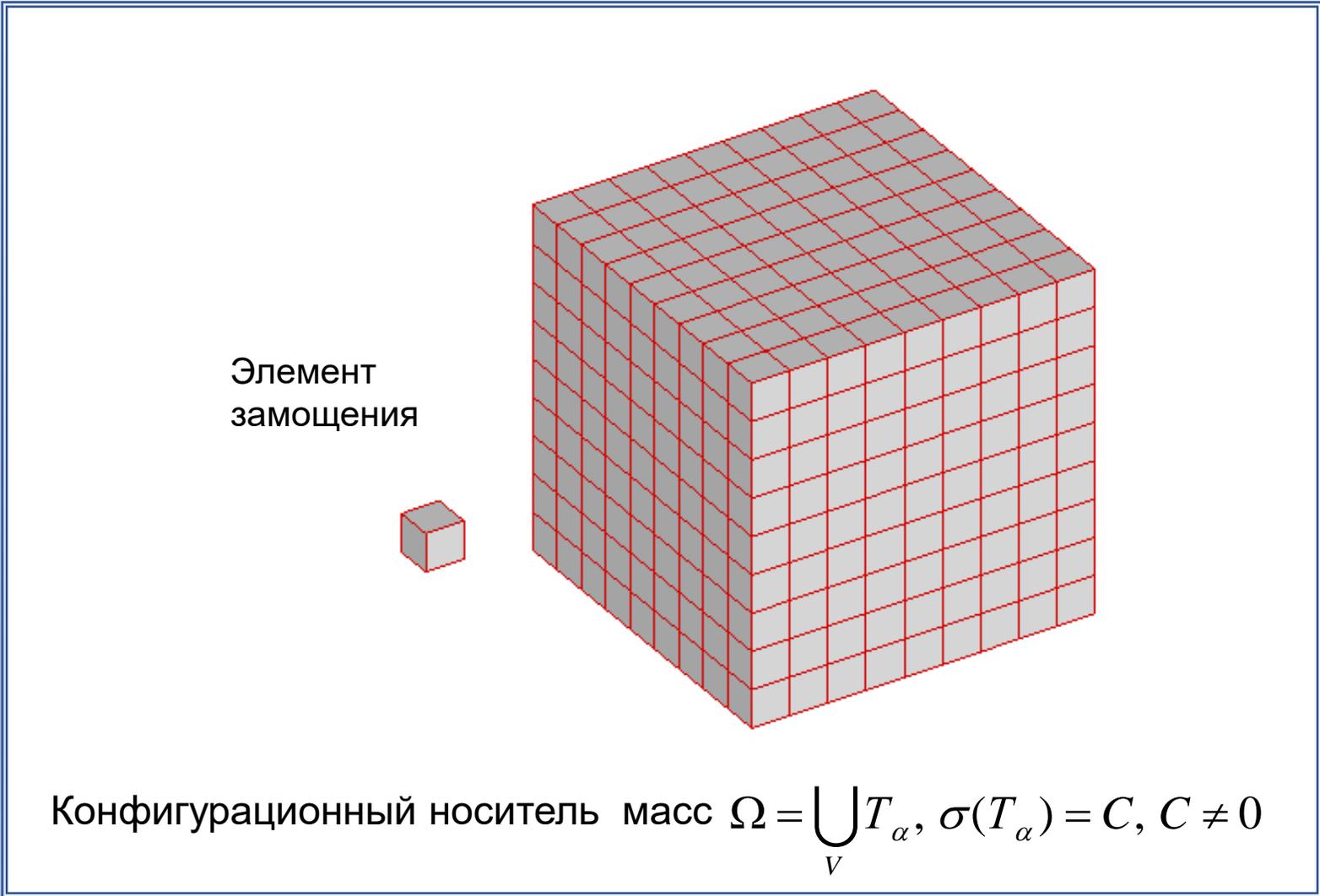
АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ



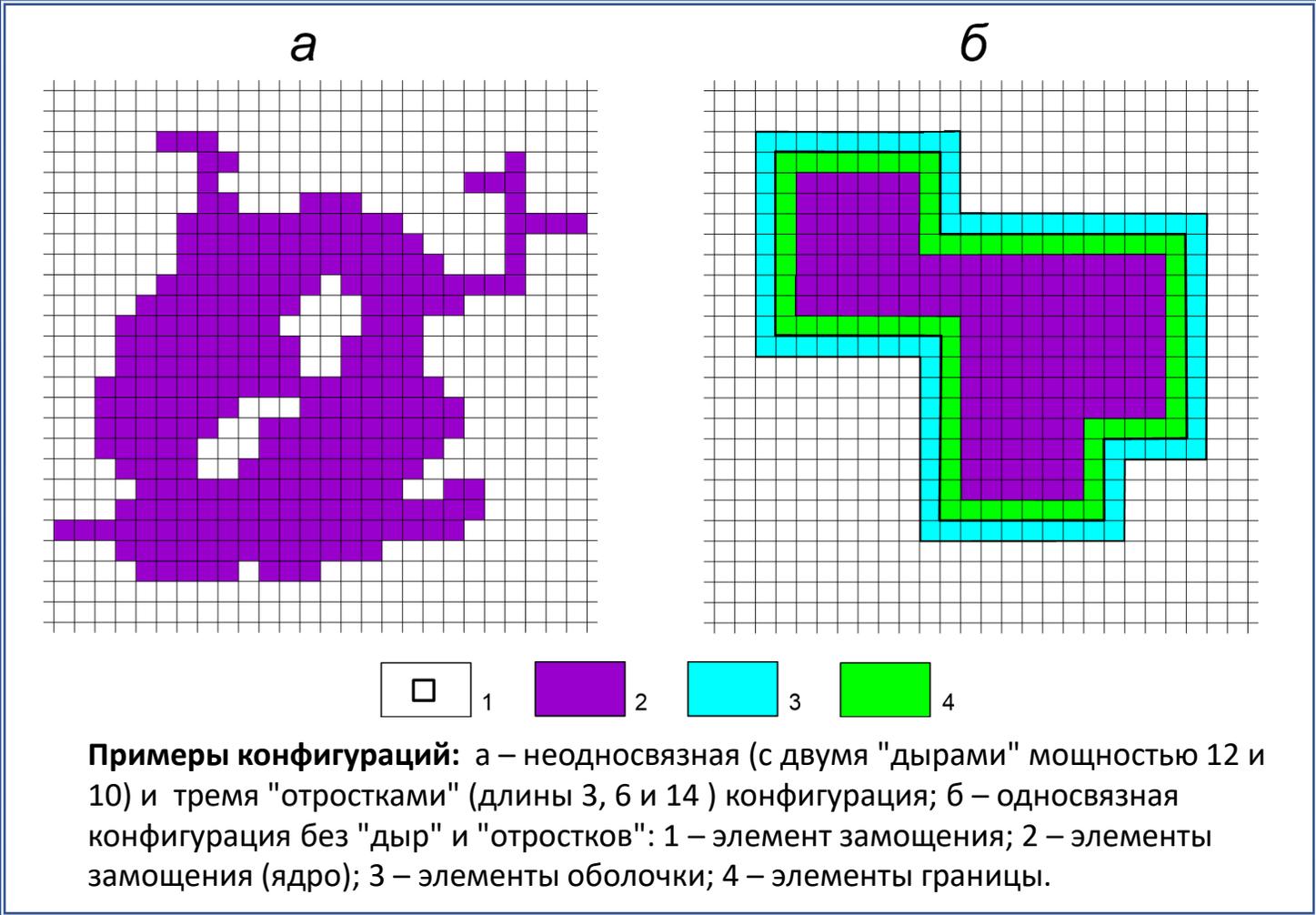
СЕМЬ СПОРНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ В ТЕОРИИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

1. *Признак состоятельности методов количественной интерпретации геопотенциальных полей может быть заимствован у классической теории решения некорректных обратных задач.*
2. *Вектор оценок параметров модели источников поля является безальтернативной математической формой представления результатов количественной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий.*
3. *Качество результатов интерпретации – это в основном вопрос критерия выбора наилучшего из множества допустимых решений обратной задачи.*
4. *Результат интерпретации в виде суммы оптимального решения обратной задачи и неулучшаемой оценки его точности можно считать практически исчерпывающим.*
5. *Увеличение объемов априорной информации и сужение за счет этого множества допустимых вариантов интерпретации позволяет повысить качество оптимального решения обратной задачи.*
6. *Добиться повышения достоверности результатов интерпретации можно за счет согласования приближенных решений обратной задачи, построенных различными методами.*
7. *Классические методы решения условно-экстремальных задач полностью обеспечивают потребности технологий интерпретации гравитационных и магнитных аномалий.*

**МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТА ГЕОПЛОТНОСТНОЙ СРЕДЫ, ПОСТРОЕННАЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМОЩЕНИЯ КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**



МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛИЕОБРАЗУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



ПРИНЦИП РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ МОНТАЖНЫМ МЕТОДОМ (РНК)

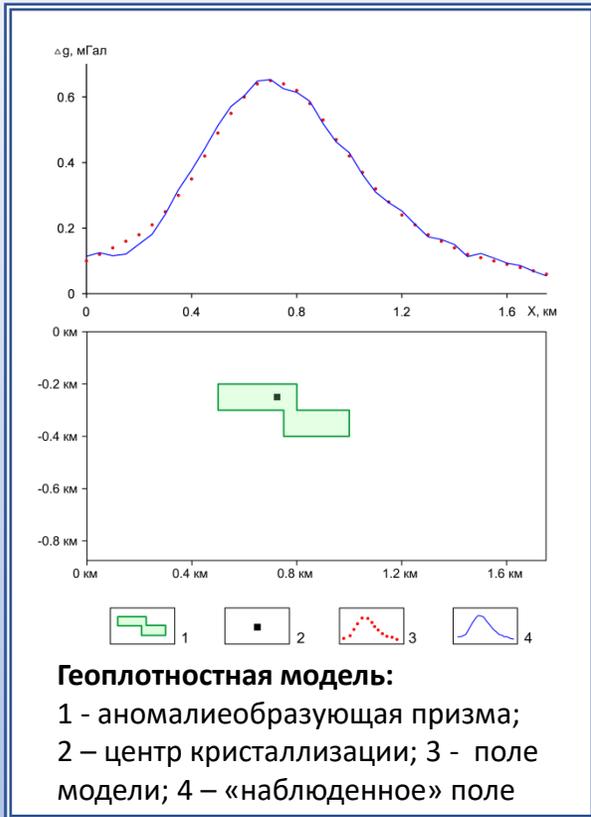
В простейшей постановке обратной задачи для изолированного тела Ω^T известной плотности $\sigma^T > 0$, монтажный принцип решения обратной задачи состоит в том, чтобы, отправляясь от заданной связной конфигурации Ω^0 , выстроить конечную последовательность $\Omega^0, \Omega^1, \dots, \Omega_n, \dots$, имеющую пределом некоторую область Ω^* , поле которой при подобранной плотности σ^* согласуется с измерениями $\tilde{U}_k, k = 1, 2, \dots, m$ гравитационного поля. Ассоциированная с $\{\Omega_n\}_n$ последовательность $\{\sigma_n\}_n$ "оптимальных" значений плотностей определяется из условия минимума среднеквадратической невязки подбора для каждого из соответствующих приближений к решению обратной задачи.

Произвол в выборе конкретного правила перехода от конфигурации Ω_{n-1} к конфигурации Ω_n ограничен здесь двумя требованиями:

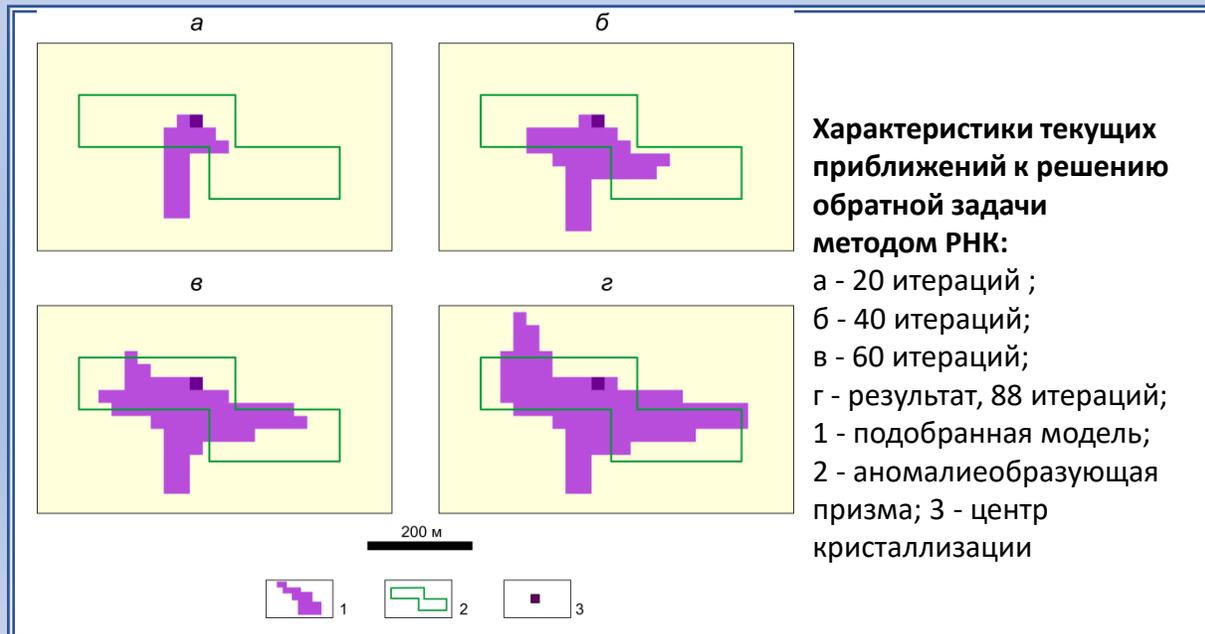
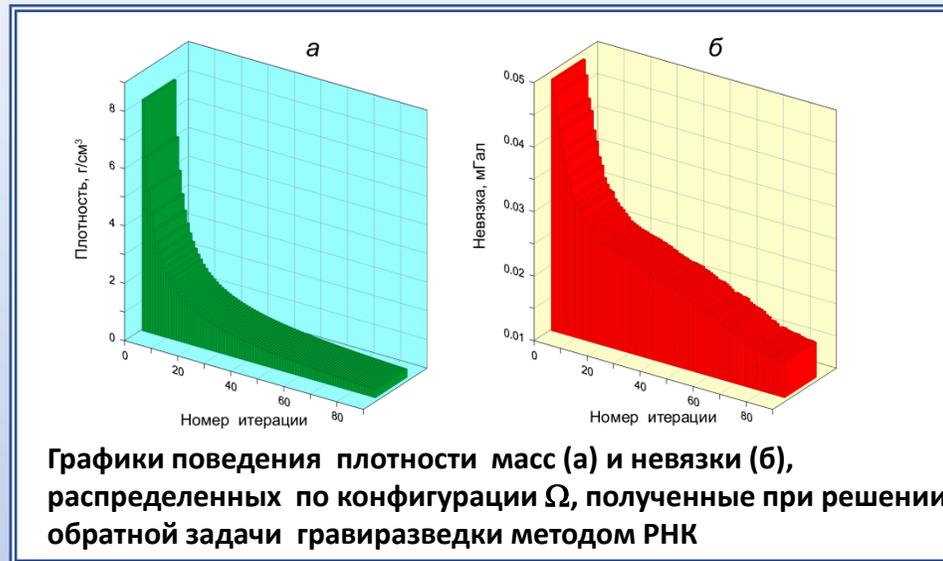
1. Обеспечивается условие оптимальности, означающее, что конфигурация Ω_n выбирается из множества пробных конфигураций, определенных заданным правилом.
2. Осуществляется эффективный контроль за соблюдением условия наследования конфигурацией Ω_n основных черт конфигурации Ω_{n-1} .

Если установить, что любое очередное приближение Ω_n может быть образовано путем внесения в ядро $\mathcal{Y}[\Omega_{n-1}]$ какого-то одного элемента из $O[\Omega_{n-1}]$, то монтажный принцип приводит к итерационному методу регулируемой направленной кристаллизации (РНК). На каждом шаге n наращивание ядра осуществляется за счет элемента $\omega_{\alpha_n}^{onm}$, который обеспечивает наименьшую среднеквадратическую невязку подбора. Критерием достижения решения является условие $\sigma_n^T \approx \sigma^T$.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ РНК

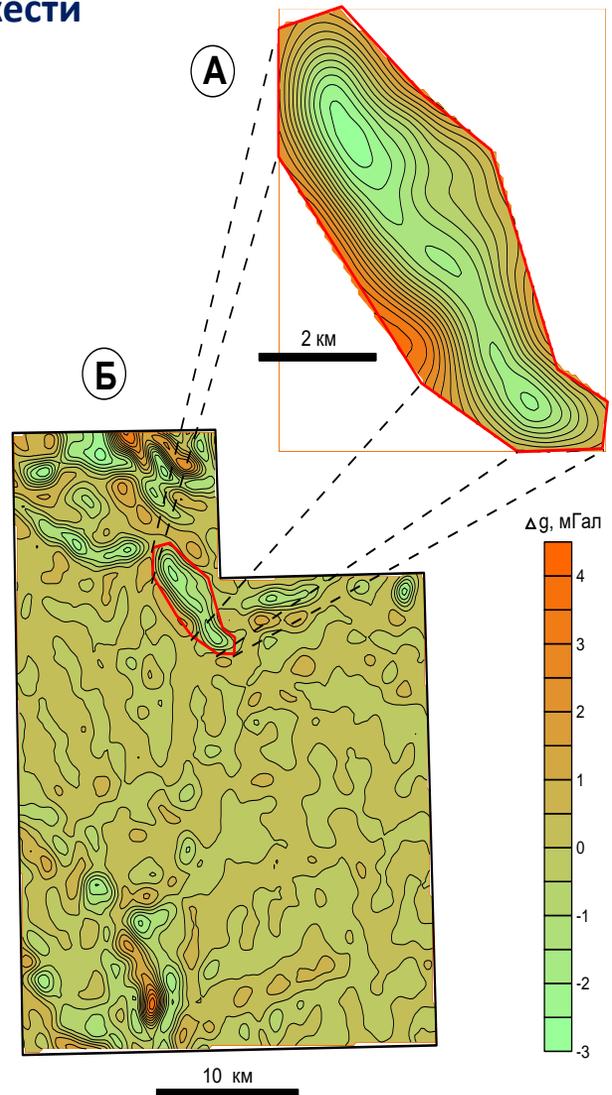


Номер итерации	Плотность тела, г/куб. см	Невязка полей, мГал
20	1.25	0.026
40	0.66	0.023
60	0.44	0.020
88 (результат)	0.3	0.016

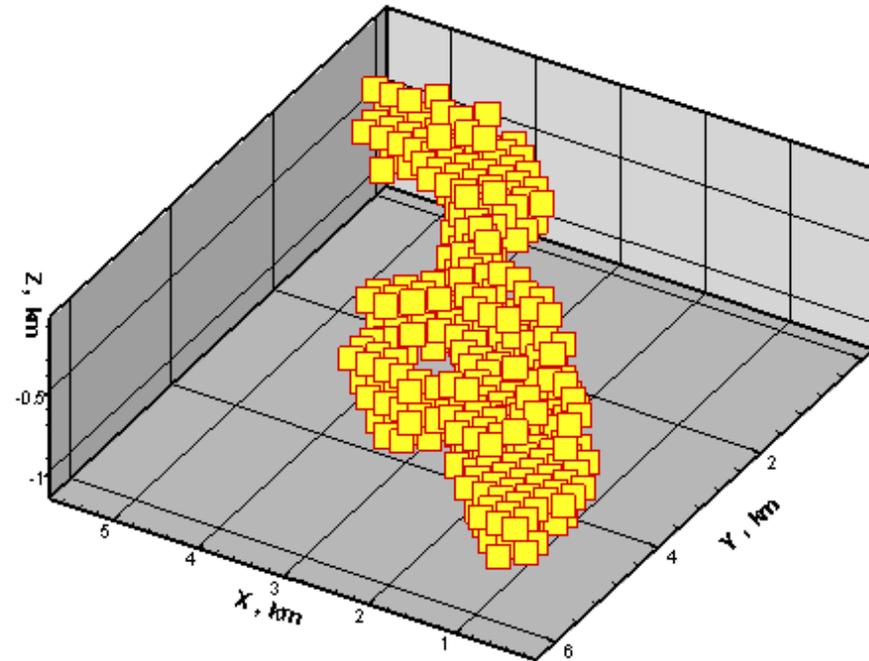


ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МОНТАЖНОГО МЕТОДА. ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ

Локальная аномалия силы тяжести



Объемная модель коры выветривания



Избыточная плотность -0.4 г/см^3

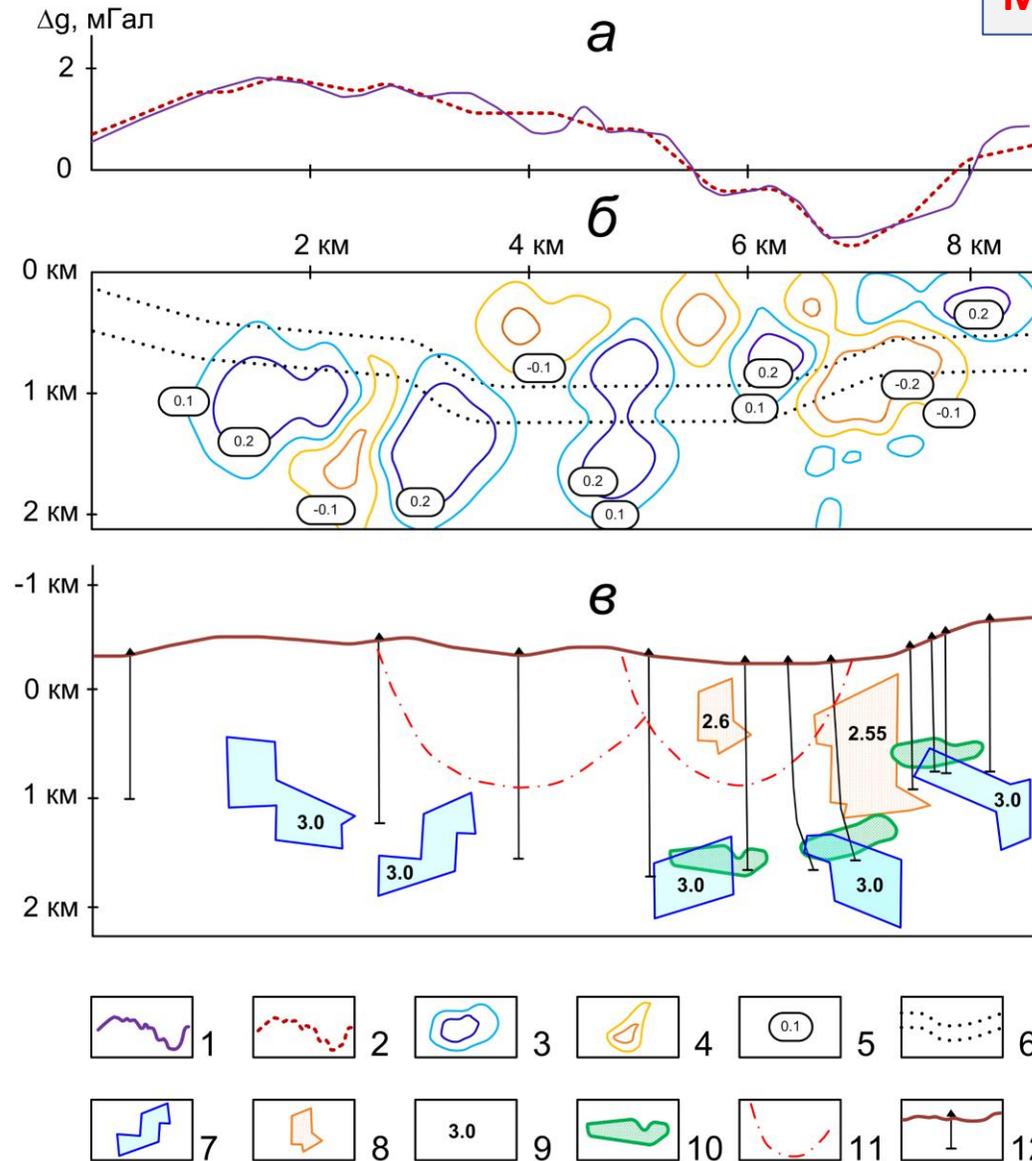
Элемент замощения – куб со стороной 200 м

Число итераций: 393

Невязка: $\pm 0.15 \text{ мГал}$

Время решения задачи: 2 мин.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МОНТАЖНОГО МЕТОДА. ТАЛНАХСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ПЛАТИНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД



Результаты моделирования геологического разреза Талнахского месторождения по гравитационному полю: а - графики полей; б - геоплотностной разрез, построенный методом накопления и разрастания масс, в - модель разреза, построенная монтажным методом: 1 - остаточная составляющая поля $\Delta g^{\text{ост}}$; 2 - поле подобранной модели; изолинии эффективной плотности: 3 - положительной, 4 - отрицательной; 5 - значения эффективной плотности, г/см^3 ; 6 - горизонт пород тунгусской серии; подобранные тела, обладающие: 7 - положительной, 8 - отрицательной эффективной плотностью; 9 - плотность подобранных тел, г/см^3 ; 10 - рудоносные интрузии; 11 - разрывные нарушения; 12 - буровые скважины.

Примечание: плотность вмещающих пород - 2.75 г/см^3

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАДИЦИОННОГО И КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Традиционный подход

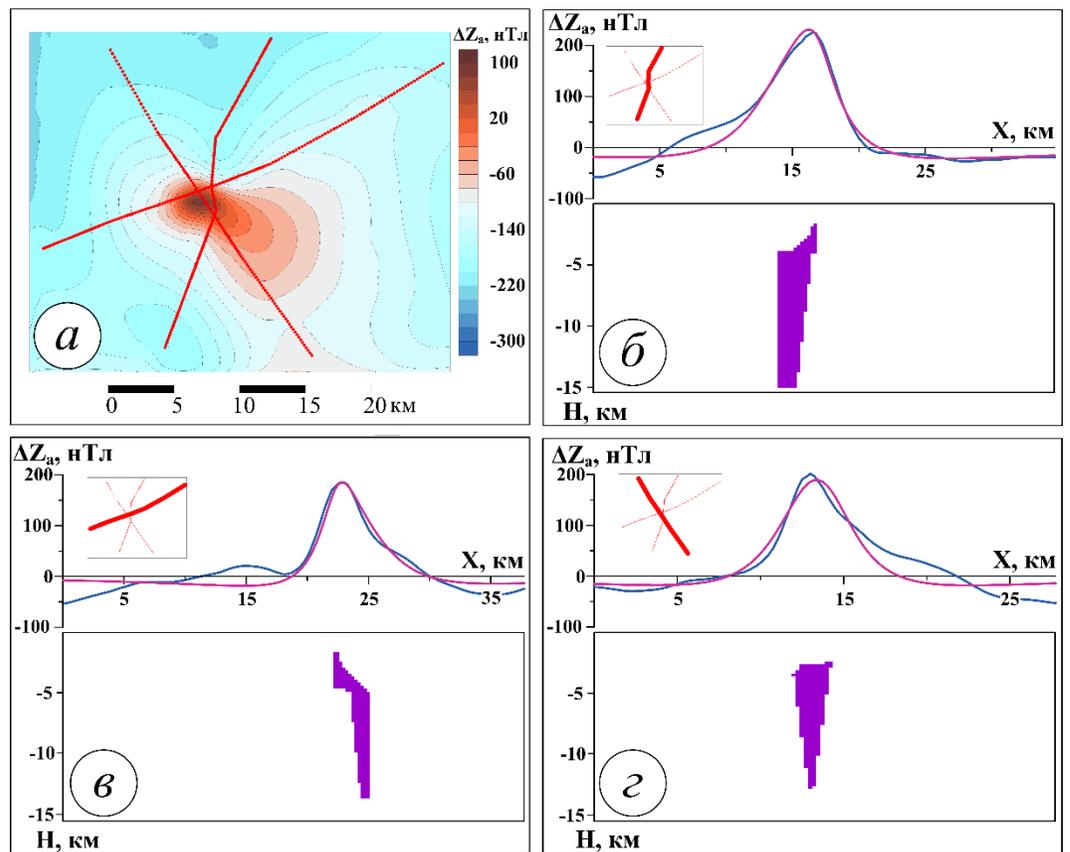
- Решение задачи выполняется в узком модельном классе источников M
- Априорная информация об источниках представляется в виде совокупности неравенств
- Необходимо построение начального приближения (“starting model”)
- Требуются точные плотностные характеристики моделируемых тел
- В вычислительном плане задача сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений с приближенно заданной правой частью
- Устойчивость решения обеспечивается за счет применения регуляризации

Конечноэлементный подход

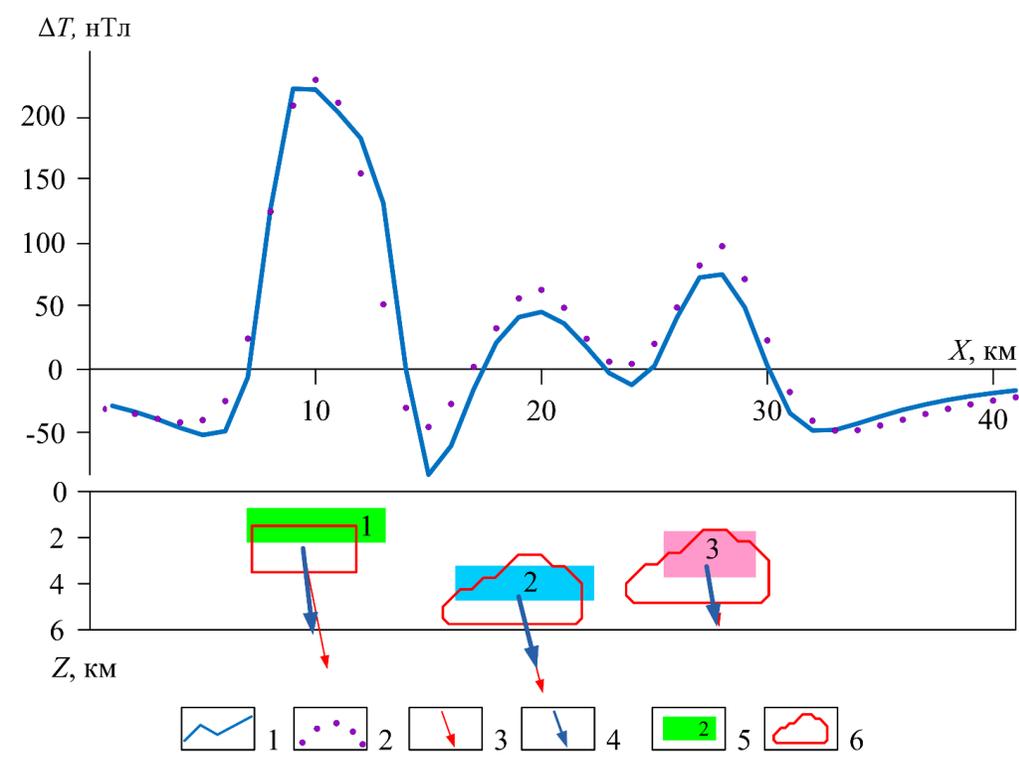
- Класс M весьма широкий и определяется размером элемента ω_α
- Допускается формализация разнородной информация о возмущающих объектах
- Достаточно указать по одному элементу ω_α , принадлежащему каждому источнику поля
- Возможно задание петроплотностных характеристик в интервальной форме
- В вычислительном плане задача сводится к построению и анализу пробных конфигураций в сочетании с процедурой одномерной оптимизации
- Устойчивость решения обеспечивает компактность множества допустимых решений и алгоритмизация учета априорной информации

Монтажный подход к решению обратной задачи снимает проблему неустойчивости в ее классическом понимании, так как конечноразмерность модели и природные ограничения на ее плотностные и геометрические параметры изначально приводят к компактному множеству возможных решений, а учет определенного объема априорной информации может стать гарантом обеспечения надежного решения поставленной геологической задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОРАЗВЕДКИ ПРИ НЕЧЕТКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ О НАМАГНИЧЕННОСТИ АНОМАЛИЕОБРАЗУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ: $J_{min} < J_s < J_{max}$

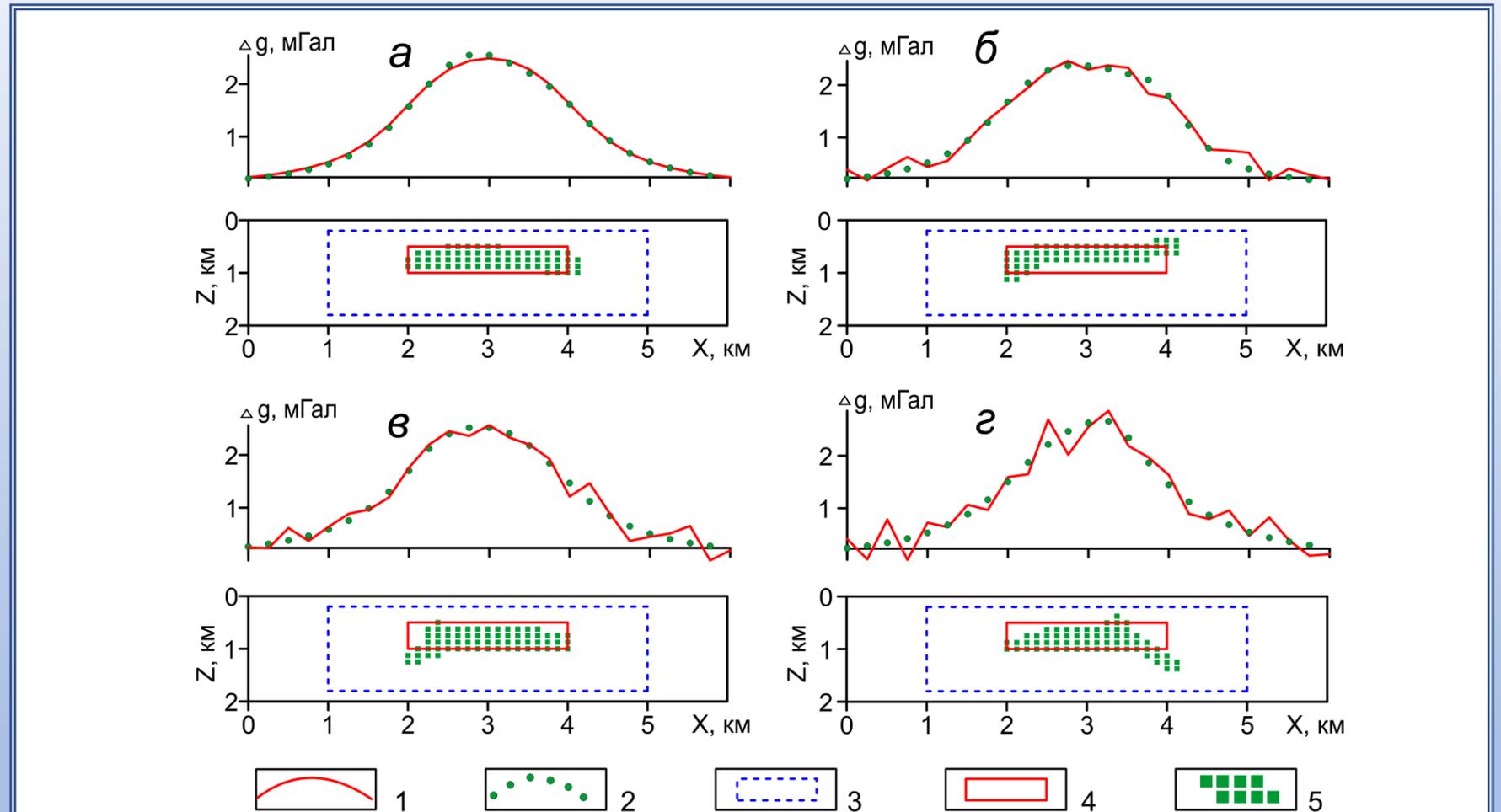


Наблюдаемое магнитное поле подводного вулкана 6,1 (а) и результаты решения обратной задачи магниторазведки с помощью монтажных технологий для трех галсов (б-г): 1 – исходное поле; 2 – модельное поле; 3 – аномалиеобразующий объект.



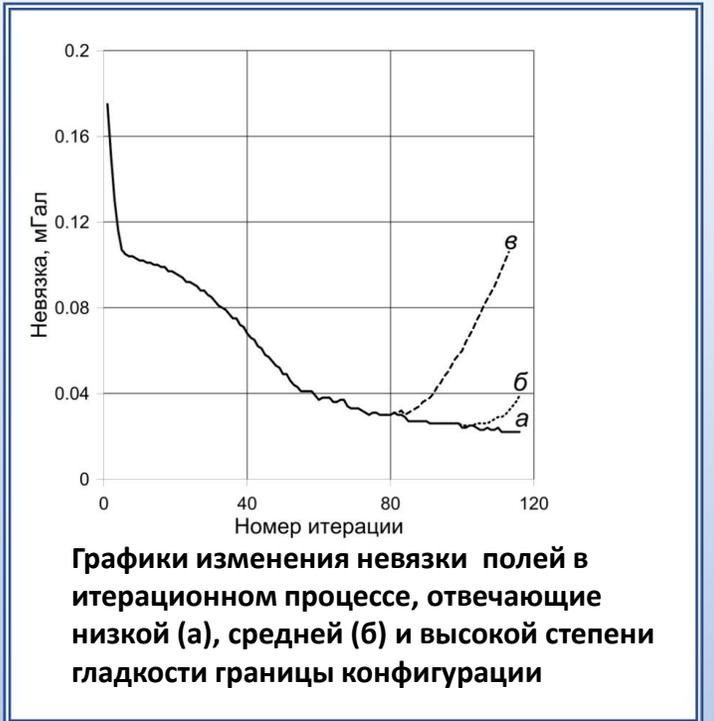
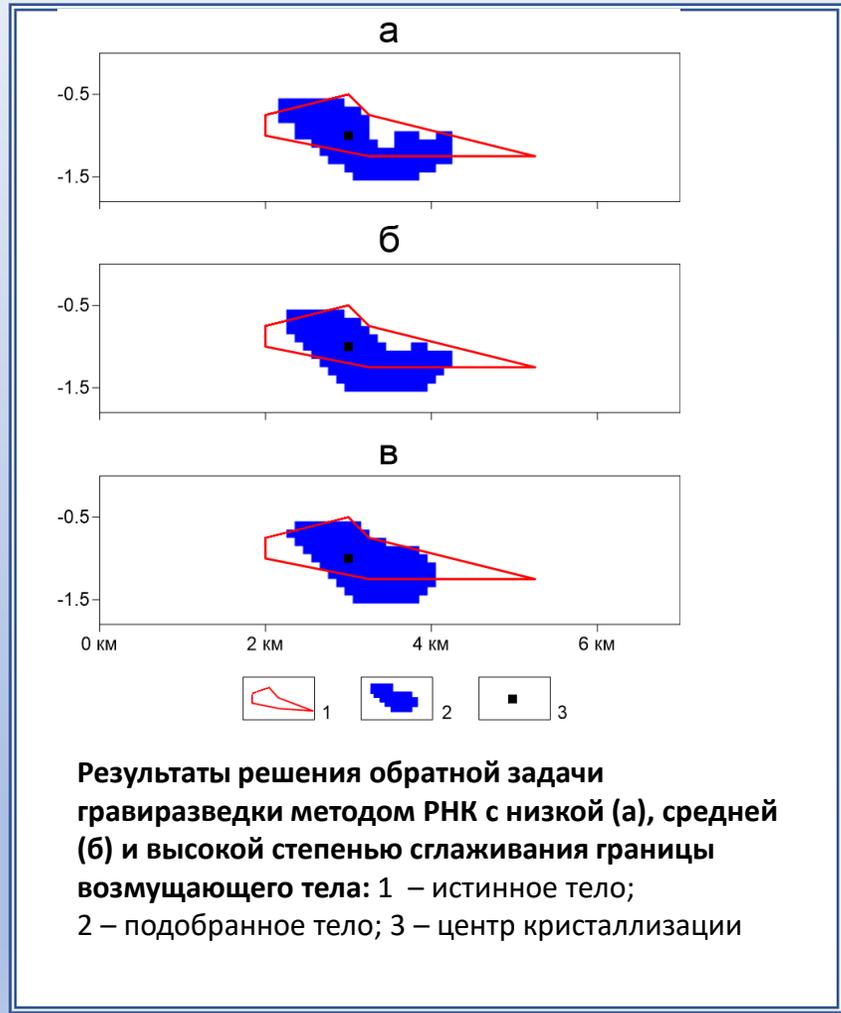
Результаты решения смешанной обратной задачи магниторазведки для трех тел: 1 – исходное поле ΔT ; 2 – модельное поле ΔT ; 3 – вектор истинной намагниченности J_s ; 4 – вектор подобранной намагниченности J_s ; 5 – аномалиеобразующие тела, их номера; 6 – подобранные магнитовозмущающие объекты.

РЕГУЛИРУЕМАЯ НАПРАВЛЕННАЯ РАСКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ (РНР)



Результаты применения метода РНР: а – по точному полю; б – при низком уровне помех; в – при среднем уровне помех, г – при высоком уровне помех. 1 – наблюдаемое поле; 2 – модельное поле; 3 – нулевое приближение; 4 – аномалиеобразующее тело; 5 – модельный конфигурационный носитель

АДАПТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЛАДКОСТИ ГРАНИЦЫ (ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА РНК)



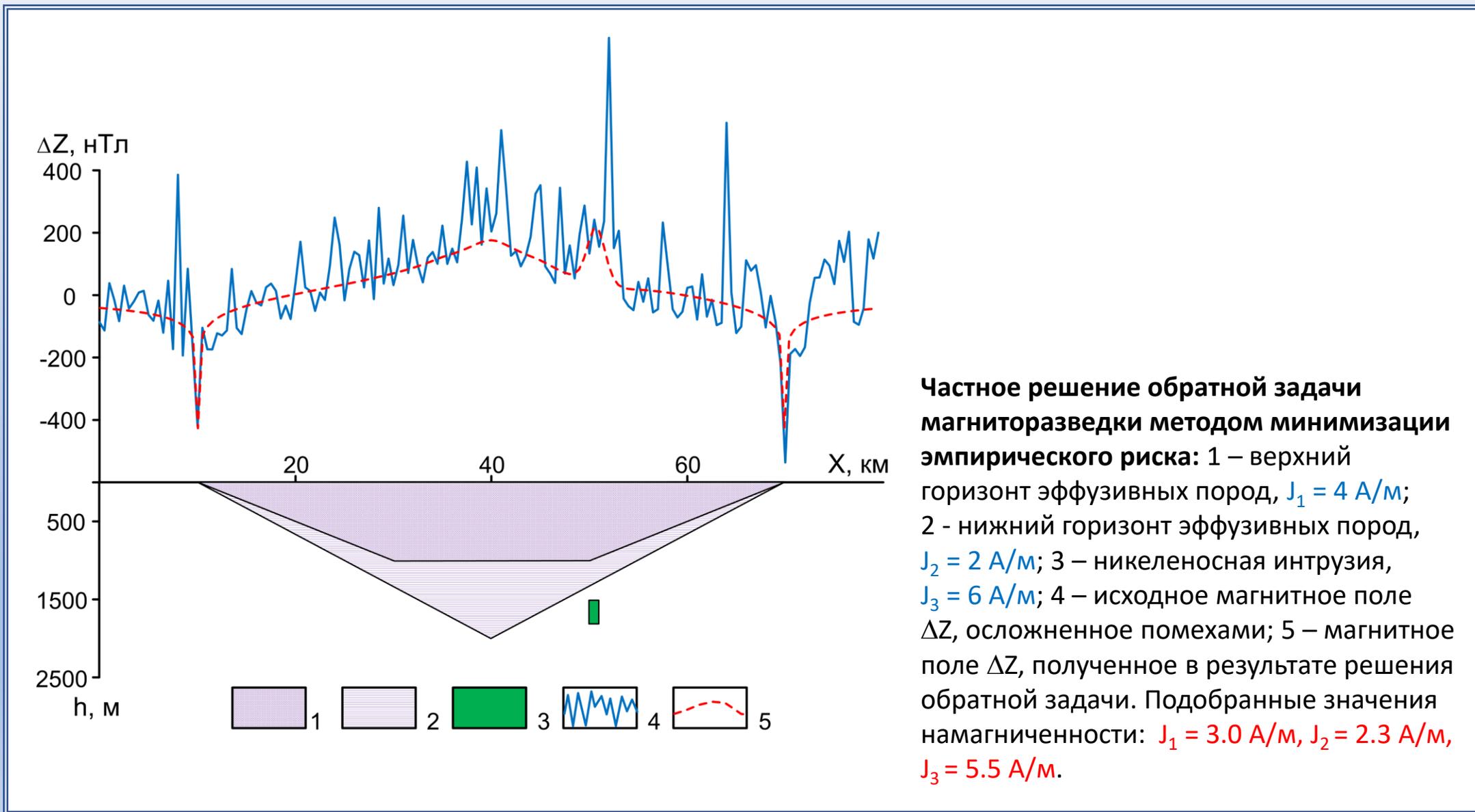
Адаптивная корректировка степени гладкости: 1) начиная с 6-й итерации требовалось, чтобы в оболочке присоединяемого элемента замощения находилось не менее 3-х элементов, принадлежащих границе текущей конфигурации; 2) требование 1, дополнялось следующим условием: при $\sigma_j / \sigma_{ист} \leq 1.2$, где j - номер итерации, в оболочке присоединяемого элемента замощения должно быть не менее 4-х элементов, принадлежащих границе текущей конфигурации; 3) требования, аналогичны пункту 2, однако пороговое значение для текущей плотности повышено до 1.5.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

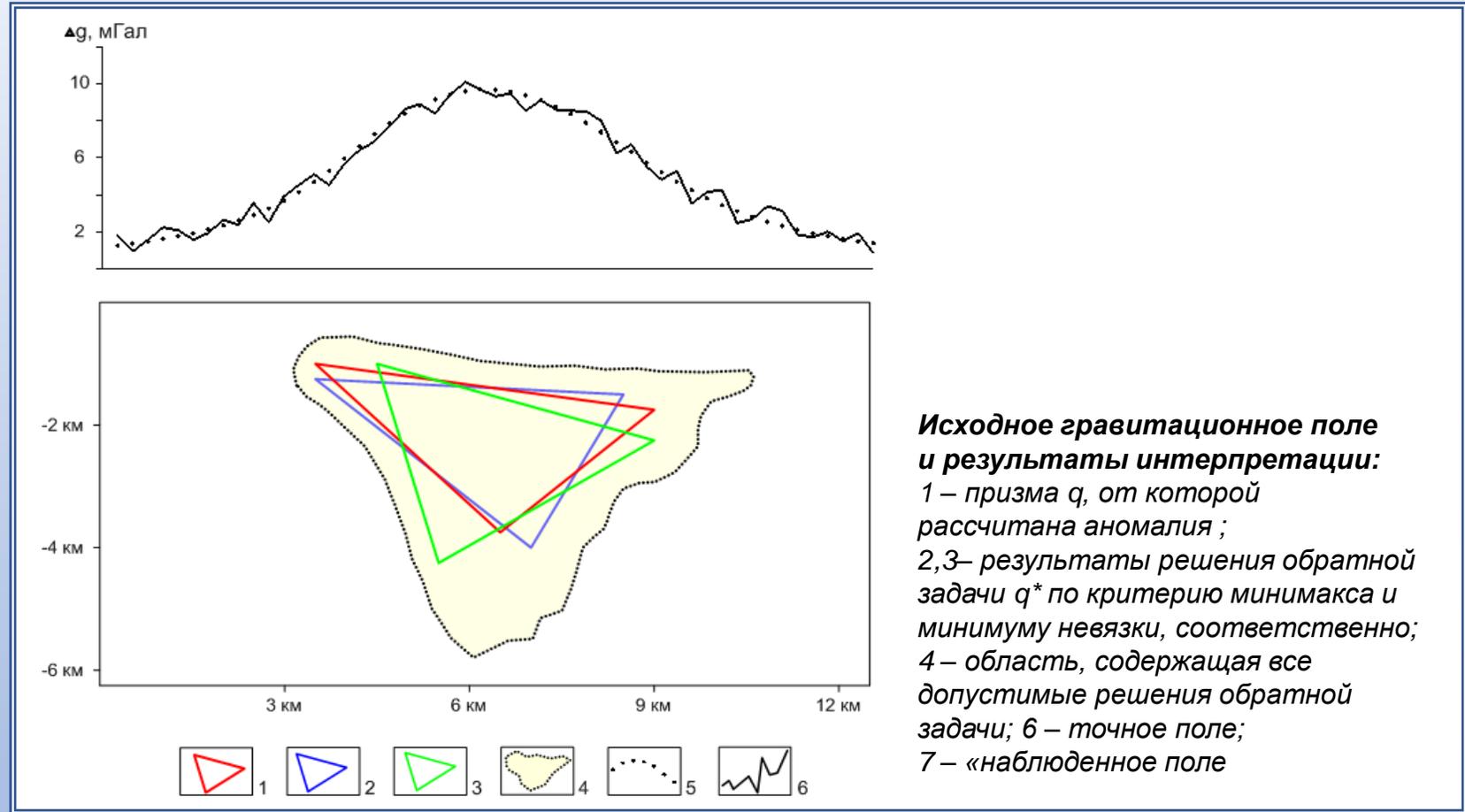


Достаточный объем *скрытой информации* об источниках – основная цель количественной интерпретации аномалий силы тяжести

ЛИНЕЙНАЯ ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА МАГНИТОРАЗВЕДКИ

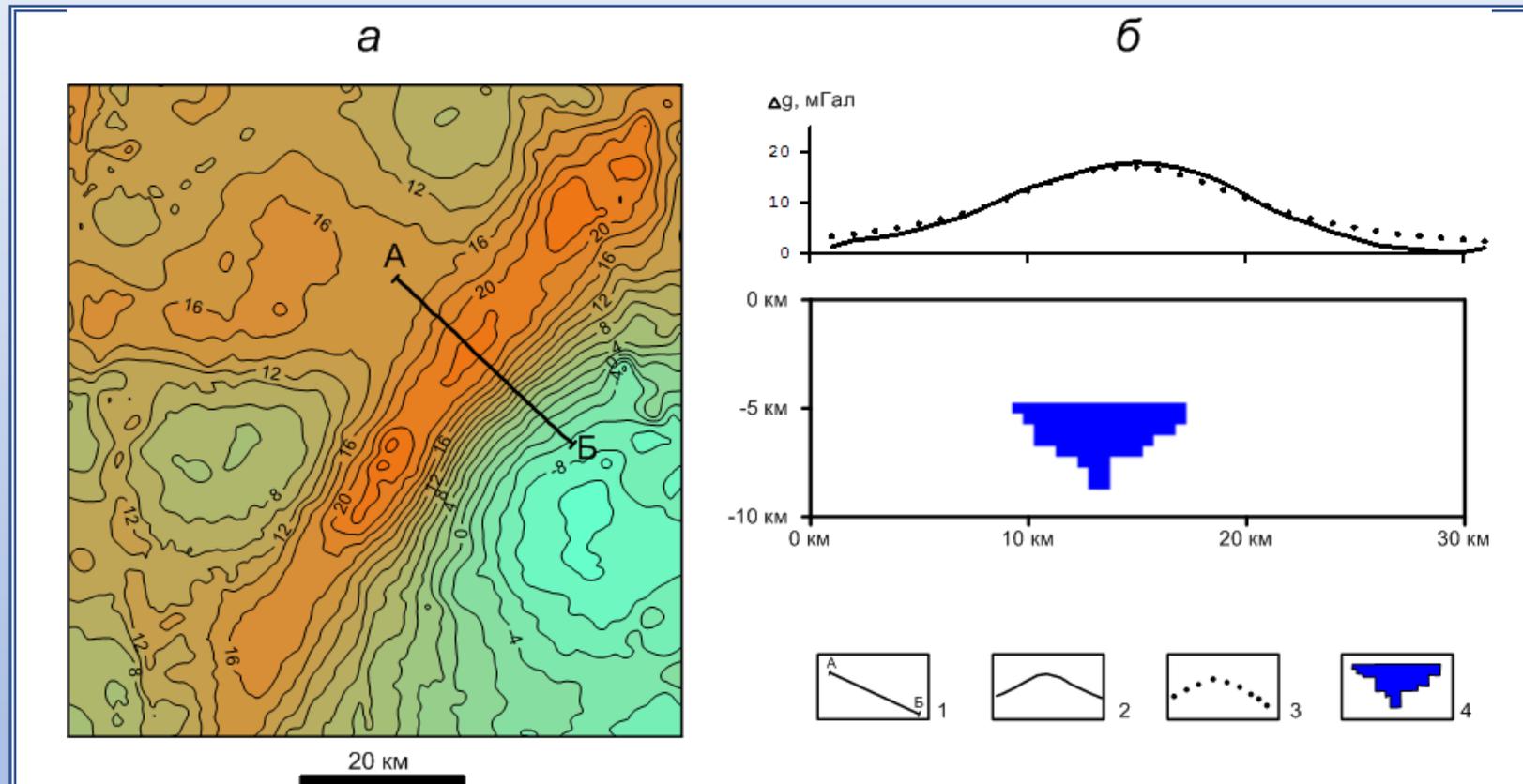


КРИТЕРИЙ МИНИМАКСА (МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР)



Оценка точности локализации с использованием метрики Штейнхауса: 1) если истинным носителем q окажется призма, наиболее удаленная от минимаксного решения, то площадь перекрытия $q \cap q^* = 3.5$ кв. км; 2). если q – призма, наиболее удаленная от решения по минимуму невязки, то площадь перекрытия $q \cap q^* = 2.8$ кв. км. Эти цифры – **скрытая информация**, которую можно получить только на основе данного подхода.

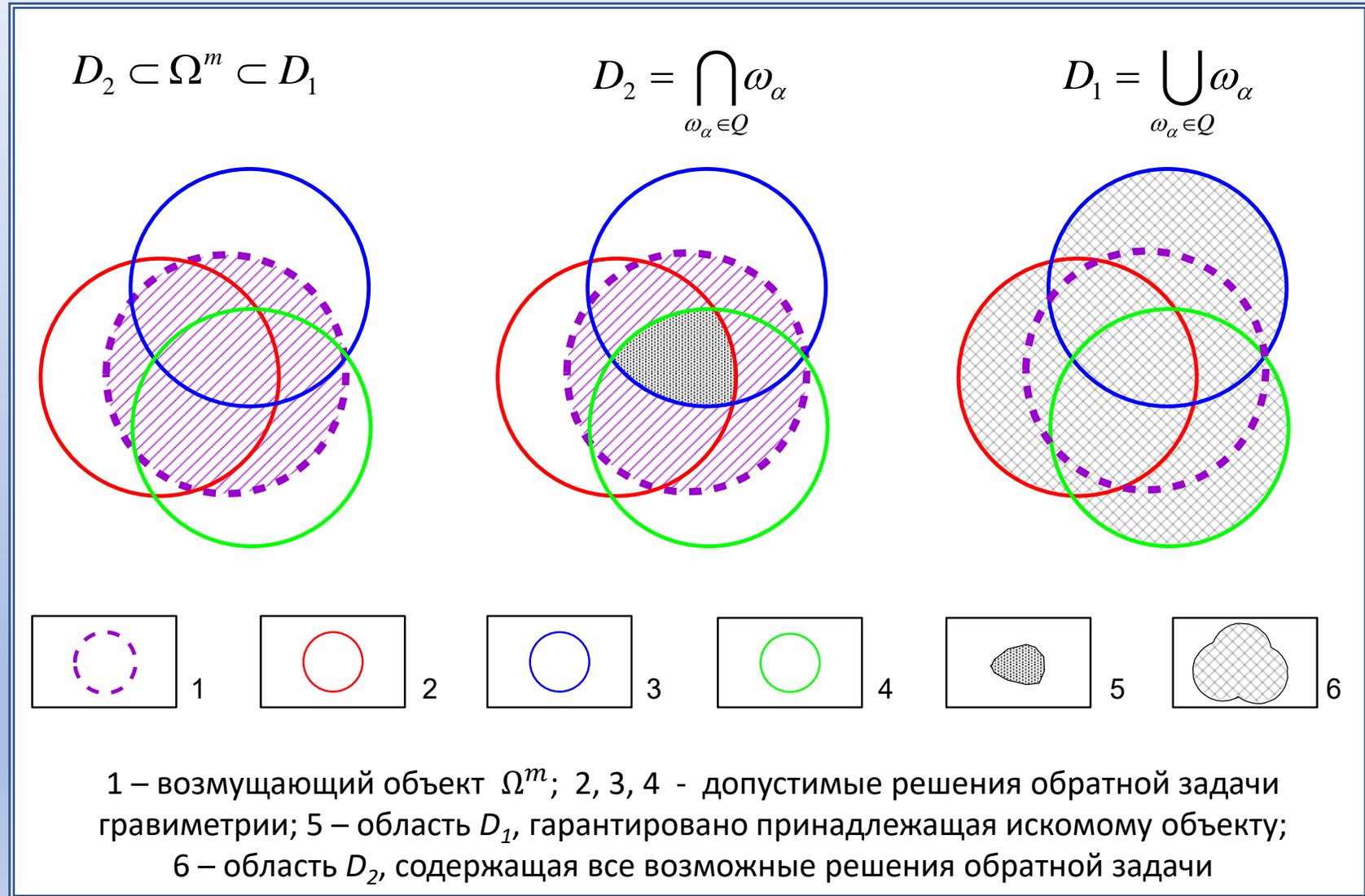
ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР: КАРТА ИЗОАНОМАЛ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ (а) И РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ БЕРЕЗОВСКОЙ АНОМАЛЬНОЙ ЗОНЫ (б)



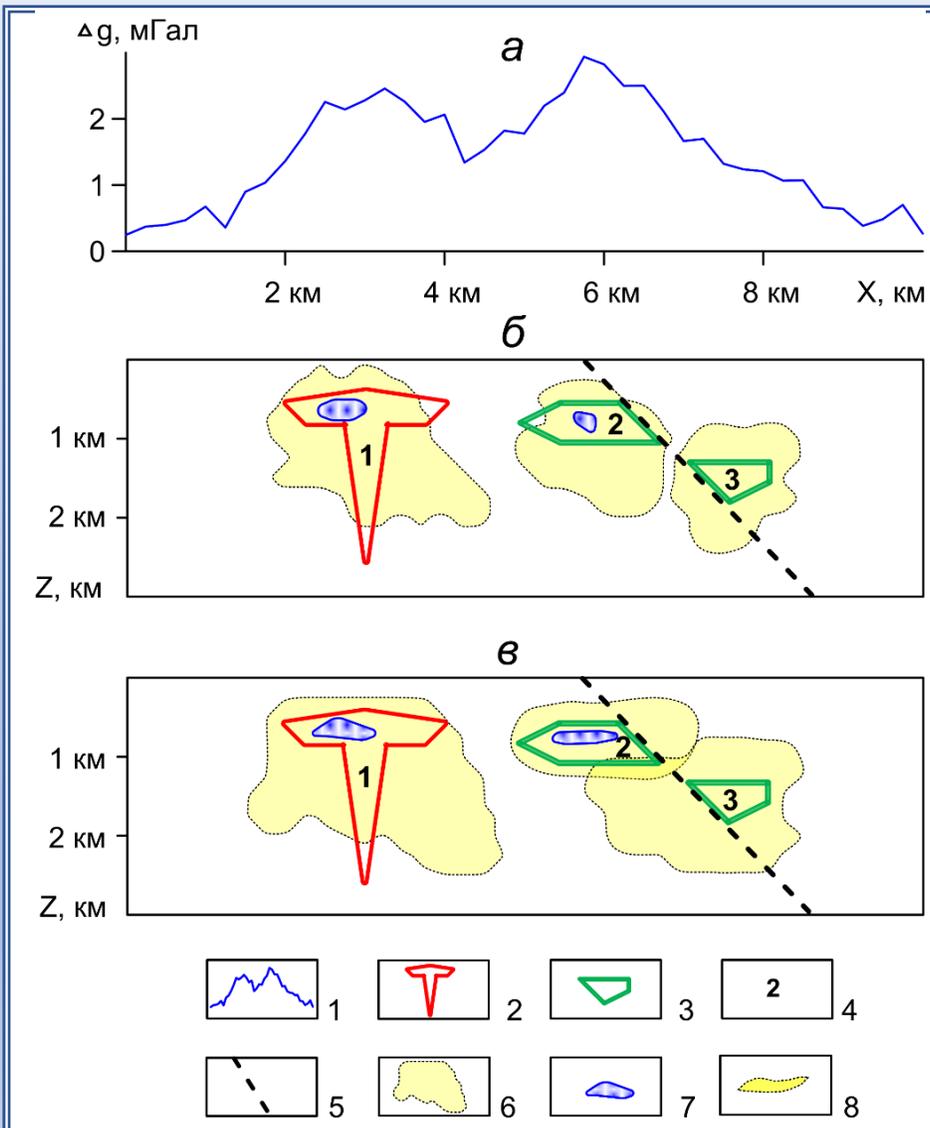
1 – интерпретационный профиль; 2,3 – графики наблюдаемого и модельного полей;
4 – аномалиеобразующий объект

Локализация с использованием критерия минимакса: 169 решений обратной задачи;
отношение сечений “модель \cap реальный объект” – не менее **75 %**

ДЕТЕРМИНИСТСКАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ



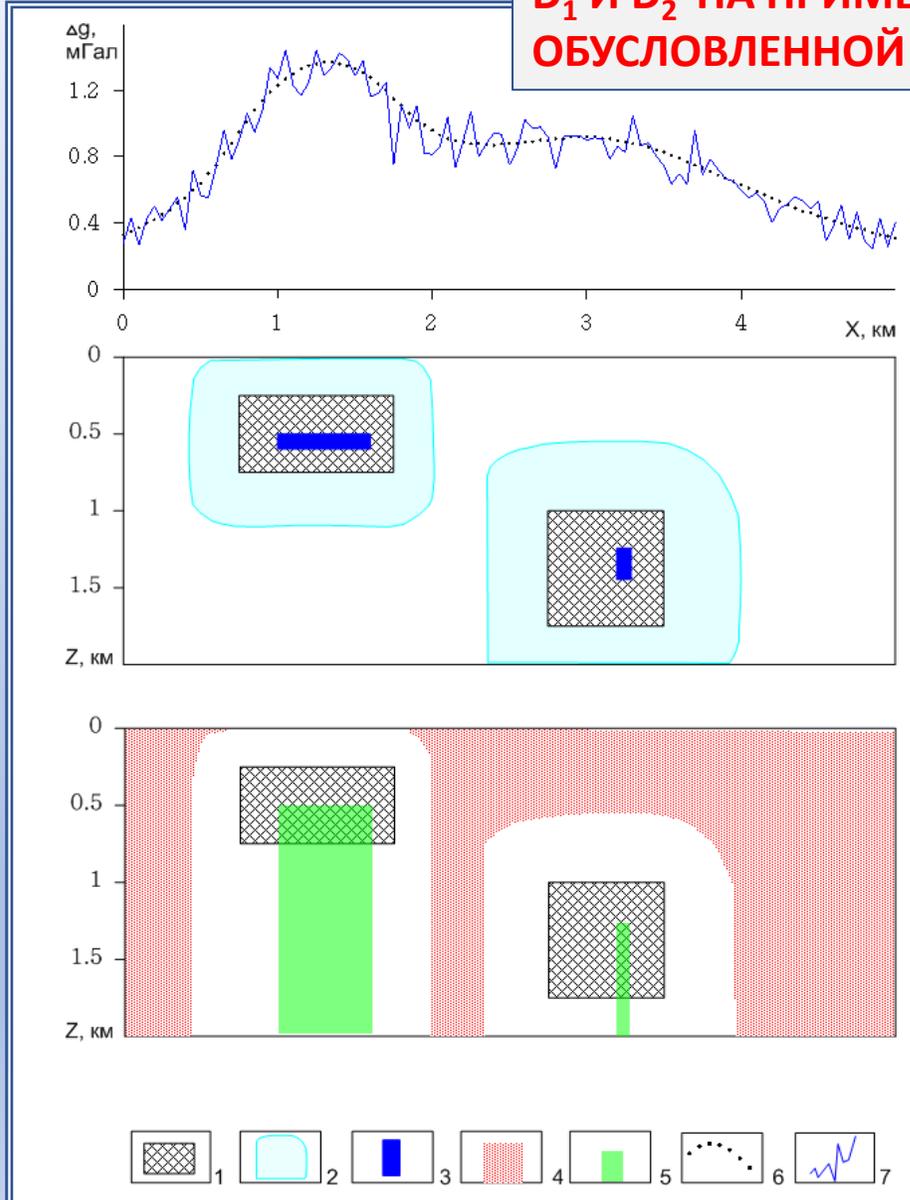
**ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ:
МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР – ИНТРУЗИИ**



Результаты интерпретации гравитационного поля (а), обусловленного группой интрузивных тел, при точных (б) и интервально заданных (в) значениях плотностей:

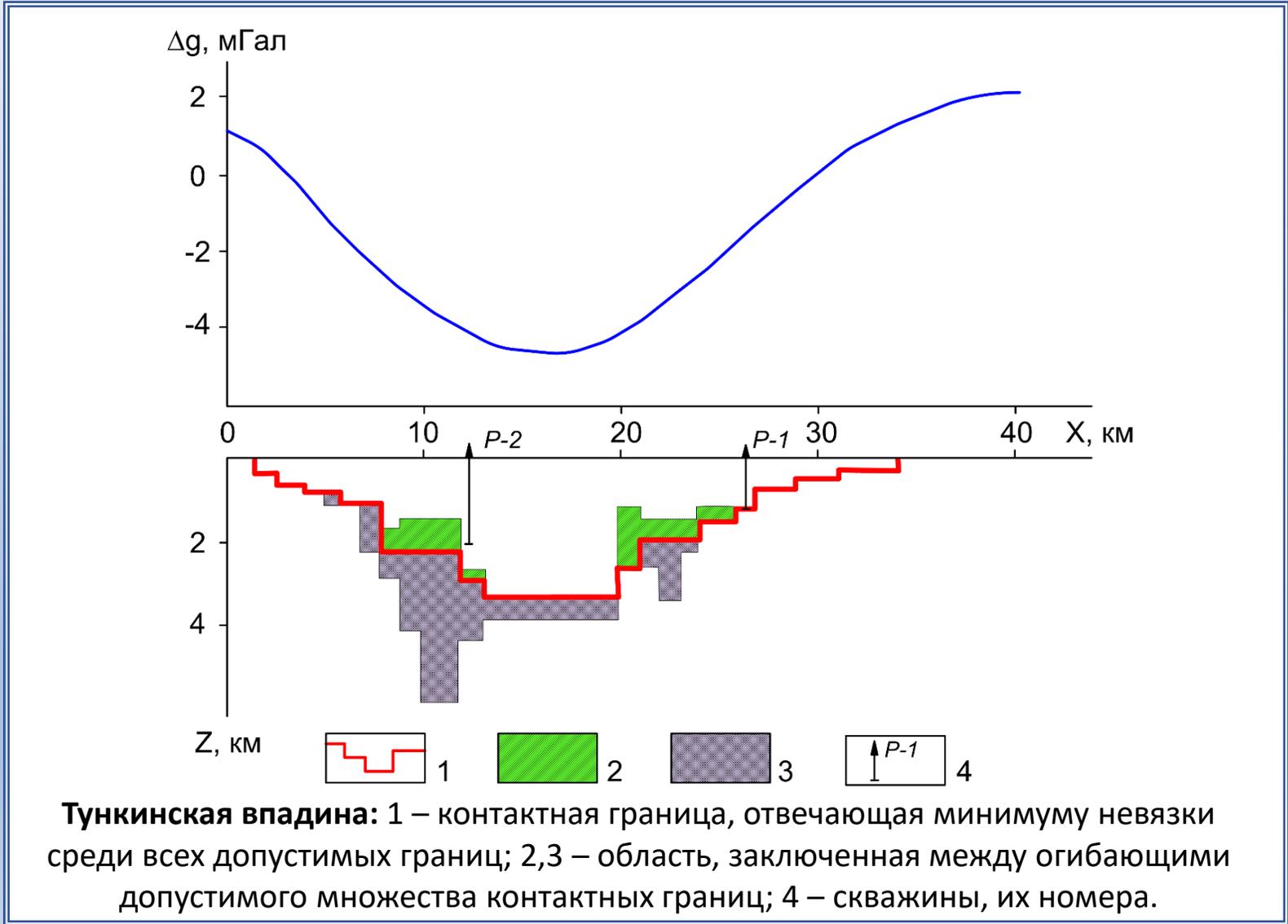
1 – «наблюдаемое» гравитационное поле; аномалиеобразующие объекты:
2 - лакколит, 3 - хонолит; 4 - номера объектов;
5 - разлом; 6 - построенная оценка области D_1 ;
7 - построенная оценка области D_2 ; 8 – зона пересечения построенных оценок областей D_1

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ТЕРМИНАХ ОБЛАСТЕЙ D_1 И D_2 НА ПРИМЕРЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ АНОМАЛИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ДВУМЯ ПРИЗМАМИ



- 1 – аномалиеобразующие тела;
- 2 – установленные области D_1 , содержащие источники поля;
- 3 – установленные области D_2 , принадлежащие источникам поля;
- 4 – области, в точках которых $P=0$;
- 5 – области, в точках которых $P=1$;
- 6 – точное гравитационное поле ;
- 7 – поле , осложненное нормально распределенной помехой

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ СТРУКТУРНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ



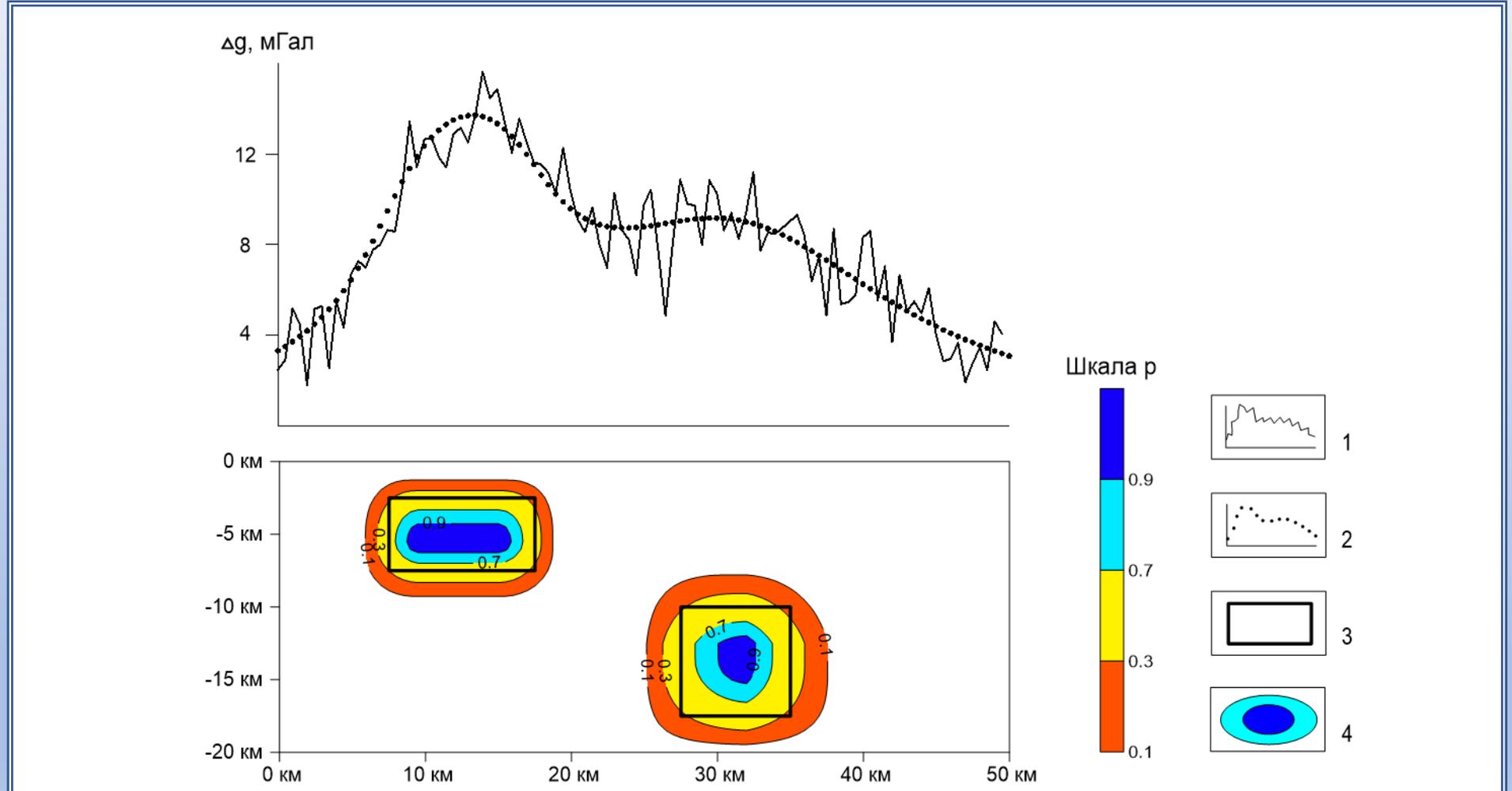
Наличие неопределенности – объективное существующее, неустранимое свойство обратной задачи гравиразведки, которое проявляется в существовании множества Q_0 ее допустимых приближенных решений S .

Идея: формировании "пакета информации", состоящего из обобщенной характеристики структуры множества допустимых решений Q_0 обратной задачи и нескольких частных решений S^{opt} , отвечающих разным критериям их выбора.

Множество Q_0 , состоящее из сеточных моделей $S = S(\omega_n)$, где ω_n – элементарный фрагмент геологического пространства, может быть описано с использованием функций гарантии, локализации, доверия и обнаружения. Можно также рассматривать $Q_0 \in S$ как нечеткое множество, принадлежность каждого элемента ω_n которому может уточняться, а фиксированные значения функции локализации – как его α -сечения.

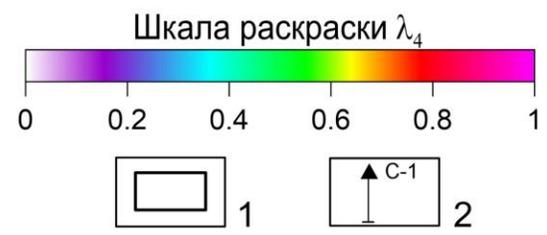
Выбор "наилучшего" решения S^{opt} - обратная задача исследования операций, в которой требуется максимизировать показатель эффективности $W(\alpha, x, \xi) \Rightarrow \max$, где α - заранее заданные факторы (результаты полевых наблюдений и априорная информация о геологических объектах), x - элементы решения (множество Q_0); ξ - неизвестные факторы

ФУНКЦИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ: МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР - ДВЕ ПРИЗМЫ

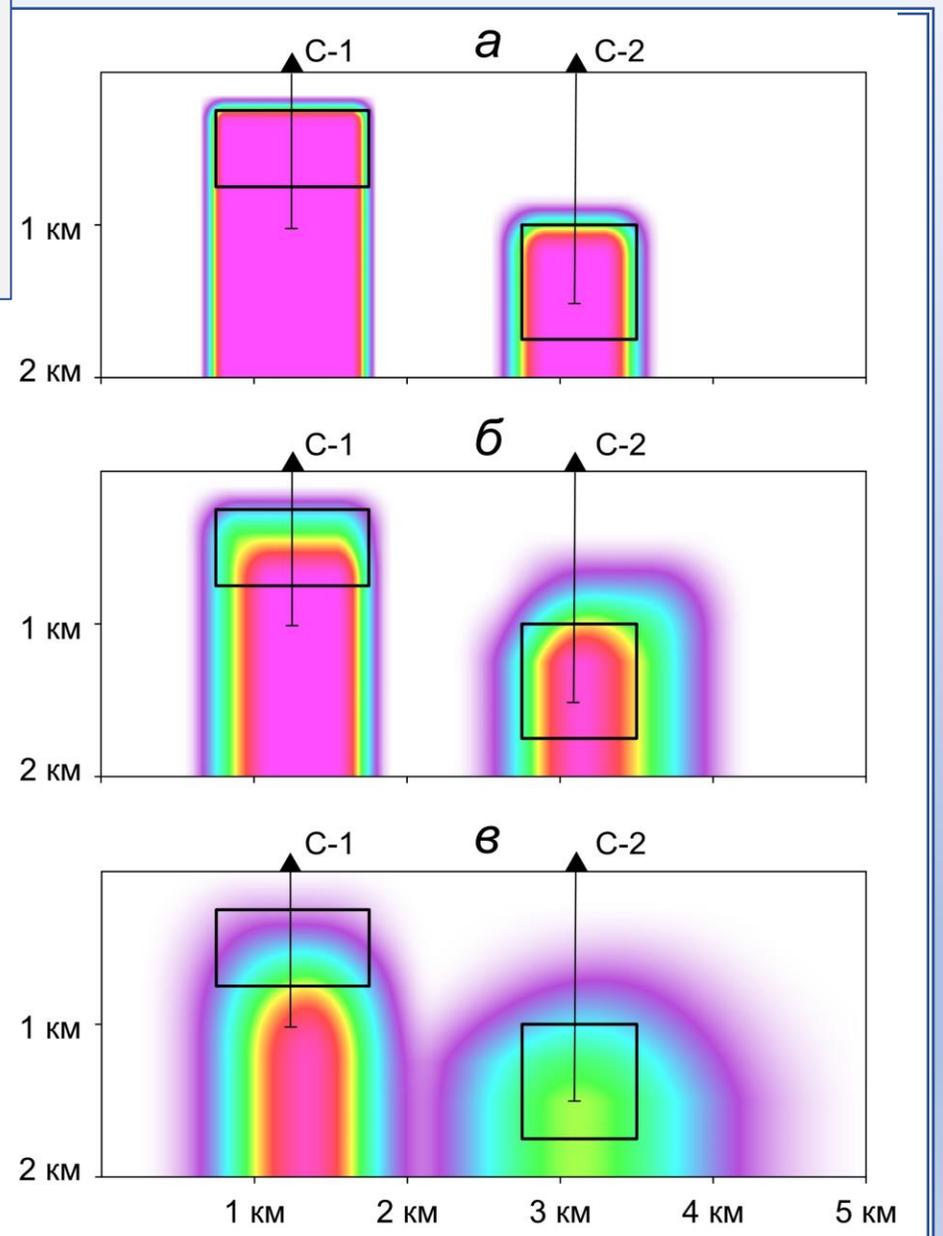


Оценка вероятности обнаружения двух прямоугольных призм по гравитационному полю с помехой:
1 – поле , осложненное помехой с нормой 1,2 мГал; 2 – поле без помех; 3 - границы
аномалиеобразующих тел; 4 - изолинии вероятности = 0,1; 0,3; 0,7; 0,9 ($N = 7229$)

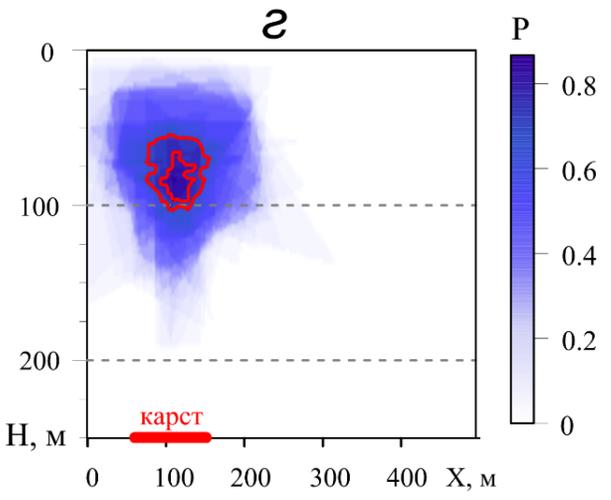
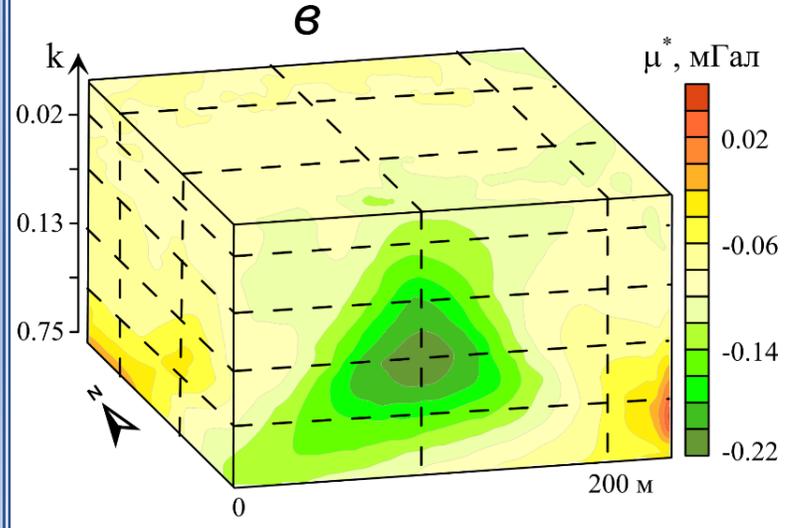
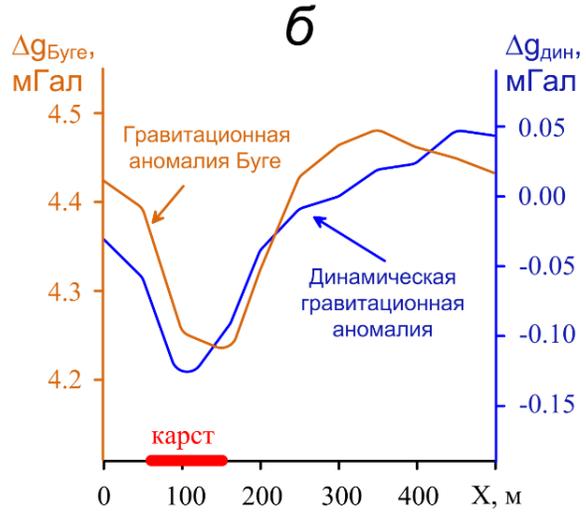
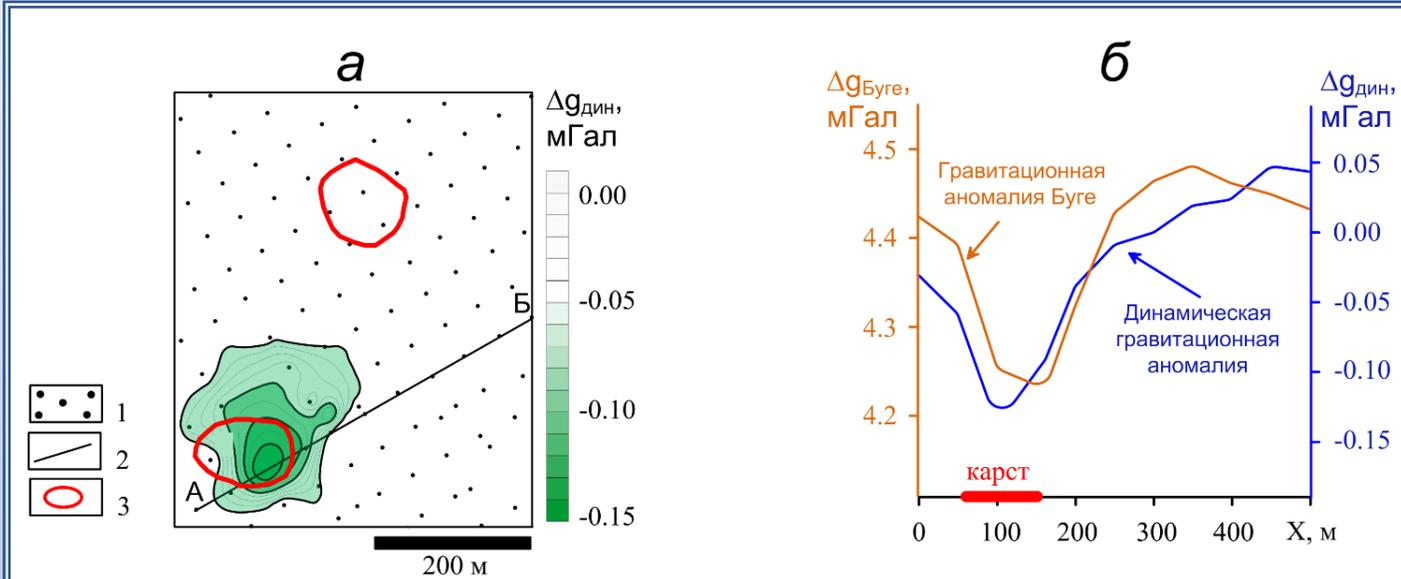
**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КАРТЫ ФУНКЦИИ
ОБНАРУЖЕНИЯ F
ДЛЯ СЛУЧАЯ «СЛАБЫХ» (а),
«СРЕДНИХ» (б) И «ВЫСОКИХ» (в)
ПОМЕХ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ**



1- аномалиеобразующие тела;
2 – проектируемые скважины



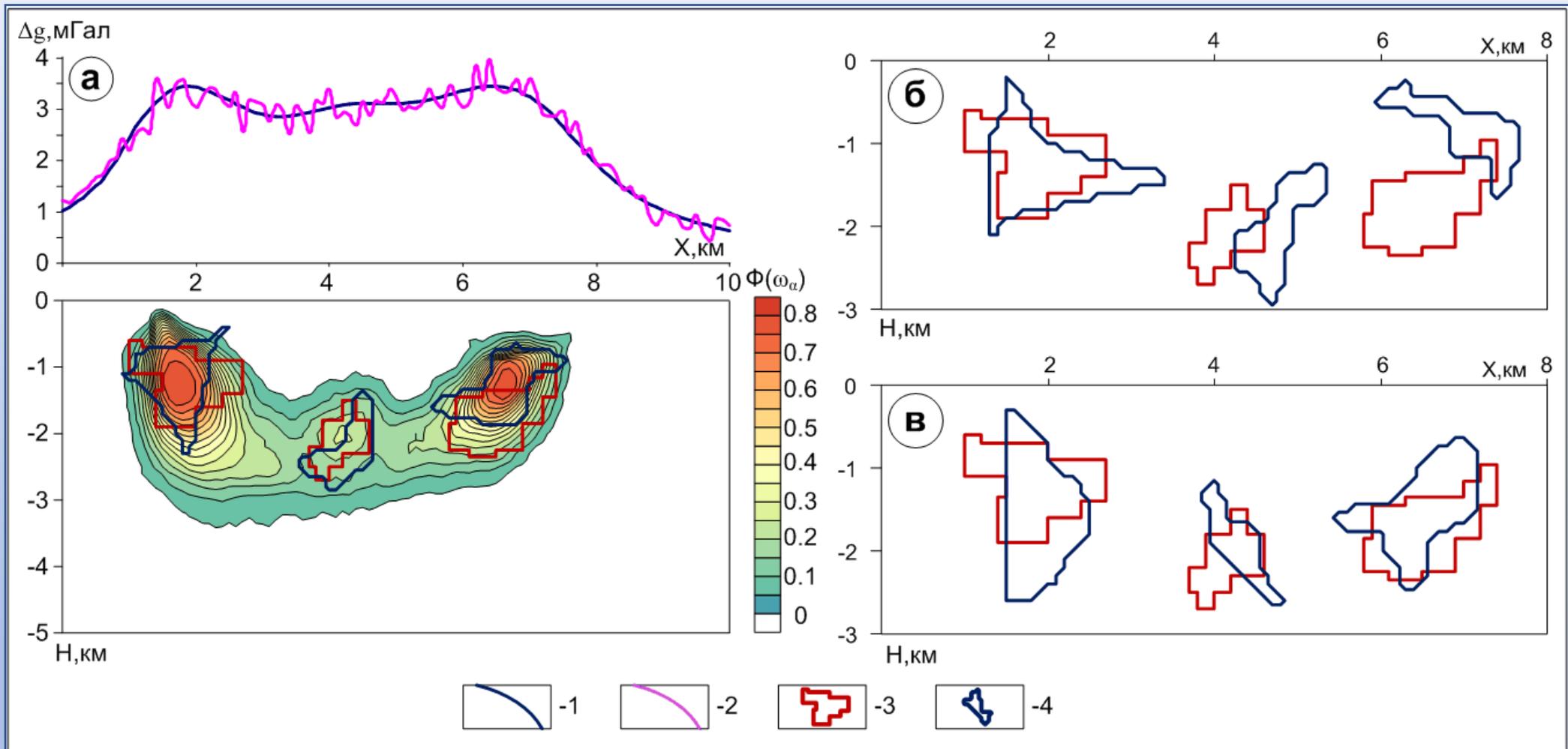
**ФУНКЦИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ:
 ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР**



Интерпретация данных гравиметрического мониторинга на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей:

- а – участок гравиметрической съемки;
- б – гравитационные аномалии;
- в – куб квазиплотностей;
- г – функция локализации:
- 1 – пункты гравиметрических наблюдений;
- 2 – профиль АБ;
- 3 – провалы земной поверхности.

МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР: ИЗОМЕТРИЧНЫЕ ТЕЛА НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ



Решения обратной задачи гравirazведки, отвечающие: критерию минимакса (а);
минимуму невязки полей (б); максимуму апостериорной вероятности (в):
1 - модельное поле; 2 - исходное поле; 3 - источники поля; 4 - подобранные объекты

1. Основной принцип, заложенный в основу аддитивных технологий интерпретации, можно сформулировать так: допустимые варианты интерпретации должны не соперничать друг с другом за право называться наилучшим, а сообща участвовать в построении итогового варианта интерпретации, в котором суммировалась бы информация, которую несет каждый из таких вариантов. Поделившись информацией с остальными допустимыми решениями обратной задачи, каждый из них получает информацию, которую несут остальные решения. Если взять рудную обратную задачу, то вследствие такого обоюдного обмена до того "безликий" модельный носитель возмущающих масс наполняется информацией, достаточной для решения задачи о принадлежности локального фрагмента пространства реальному носителю возмущающих масс с оценкой вероятности этого события. В конечном счете, аддитивные методы интерпретации позволяют ранжировать отдельные фрагменты допустимых носителей по значению оценки вероятности того, что в этих областях действительно присутствует какая-то часть возмущающих масс. Прежде подобная задача никогда не рассматривалась и, вряд ли, ее можно было решить в рамках привычных математических форм представления результатов интерпретации
2. В качестве новой математической формы представления результатов решения обратной задачи гравиразведки "рудного" типа предлагается использовать "пакет информации", включающий в себя несколько распределений оценочных функций и одну или несколько интерпретационных моделей, отвечающих выбранным критериям оптимальности.
3. Существует принцип дополнительности, сформулированный Нильсом Бором в 1927 г, согласно которому для полного описания квантово-механических явлений необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых даёт исчерпывающую информацию об этих явлениях. В дальнейшем появилась концепция дополнительности, охватывающая не только физику, но и биологию, психологию, культурологию и др. гуманитарные науки. С методологических позиций аддитивные технологии интерпретации геопотенциальных полей могут рассматриваться, как еще одно естественно-научное воплощение данной концепции.

- При написании монографии использовались результаты исследований, выполненных в рамках грантов РФФИ «Развитие монтажных технологий решения обратной задачи гравиметрии при трехмерном моделировании геологических объектов» № 10-05-96023_p_урал_a (2010–2011 гг); "Разработка методов количественной интерпретации геопотенциальных полей, базирующихся на синтезе функционально-аналитического и вероятностно статистического подходов" № 12-05-00414-А (2012–2014 гг); "Разработка методов оценки параметров источников потенциальных полей на основе согласования допустимых решений обратной задачи" № 15-05-01823_a (2015–2017 гг); "Ресурсы Арктики" "Тектоно-магматические факторы образования платино-медно-никелевых месторождений Арктической части Сибирской трапповой провинции" № 18-05-70094 (2018–2020 гг). Издание монографии осуществлено в 2020 г за счет гранта РФФИ 19-15-00014 Д в издательстве «Научный мир», Москва.
- Издание монографии осуществлено в 2020 г за счет гранта РФФИ 19-15-00014 Д в издательстве «Научный мир», Москва.
- Монография содержит 456 страниц, 105 рисунков и 19 таблиц. Полный текст монографии с рисунками находится в научной электронной библиотеке: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47159980>

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

