



SATBAYEV
UNIVERSITY

**Институт геологии, нефти и горного дела им. К. Турысова
Кафедра Геофизики**

«Геолого-геофизические методы поисков и разведки рудных месторождений»

для специальности 6M074700
«Геофизические методы поисков и разведки
МПИ»

Докт. геол.-минерал. наук Истекова С.А.

Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

Рудная геофизика

Лекция 11

**Гравиразведка при поисках и разведке
рудных месторождений**

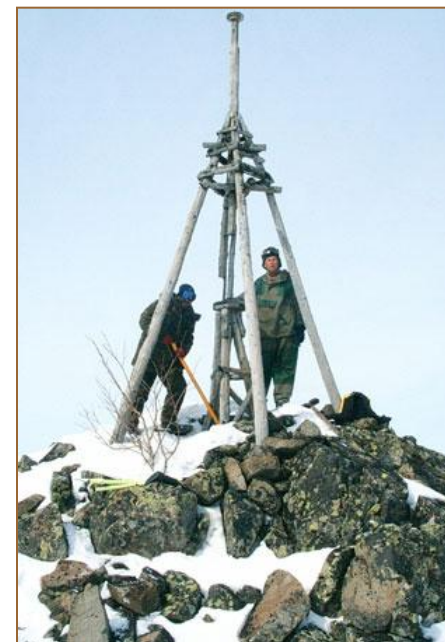




ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Области применения современной высокоточной гравиметрии

- **Региональная съемка** – структурно-тектоническое районирование, поиск нефтяных бассейнов;
- **Разведка месторождений** твердых полезных ископаемых- гравиразведка используется на всех стадиях, вплоть до доразведки месторождений (в комплексе с другими геофизическими методами);
- **Нефтяная геология** – гравиразведка используется на всех стадиях, в т.ч. и для прямых поисков залежей нефти и газа;
- **Инженерная геология** – обнаружение карстовых полостей и пустот, зон дезинтеграции и разуплотнения;
- **Поиски россыпей** – используется для обнаружения, оконтуривания и прослеживания погребенных русел и долин; для отбивки плотика.



Гравитационное поле Земли

Идеи Гильберта вдохновили Исаака Ньютона на создание теории гравитации: существует сила, которая вызывает взаимное притяжение тел (в т.ч. яблока и Земли) и эта сила зависит от масс тел и расстояния между ними.

$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Эта сила удерживает планеты на орбите Земли. Он впервые заключил, что частично расплавленная Земля должна быть вытянута в сечении экватора.

Экспедиции, направленные в разные широты для измерения формы Земли подтвердили правоту Ньютона

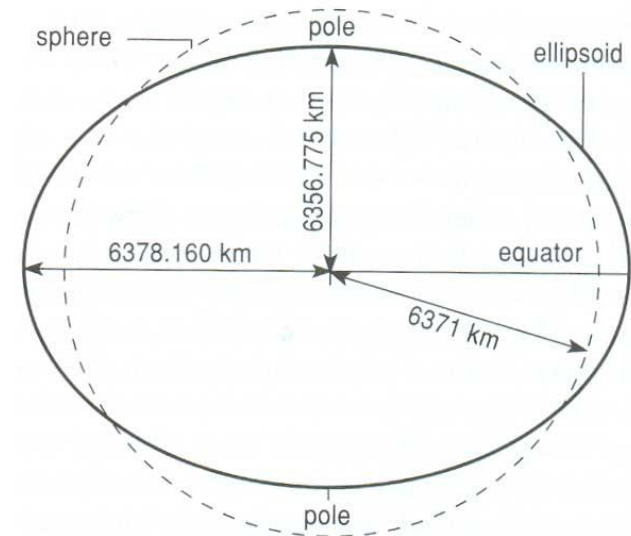
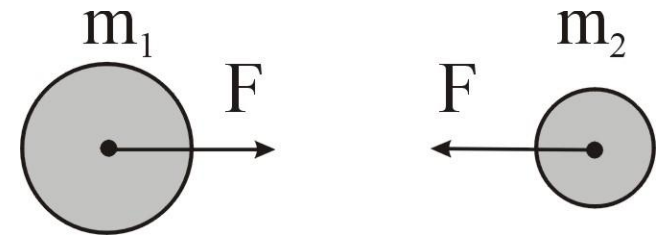


Figure 9.17 Shape of the Earth.

Гравиразведка основана на изучении особенностей распределения гравитационного поля Земли.

Эти особенности обусловлены различием **плотности горных пород**, слагающих геологический разрез.

Особенности распределения гравитационного поля обусловлены так же формой геологических тел.

Многие геологические тела – антиклинальные складки, интрузии, зоны разломов, залежи полезных ископаемых, находят отражение в измеренном на поверхности Земли **гравитационном поле**.

Эти тела создают **положительные и отрицательные аномалии**.

Выявляя **аномалии**, изучая их размеры и интенсивность, можно определять местоположение и параметры геологических тел.

Аномалии геологических тел очень малы и составляют часто только 1/1 000 000 долю от полного значения гравитационного поля Земли.

Плотность горных пород

Плотность вещества $\sigma = m/V$

$\sigma = f$ (мин. состав, пористость, влажность) = φ (условия первичного формирования + последующих преобразований).

Избыточная плотность $\Delta\sigma = \sigma_{\text{тела}} - \sigma_{\text{вмещ.среды}}$

Горные породы в общем случае состоят из 3-х фаз: твердой, жидкой, газообразной.

Плотность пород в условиях естественного залегания:



$$\sigma = \frac{m_{\text{тв}} + m_{\text{жид}} + m_{\text{газ}}}{V_{\text{тв}} + V_{\text{жид}} + V_{\text{газ}}} = \frac{m}{V}$$

Минералогическая плотность: $\sigma_{\text{мин}} = \frac{m_{\text{тв}}}{V_{\text{тв}}}$

Объемная плотность:

$$\sigma_V = (1 - k_i) \sigma_{\text{н}} + k_i \sigma_{\text{о}}$$

Единицы измерения: в СИ кг/м^3 , чаще используется единица СГС г/см^3 .

Плотность – индикатор геологических процессов.

(2)

$$\sigma(H) = \sigma_m - k_p e^{-k_t \cdot H}$$

- H- глубина
- σ_m - минеральная плотность
- k_p – коэффициент, пропорциональный пористости неуплотненных осадков
- k_t – коэффициент, учитывающий фактор геологического времени
- $e \rightarrow 1$ при $H=0$, тогда $\sigma(H) = \sigma$ неуплотненных осадков
- $e \rightarrow 0$ $H \rightarrow \infty$, тогда $\sigma(H) \rightarrow \sigma_m$
- Плотность большинства породообразующих минералов земной коры изменяется в пределах от 2.5 г/см³ до 3.2 г/см³.

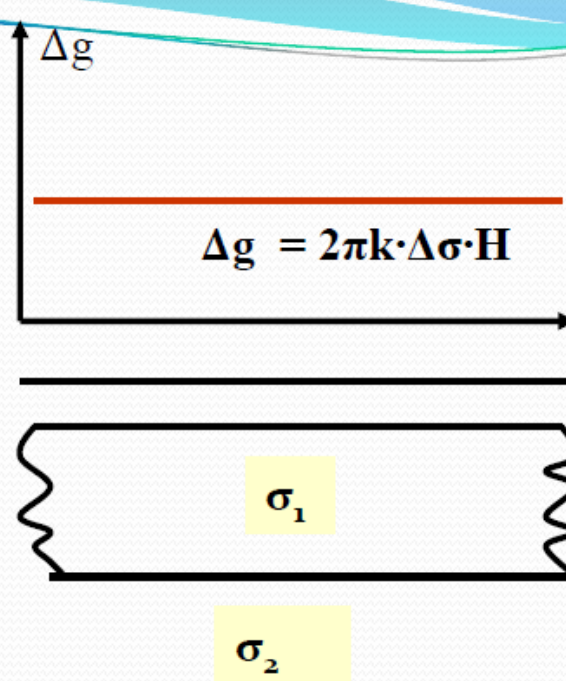
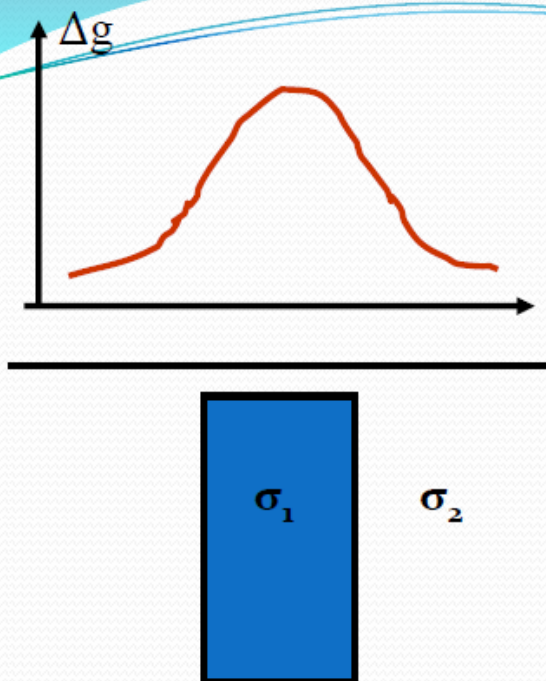
Плотность магматических
горных пород, г/см³

Гранит -2,6
Габбро -2,9
Базальт -3,0
Пироксенит -3,2

Плотность осадочных
горных пород, г/см³

Песок -2,1
Песчаник -2,3
Известняк -2,5
Соль- 2,15
Глина -2,3

Избыточная плотность



Избыточная плотность: $\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_2$

Избыточная масса: $M = \Delta \sigma \cdot V$

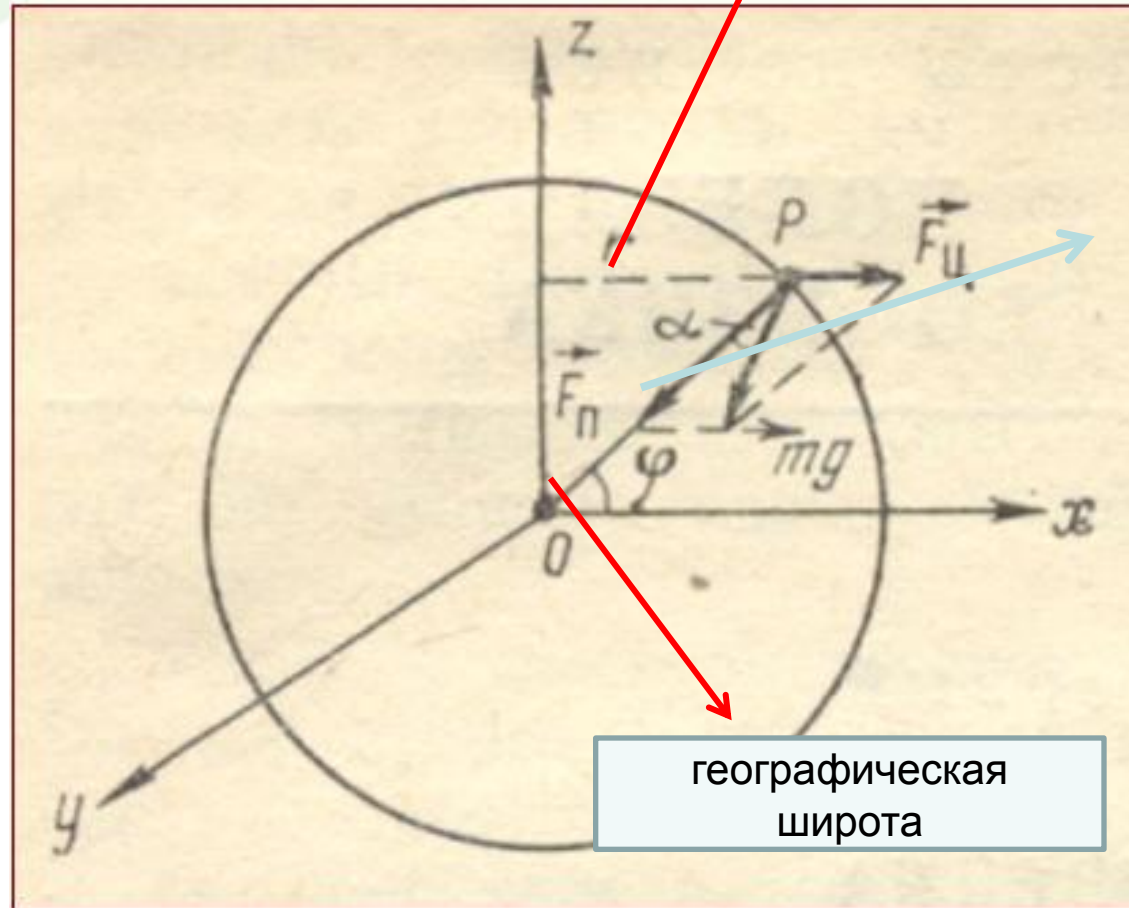
Условия возникновения гравитационных аномалий

Различие в плотности
изучаемого объекта
и вмещающих пород

Негоризонтальность залегания
границ раздела плотности,
связанных с искомым объектом

Сила тяжести и ее составляющие

Отклонение направления силы тяжести от направления к центру Земли



$$\bar{P} = mg$$

$$\bar{P} = \bar{F}_n + \bar{F}_ц$$

(3)

(4)

I-е приближение – **шар** ($r_1 = r_2$),

II-е приближение – **эллипсоид**

III-е приближение – **геоид** – эквипотенциальная поверхность, которая расходитсся с эллипсоидом до ± 100 м.

$$r_2 - r_1 \approx 20 \text{ км}$$

В любой точке поверхности **равного потенциала** (эквипотенциальной поверхности) вектор силы тяжести всегда направлен перпендикулярно к эквипотенциальной поверхности

$$(5) F_{\Pi} = G \frac{M m}{R^2}$$

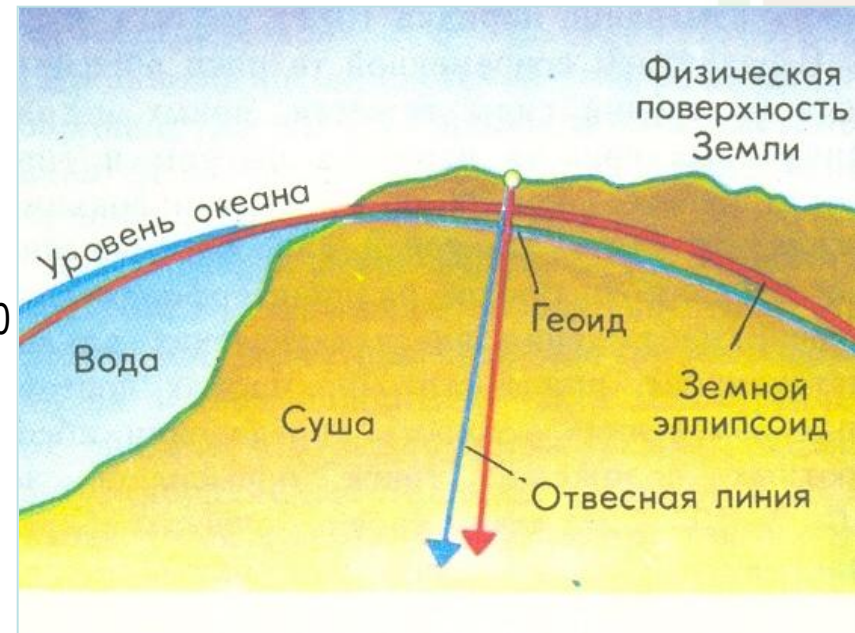
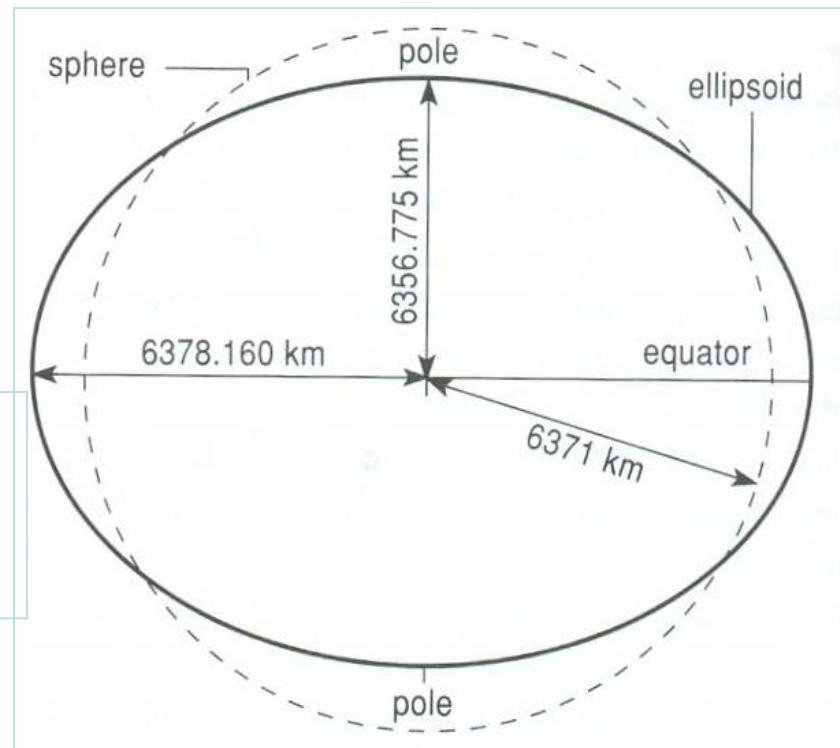
$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ (м}^3/\text{кг с}^2\text{)} -$
гравитационная постоянная
 $M = 5,974 \times 10^{24} \text{ кг} -$ масса Земли
 $R = 6371 \text{ км} -$ средний радиус Земли

$$(6) F_{\text{ц}} = \frac{v^2}{r} m$$

r - расстояние от т. P до оси вращения Земли
 v – линейная скорость вращения Земли, зависит от φ (на экваторе = 460 м/с, на географических полюсах = 0)

Тогда, согласно (4)

$$P = G \frac{Mm}{R^2} + \frac{v^2}{r} m$$



Напряженность гравитационного поля

$$E_{\ddot{A}} = \frac{\overline{F}_{\ddot{A}}}{m} = g$$

(8) Единицы измерения в СИ- м/с²
1мГл = 10⁻³Гл = 10⁻⁵ м/с²

Если Землю считать шаром и пренебречь $F_{ц}$, то

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (9)$$

В гравиразведке g – сила тяжести
(ускорение свободного падения, напряженность)

Потенциал гравитационного поля (W)

$$-\frac{\partial W}{\partial S} = g_s \quad (10) \quad \text{потенциал силы тяжести}$$

$$W(x, y, z) = const \quad \begin{array}{l} \text{уровенная поверхность} \\ \text{Земли(эквипотенциальная)} \end{array}$$

$$W = G \frac{M}{R} \quad (11) \quad \text{потенциал силы тяжести идеальной Земли}$$

Продифференцируем по направлению Z
 $=R$ (радиус Земли)

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = G \frac{M}{R^2} = g \quad (12)$$

Нормальное значение силы тяжести

$$\gamma_0 = \gamma_3 (1 + \beta_1 \sin^2 \varphi - \beta_2 \sin^2 2\varphi)$$

Формула Кассиниса,
Гельмерта и др.

γ_0 - нормальное значение силы тяжести для формы Земли в виде сфероида

γ_3 - значение силы тяжести на экваторе

β_1 и β_2 - коэффициенты, учитывающие влияние
центробежной силы и сжатия сфероида

Обновленная формула Гельмерта (мГл):

$$\gamma_0 = \left[978030 \left(1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi \right) - 14 \right]$$

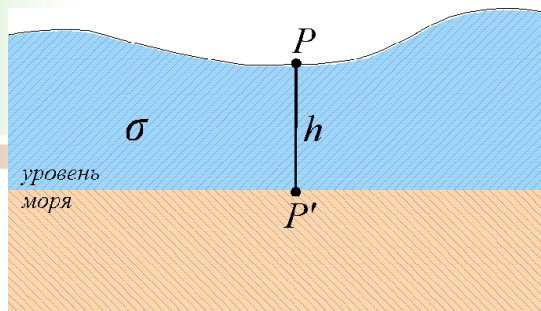
Разность между наблюдаемым (измеренным) значением силы тяжести (g) и нормальным (γ_0) значением силы тяжести, называется аномалией силы тяжести (Δg): $\Delta g = g - \gamma_0$

Наблюдаемое значение (g) включает нормальной поле Земли и поле, создаваемое плотностными неоднородностями геологического разреза.

Аномалии (Δg) обусловлены геологическим телами (локальными выступами подошвы осадочного чехла, интрузии, зоны разломов, соляные купола и пр.).

Редукции и аномалии силы тяжести

Определение поправок силы тяжести



1. Поправка за высоту (поправка Фая)

Нормальное значение силы тяжести в т. P' :

$$\gamma \approx GM / R^2$$

Значение поля силы тяжести в т. P $\gamma_1 \approx GM / (R + h)^2$

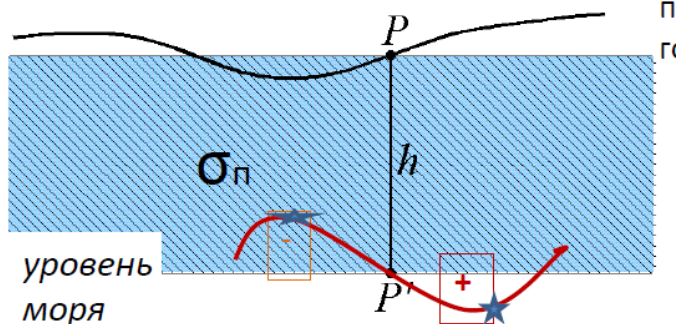
Тогда поправка за высоту будет равна разности значений силы тяжести между точками P' и P :

$$\delta g_h = GM \left[1/R^2 - 1/(R+h)^2 \right] \approx 2GMh / R^2 = 2\gamma h / R. \quad \text{Здесь учтено, что } R \gg h$$

$$\delta g_h = 0.3086h$$

поправка Фая (поправка за свободный воздух)

$$\delta g_a = g_i - \gamma + \delta g_h \quad \text{аномалия в редукции Фая (} g_h \text{- наблюдаемое поле)}$$



2. Поправка за промежуточный слой

(поправка Буге) вводится для выровненного спокойного рельефа, когда массы промежуточного слоя можно представить в виде плоскопараллельного горизонтального слоя мощностью h:

$$\delta g_i = -0,0418\sigma_i h$$

При расположении точки наблюдения выше уровня моря поправку δg_i берут с минусом, ниже уровня моря- с плюсом.

В районах с сильно пересеченной местностью поправка за промежуточный слой становится слишком грубым приближением.

Тогда вводится поправка за о́кружающий релье́ф (топографическая)

Поправка за рельеф, которая рассчитывается по специальной формуле, всегда занижает наблюдаемое значение, поэтому ее вводят в формулу всегда со знаком +.

Тогда поправка Буге, или полная поправка за промежуточный слой, имеет вид:

$$\delta g_i = -0,0418\sigma_i h + \delta g_\delta$$

Аномалия в редукции Буге ($\Delta g_{\text{аБ}}$) представляет собой разность наблюдаемого и теоретического поля силы тяжести при введении соответствующих поправок:

$$\Delta g_{\text{аБ}} = g_i - \gamma_0 + (0,3086 - 0,0419\sigma)h + \delta g_\delta$$

При высокоточной съемке учитывают притяжение Луны и Солнца.

Поправка за притяжение Луны – max= 0,25 мГл

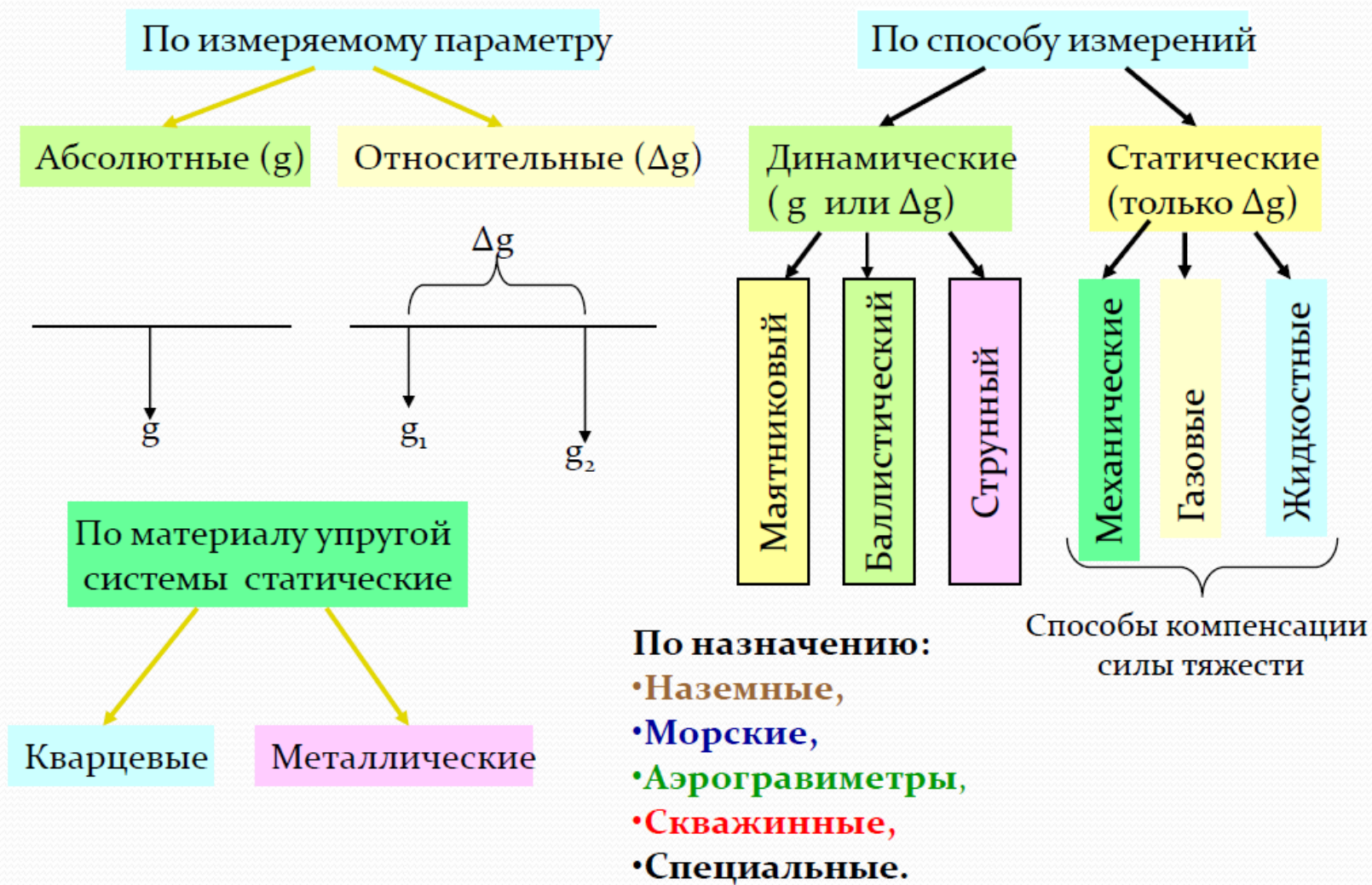
Поправка за притяжение Солнца – max= 0,1 мГл

Метод разведки и оборудование

- Основным методом гравиразведки является полевая гравиметровая съемка, проводимая с помощью разного рода гравиметров.
- Полевые гравиметровые съемки бывают пешеходными и автомобильными, изредка используется авиотранспорт.
- В зависимости от масштаба съемки и способа транспортировки гравиметров наблюдения выполняют в нескольких десятках пунктов за смену.
- Гравиметр - прибор для высокоточного измерения силы тяжести; чаще всего применяется при поисках полезных ископаемых.
- Благодаря гравиразведке можно прямо с земной поверхности определить наличие в недрах того или иного полезного ископаемого
- Это позволяет существенно снизить количество дорогостоящего бурения скважин или строительства шахт.

Показания гравиметра меняются в зависимости от плотности среды.

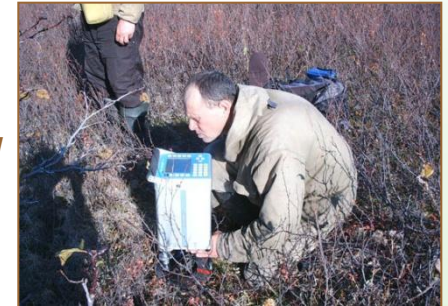
Методы измерений силы тяжести



Методика гравиразведочных работ



**Гравиметрическая партия
оснащена современной
гравиметрической
и спутниковой аппаратурой
геодезического класса,
вездеходной и снегоходной
техникой, полевым
оборудованием, а также
высококвалифицированными
специалистами с большим
опытом полевых
и камеральных работ.**



Гравиметрическая аппаратура

Автоматические гравиметры AUTOGRAV CG-5 «Scintrex»

Данные приборы на сегодняшний день являются самыми высокоточными в классе гравиметров, измеряющих приращения силы тяжести между пунктами наблюдений.

Основные технические параметры гравиметров CG-5:

- разрешение: 0.001 мГал;
- погрешность: 0.005 мГал;
- диапазон измерений: около 8000 мГал;
- температурная компенсация (термостатирование);
- низкий остаточный дрейф «нуль-пункта» прибора;
- накопление и осреднение данных с дискретностью: 1 измерение в секунду;
- фильтрация «выбросов»;
- непрерывная коррекция наклона;
- поправки за лунно-солнечные вариации;
- память до 12-ти Мб.



Геодезическая аппаратура

Trimble R7 GNSS , Javad Legacy-E

- Точность измерений - первые сантиметры. Спутниковые измерения проводятся в дифференциальном режиме с удалением от базовой станции до 25 км.
- GPS-данные обрабатываются в режиме «постобработки».
- Благодаря описанной GPS-аппаратуре исключены порубочные работы и практически не применяются традиционные методы плано-высотной привязки.



Компьютерная техника и программное обеспечение

- Полевая камеральная обработка ежедневно проводится на переносных компьютерах (NB) в полевых лагерях.
- Обработка дифференциальных спутниковых наблюдений осуществляется в специализированной программмах Trimble Business Center, Pinnacle, Trimble Geomatic Office.
- Для обработки и интерпретации гравиметрических и др. геофизических данных используется программный пакет Oasis Montaj («Geosoft»), Коскад 3D (МГГУ).
- Построение моделей геолого-геофизических разрезов проводится в программе GM-SYS, входящей в Oasis Montaj.



Методика и техника полевых работ

Гравиметрическая съёмка

Гравиметрические измерения проводятся в соответствии с техническими и методическими инструкциями. Основным руководящим методическим документом является «Инструкцией по гавиразведке», М., 1980 г.

Гравиметрическая съёмка проводится по следующей схеме:

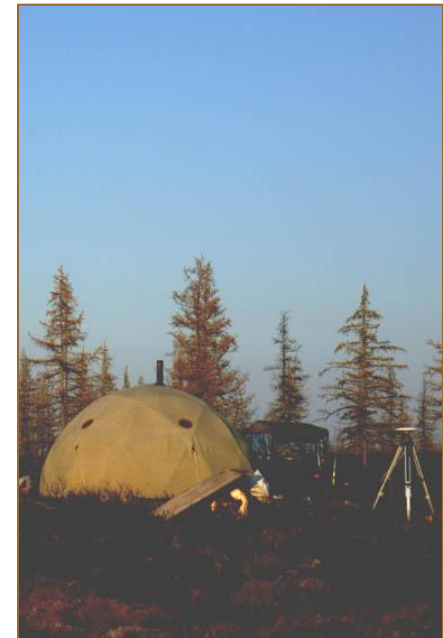
1. Создаётся полевая гравиметрическая опорная сеть.
2. Полевая опорная сеть привязывается к государственной опорной сети.
3. Точность определения силы тяжести на опорных пунктах в 1.5-2 раза выше, чем на рядовых.
4. Наблюдения на пунктах опорной сети проводятся, в основном, по центральной или двухступенчатой системе.
5. Наблюдения на рядовой сети проводятся, как правило, по однократной методике с опорой на ОГП.
6. Учет смещения нуляpunkта проводится по каждому звену рейса.
7. Для оценки качества съёмки проводятся независимые контрольные наблюдения в объеме 5-10%.
8. Для оценки качества построения гравиметрической карты проводятся наблюдения на интерполяционных профилях с шагом вдвое более частым, чем на рядовых профилях.

По мере поступления материалов полевых измерений выполняется текущая обработка материалов гравиметрической съёмки (ежедневно). Она включает:

- вычисление наблюденных значений силы тяжести;
- учет нормального поля;
- введение поправок за высоту и притяжение промежуточного слоя;
- вычисление аномалий силы тяжести (Буге).

Камеральная обработка материалов выполняется после завершения полевых работ. Она включает:

- вычисление поправок за влияние рельефа местности;
- вычисление аномалий силы тяжести с различной плотностью промежуточного слоя;
- составление каталога опорных и рядовых пунктов;
- построение окончательных карт и графиков аномалий силы тяжести;
- выполнение различных трансформаций и геологическая интерпретация;
- составление отчета.



Топогеодезические работы

Топографо-геодезические работы проводятся с целью планово-высотной привязки пунктов гравиметрических наблюдений. Работы выполняются в Государственной системе координат высот.

Техническим руководством при производстве работ служат:

- инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ, 1997 г.;
- инструкция по гравиразведке, 1980 г.

Определение высот и координат производится с использованием комплектов двухчастотной GPS-аппаратуры Trimble R7 в дифференциальном кинематическом режиме с постобработкой. Базовые станции располагаются на полевой базе партии и в пределах площади работ.

Текущая обработка полевых материалов проводится ежедневно на полевой базе. Она включает:

- 1) Проверку качества полевых измерений после переноса данных с полевой аппаратуры на компьютер.
- 2) Ввод дифференциальных коррекций.
- 3) Передачу неуравненных координат и высот от базовых станций к пунктам полевых наблюдений.
- 4) Оценку качества полученных векторов и невязки замкнутых полигонов.

Камеральная обработка материалов выполняется после завершения полевых работ. Она включает:

- 1) Увязку базовых станций с пунктами государственной геодезической сети и друг с другом.
- 2) Увязку полевой сети гравиметрических наблюдений с базовыми станциями и пунктами триангуляции.
- 3) Оценку качества съемки по результатам контрольных измерений.
- 4) Составление каталога координат и высот пунктов наблюдений.

Метрологическое обеспечение работ

Гравиметрическая аппаратура

- Ежегодно, перед началом съёмочных работ, проводится метрологическая поверка гравиметров на гравиметрическом полигоне № 5 г. Санкт-Петербурга.
- Точность полевых измерений обеспечена соблюдением инструктивных положений и рекомендаций по выполнению полевых работ.

GPS-аппаратура для планово-высотной привязки

- Используемые GPS-приёмники Trimble R7 проходят поверку в ЗАО НПП «Навгеоком» (Москва) и допущены к применению в качестве рабочего средства измерений.



При съемке с гравиметрами измеряют **относительные значения силы тяжести** последовательно во всех пунктах по отношению к одной исходной или опорной точке района исследований.

В исходной точке, как правило, **определяют абсолютное значение силы тяжести** путем переноса с помощью высокоточных гравиметров силы тяжести с ближайших обсерваторий и опорных пунктов региональной съемки страны.

Абсолютные значения силы тяжести в каждой точке могут быть получены путем алгебраического сложения абсолютного значения силы тяжести в исходной точке с относительным значением силы тяжести в данной точке.

При гравиметрической съемке больших площадей **сначала разбивают сеть полевых опорных точек** для создания жесткой системы значений силы тяжести, привязанной к опорным точкам региональной съемки страны.

Затем выполняют рядовые наблюдения во всех пунктах изучаемого района. Опорные точки размещают в местах, удобных для опознавания, и более или менее равномерно по изучаемой площади, а их число должно быть в 5—10 раз меньше, чем число рядовых пунктов наблюдений.

Опорная сеть должна отличаться **пониженной погрешностью измерений** значений силы тяжести, что достигается проведением **одновременных замеров несколькими высокоточными гравиметрами**, увеличением **быстроты съемки** (применение для передвижения вертолетов и автомобилей).

Выполнение работ в сжатые сроки способствует малому смещению нуля-пункта гравиметров. При создании опорной сети от 50 до 100 % всех наблюдений составляют контрольные измерения.

Наблюдения на опорной сети начинают и заканчивают в исходной точке, по отношению к которой рассчитывают приращение силы тяжести.

После замыкания полигона получают невязку, которую разбрасывают так же, как и при нивелировке.

Представление результатов гравиметрической съемки.

В результате съемки с гравиметрами строят прежде всего **графики (кривые) аномалий Буге Δg_B** : по горизонтали в масштабе съемки откладывают пункты наблюдения, а по вертикали — значения Δg_B в таком масштабе, чтобы 1 мм примерно составлял 3ε . Изредка строят карты графиков Δg_B : вдоль профилей наблюдений в масштабе съемки проставляют точки наблюдения, а перпендикулярно к профилям откладывают Δg_B (в масштабе $1 \text{ мм} \approx 3\varepsilon$).

Однако **основным результатом гравиметрической съемки являются графики и карты гравитационного поля**: на карте расположения точек наблюдения (в масштабе съемки) проставляют значения Δg_B и проводят **изолинии равных значений Δg_B или изоаномалы** [сечение изоаномал должно соответствовать $(2—3)\varepsilon$].

Таким образом, масштаб полевой гравиметрической съемки, ее точность и сечение изоаномал жестко связаны. Например, при укрупнении гравиметрической съемки от масштаба 1:500000 до масштаба 1:5000 погрешность определения Δg_B уменьшается от $\pm 1,5$ до $\pm 0,04$ мГал, а сечение изоаномал — от 5 до 0,1 мГал.

Карта измеренного гравитационного поля

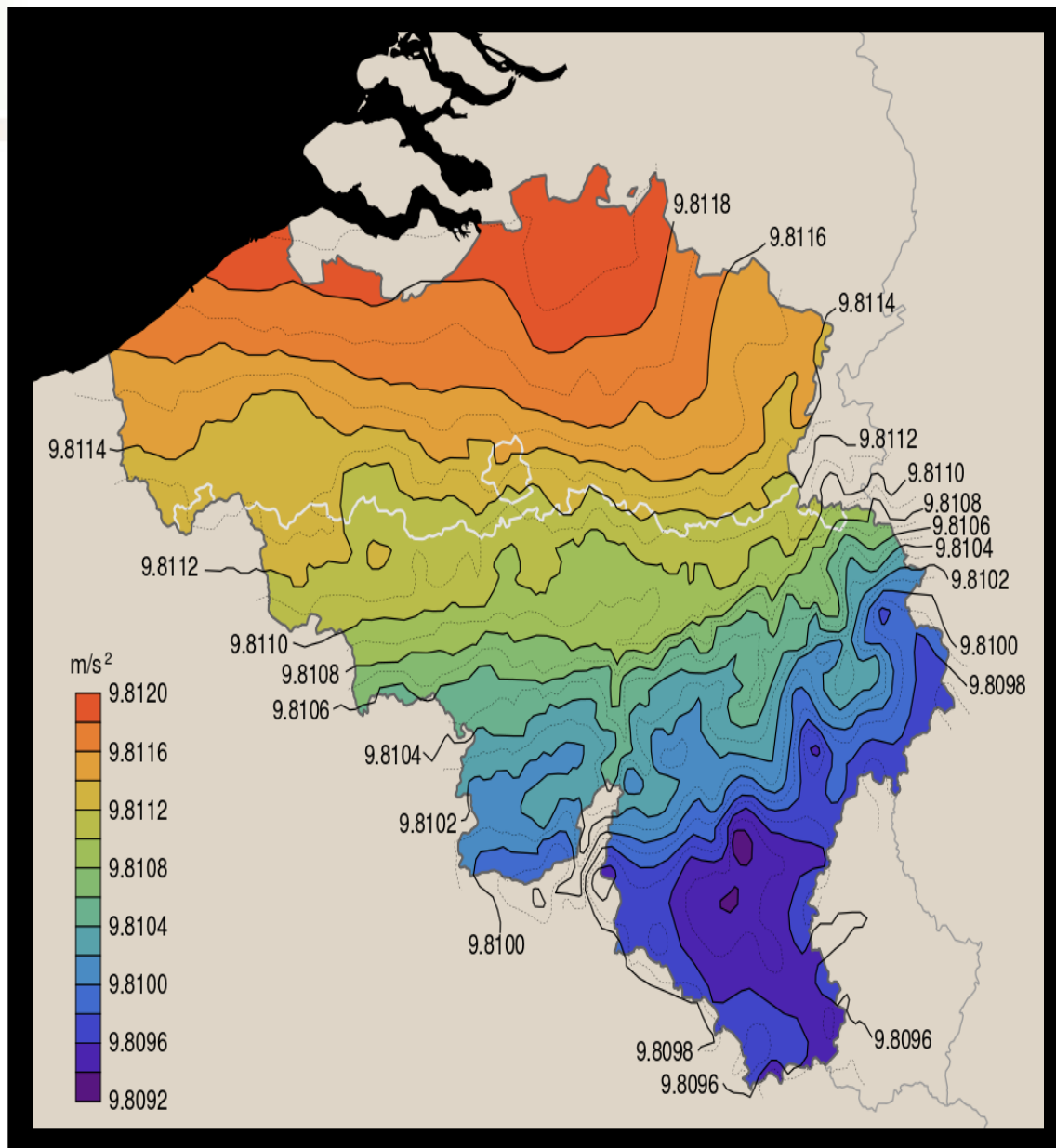
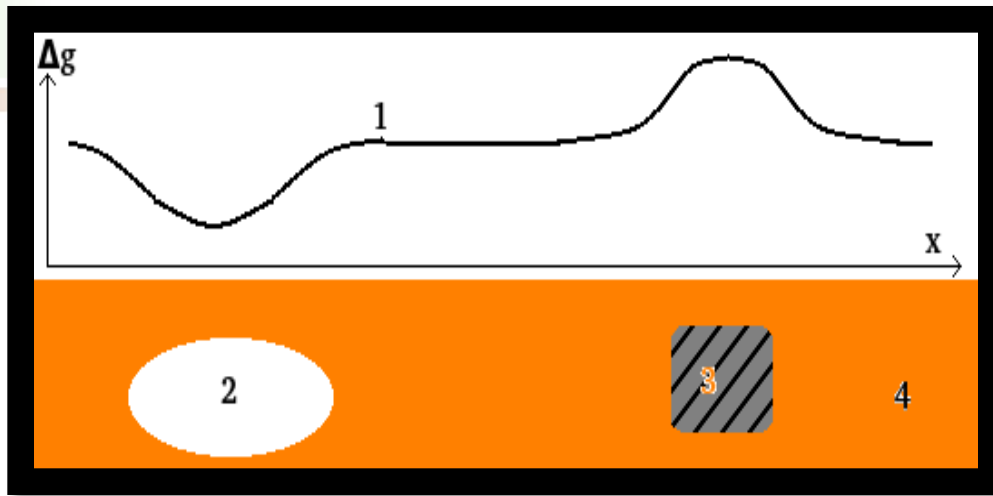


График силы тяжести



1. График силы тяжести
2. Карстовая воронка (растворение горных пород и образование пустот за счет действия воды)
3. Руда
4. Вмещающая порода

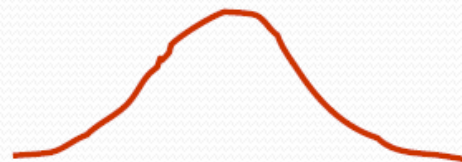
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Прямая задача

?



Обратная задача



?

Интерпретация

Качественная

Количественная

Анализ результатов гравиметрических наблюдений

- В результате гравиметрической съемки рассчитывают аномалии силы тяжести в редукции Буге (разность между измеренным g_n и нормальными значениями силы тяжести), обусловленные плотными неоднородностями среды, и ведут их геологическую интерпретацию.
- Интерпретация данных гравirazведки основана на физико-математическом и геологическом моделировании, включающем анализ гравитационных аномалий с использованием информации об изучаемом районе.

При измерении параметров гравитационного поля в воздухе, на земной поверхности, акваториях морей и океанов наблюдают их изменения, обусловленные в основном двумя причинами:

1. Планетарными особенностями Земли (скорость вращения, масса, форма поверхности, внутреннее строение), создающими плавно изменяющееся поле, называемое нормальным.
2. Различием плотности горных пород и руд, связанным с плотностными неоднородностями среды, образующими аномальное поле силы тяжести.

Анализ результатов гравиметрических наблюдений

От других геофизических методов гравиразведка отличается сравнительно большой производительностью полевых наблюдений и успешно применяется при решении самых различных геологических задач с глубиной исследований от нескольких метров (при разведке окрестностей горных выработок) до десятков километров (при определении мощности земной коры и литосферы).

Гравиметрическая разведка широко применяется для исследования плохо изученных районов. В этих исследованиях сила земного притяжения измеряется со столь высокой точностью, что даже небольшие ее изменения, обусловленные присутствием погребенных масс горных пород, позволяют определить глубину и форму их залегания.

Из теории аномального гравитационного поля следует, что изменение (аномалия) силы тяжести обусловлено размерами и формой возмущающего геологического объекта, его глубиной залегания и величиной так называемой избыточной или эффективной плотности $\Delta\sigma$, представляющей собой разность плотности пород аномалообразующего объекта (структуры) и вмещающих пород:

$$\Delta\sigma = \sigma_{стр} - \sigma_{вм}.$$

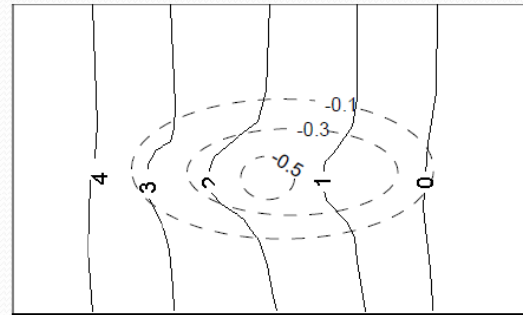
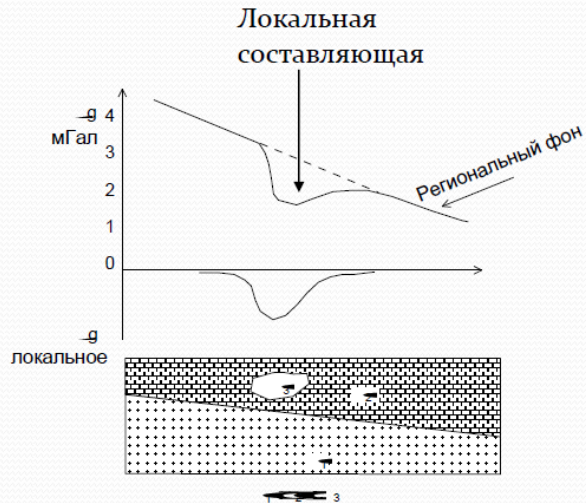
В зависимости от геологической обстановки избыточная плотность $\Delta\sigma$ обычно изменяется в пределах нескольких десятых грамма на кубический сантиметр и имеет различный знак. Например, разница значений плотности между кристаллическим фундаментом и осадочным комплексом и соответствующий перепад плотности на границе поверхности фундамента составляет 0,1—0,3 г/см³. Одна из самых резких плотностных границ находится между земной корой и мантией (граница Мохоровичича), где фиксируется перепад плотности 0,3—0,6 г/см³. Избыточная плотность соленосных пород по отношению к вмещающим осадочным породам составляет около - 0,2 г/см³, что предопределяет возникновение над соляными куполами отрицательных аномалий силы тяжести.

Теоретически и практически интенсивность аномалий силы тяжести Δg_B от геологических объектов составляет от долей до первых десятков миллигал, что составляет 10^{-5} — 10^{-7} от силы притяжения Земли. Поэтому в гравиразведке для выявления таких тонких гравитационных эффектов от геологических структур разработана специальная высокочувствительная аппаратура и методика полевых работ.

Первичная обработка результатов и качественная интерпретация

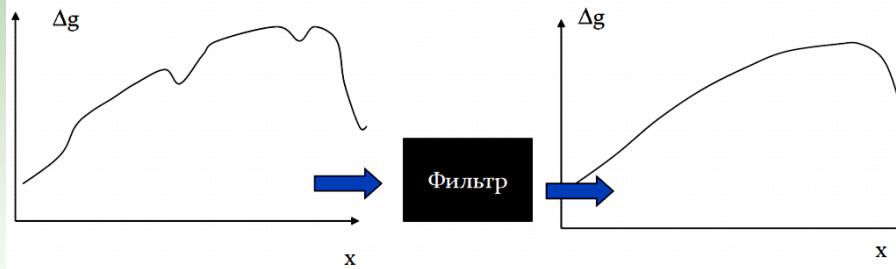
- На региональном этапе работ гравиразведка позволяет главным образом определить мощности осадочных отложений (чехла), рельеф фундамента.
- На поисковом этапе работ выявляются локальные аномалии. С которыми связаны перспективные в отношении нефти и газа антиклинальные складки, а также зоны разломов, отдельные тела интрузий.
- На разведочном этапе (высокоточная гравиразведка) уточняется геометрия локальных структур и латеральные плотностные неоднородности.
- В этом случае данные интерпретируются вместе с данными бурения и сейсморазведки.

Качественная интерпретация



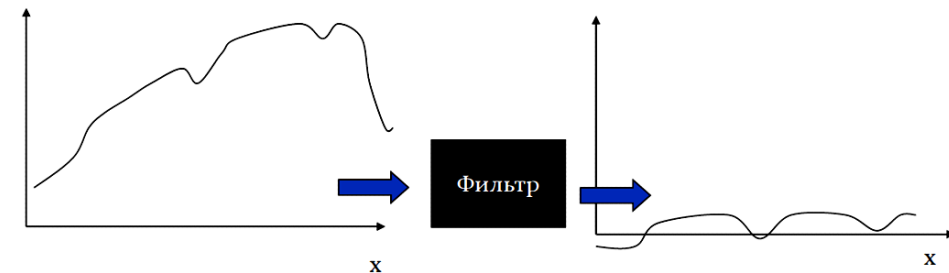
Трансформации - это преобразование поля, направленное на усиление региональных или локальных составляющих

А. Пространственная фильтрация данных (фильтр низких частот)



Простейший фильтр - сглаживание способом скользящего среднего

А. Пространственная фильтрация данных



$$\Delta g_{\text{лок}} = \Delta g - \Delta g_{\text{пер}} - \text{остаточные аномалии}$$

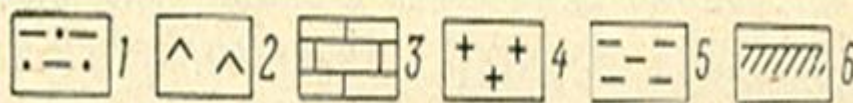
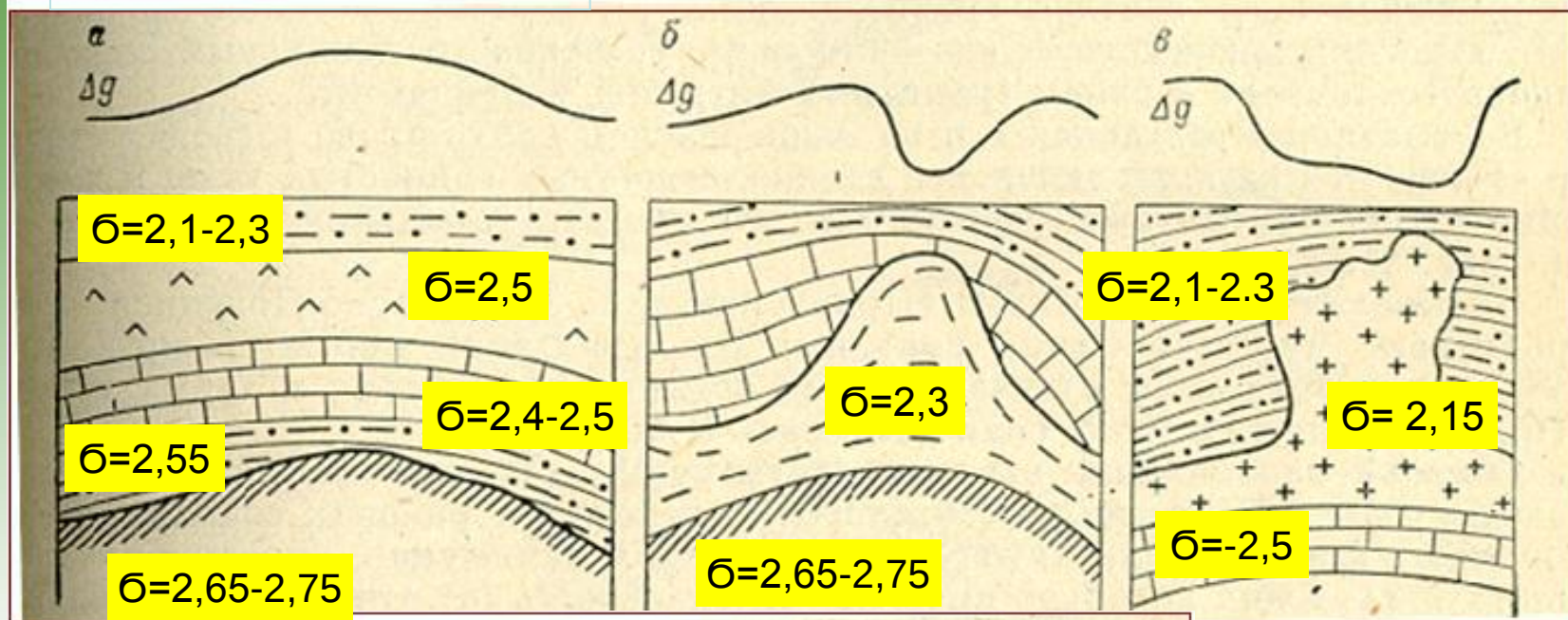
Примеры качественной интерпретации аномальных значений силы тяжести Δg_B

Обратное отображение структуры локальной аномалией

Прямое отображение структуры локальной аномалией

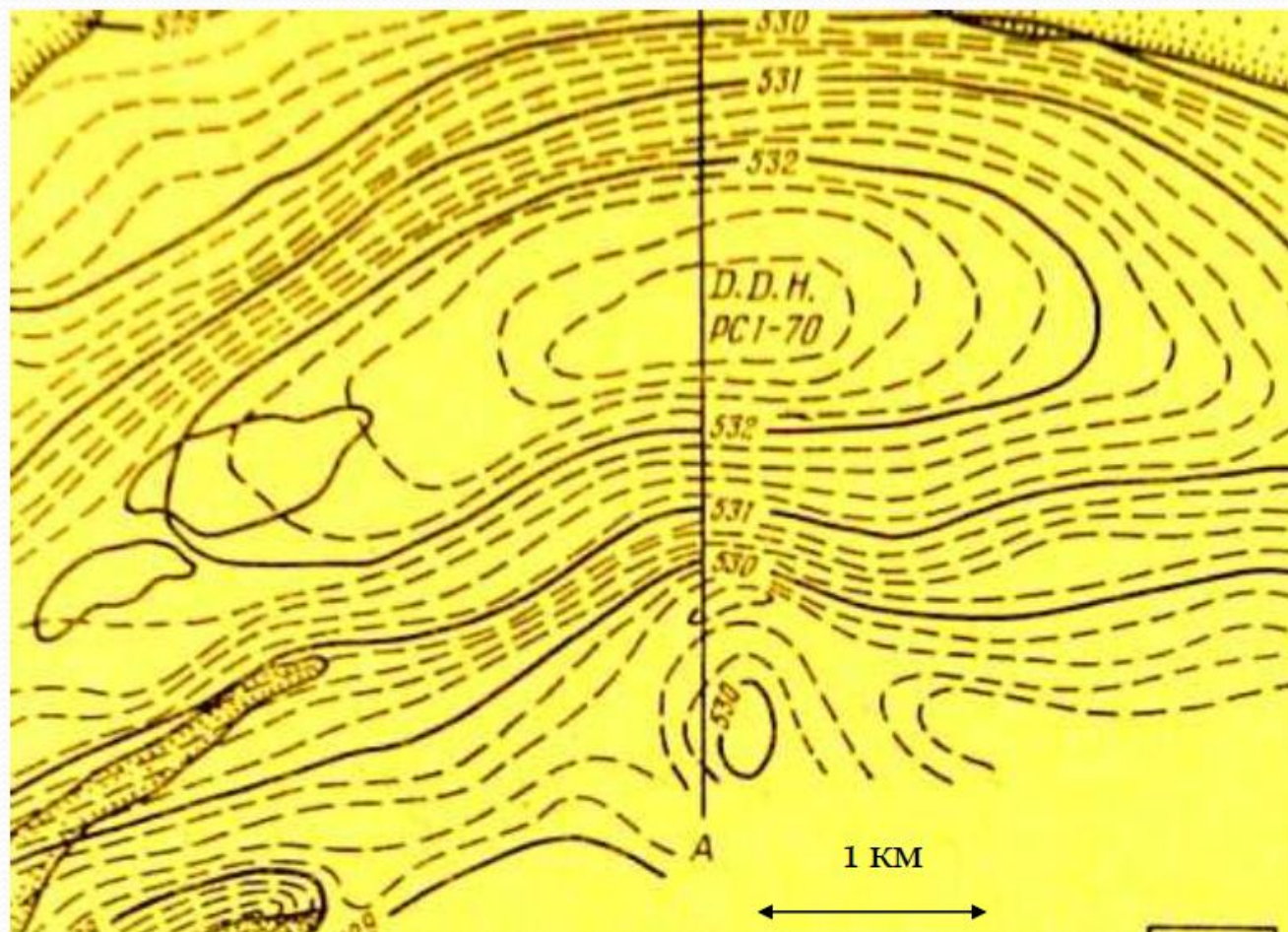
Минимум Δg над локальной структурой с раздувом глинистых толщ в кровле

Минимум Δg над соляным куполом



1-песчано-глинистые отложения; 2- гипсо-ангидритовые толщи; 3- карбонаты; 4 – соли; 5 – глины; 6 – подошва осадочного чехла

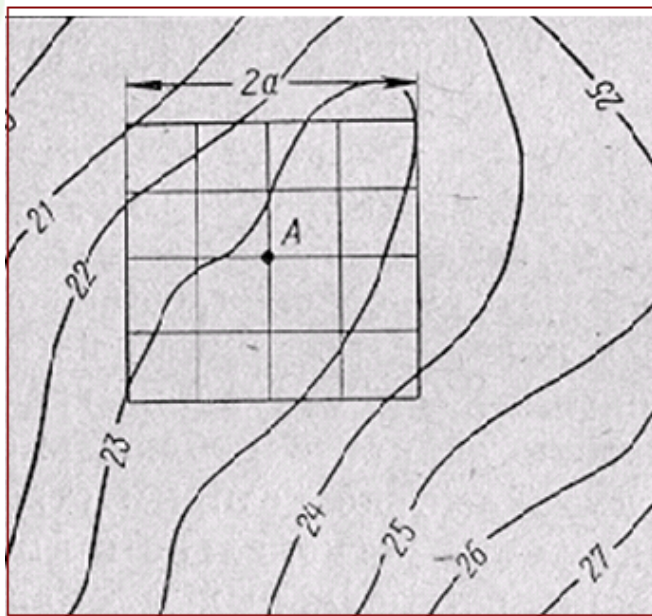
Объяснение аномалий, связанных с осадочным чехлом



Карта Δg_B участка в северном Ньюфаундленде

Трансформации. Выделение локальных аномалий.

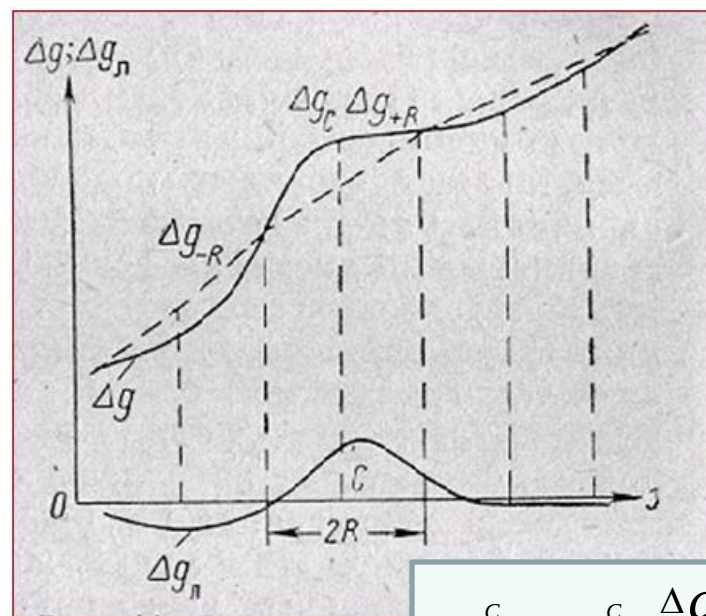
Разделение аномалий способом осреднения



$$\Delta g_{\ddot{E}}^A = \Delta g^A - \Delta g_{\tilde{\partial}}^A$$

$$R_{\text{лок}} < a < R_{\text{рег}}$$

Разделение аномалий способом вариаций

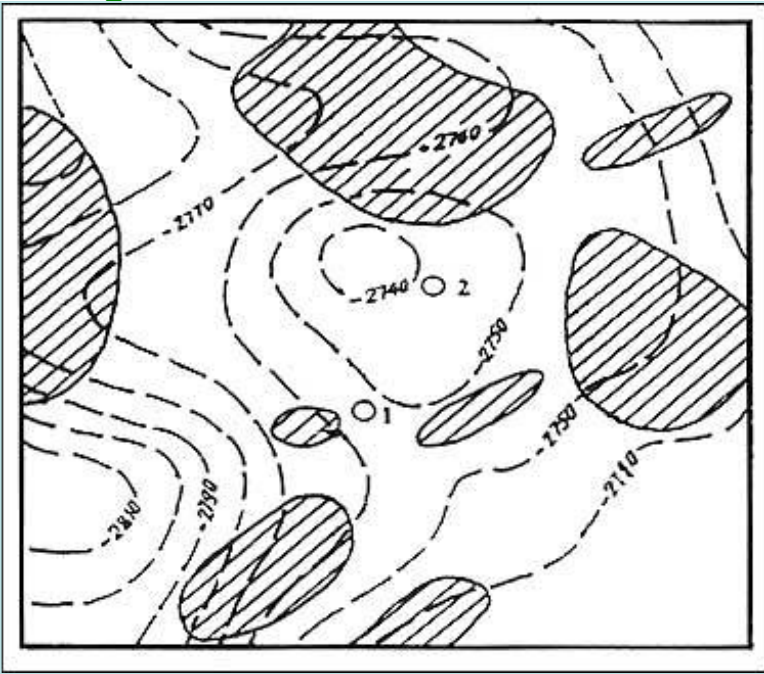


$$\Delta g_{\ddot{E}}^C = \Delta g^C - \frac{\Delta g_{-R} + \Delta g_{+R}}{2}$$

Δg^C - значение силы тяжести в т.С

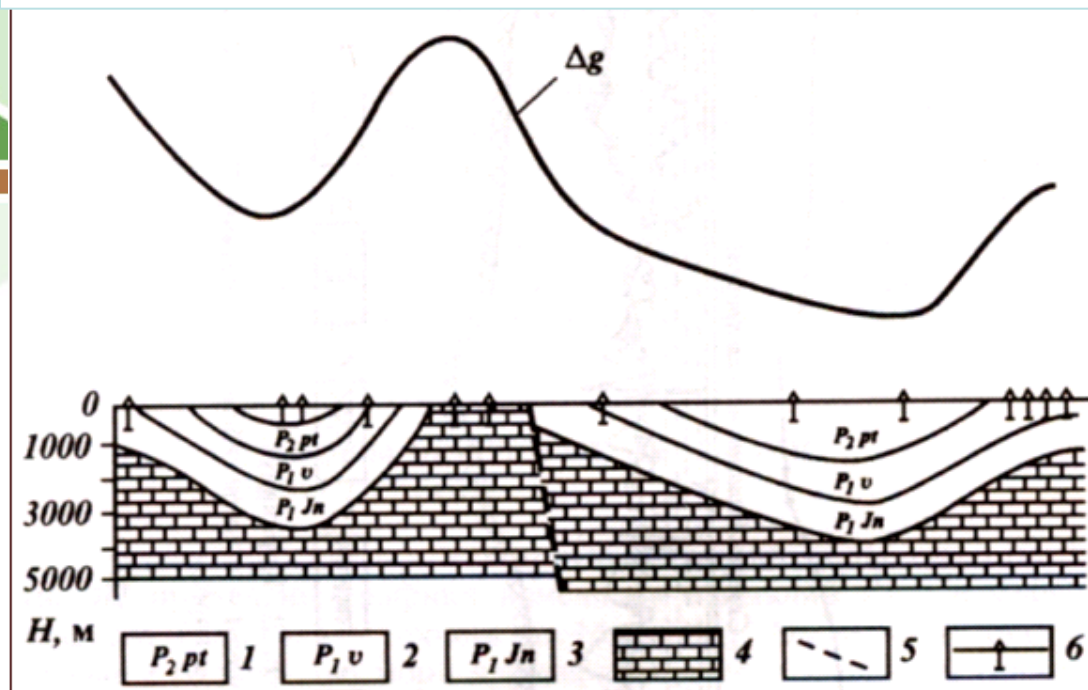
$\Delta g_{-R}, \Delta g_{+R}$ - значение силы тяжести на концах радиуса R

$R = (0,7-1,0)L$, L-ширина локальной аномалии на половине ее амплитуды



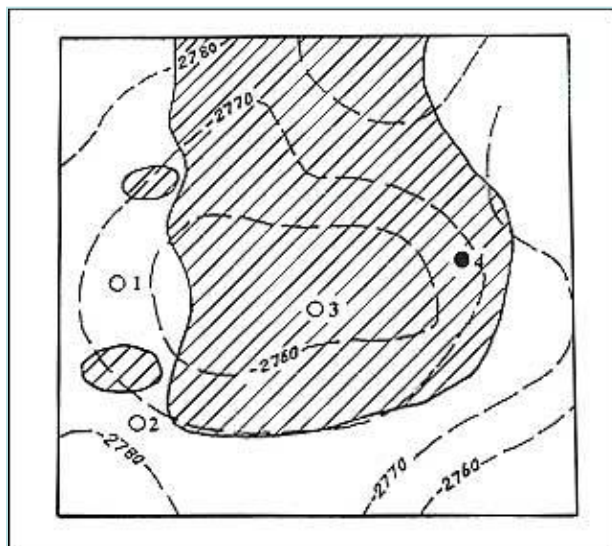
- 1-изогипсы отражающего горизонта;
- 2- контур положительной гравитационной аномалии;
- 3- контур отрицательной гравитационной аномалии;
- 4- скважины предшествующего бурения;
- 5- скважины последующего бурения

Примеры качественной интерпретации аномальных значений силы тяжести Δg_B



Определение мощности мезозойско-кайнозойских отложений

Геологический разрез и кривая Δg по профилю через северную часть гряды Чернышова и Роговское поднятие в Печорском угленосном бассейне (по Б.Д. Полетаеву)



1 — печорская серия; 2 — воркутская серия; 3 — юньягинская серия; 4 — допермские известняки; 5 — тектонические нарушения; 6 — скважины

Пример сопоставления данных высокоточной гравиразведки, сейсморазведки и результатов бурения (скв. 3 не вскрыла продуктивный горизонт).

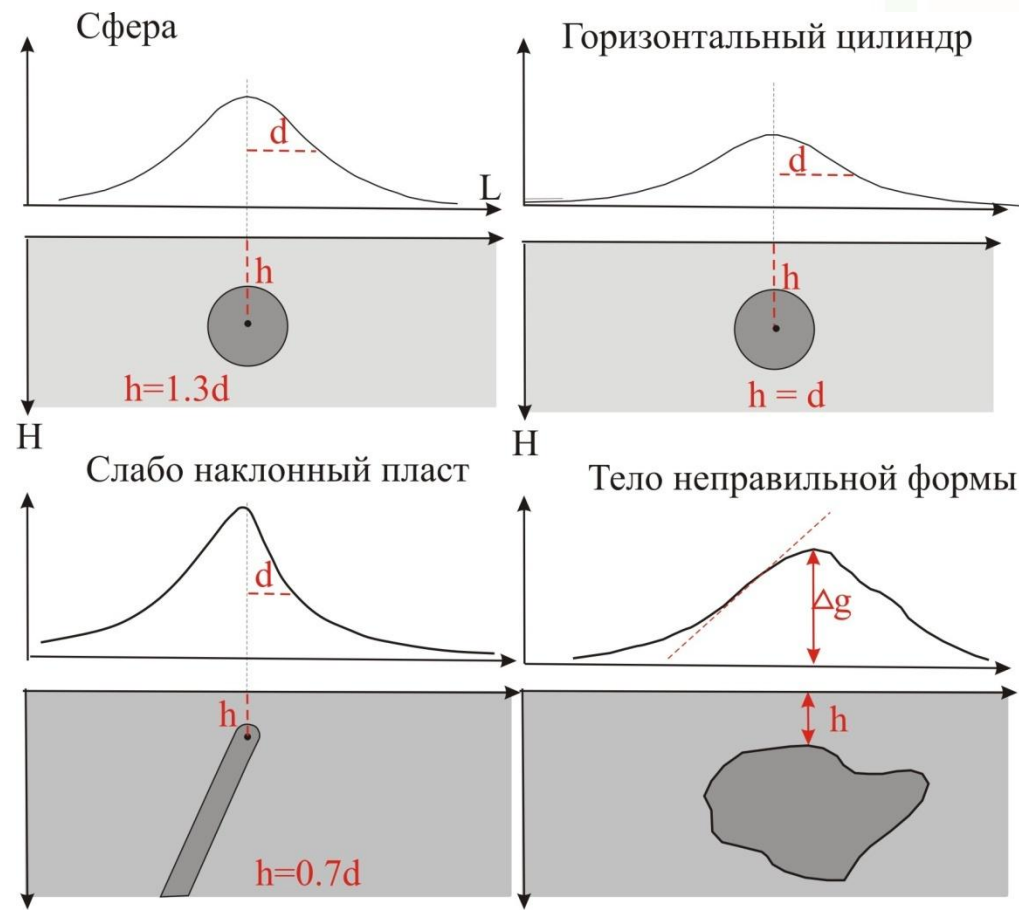
Количественная интерпретация гравитационных аномалий

- Интерпретация данных гравиразведки (как и других геофизических методов) основана на физико-математическом и геологическом моделировании, включающем анализ гравитационных аномалий с обязательным использованием априорной геолого-геофизической и петрофизической (плотностной) информации об изучаемом районе.

Основой интерпретации данных гравиразведки является решение прямых и обратных задач.

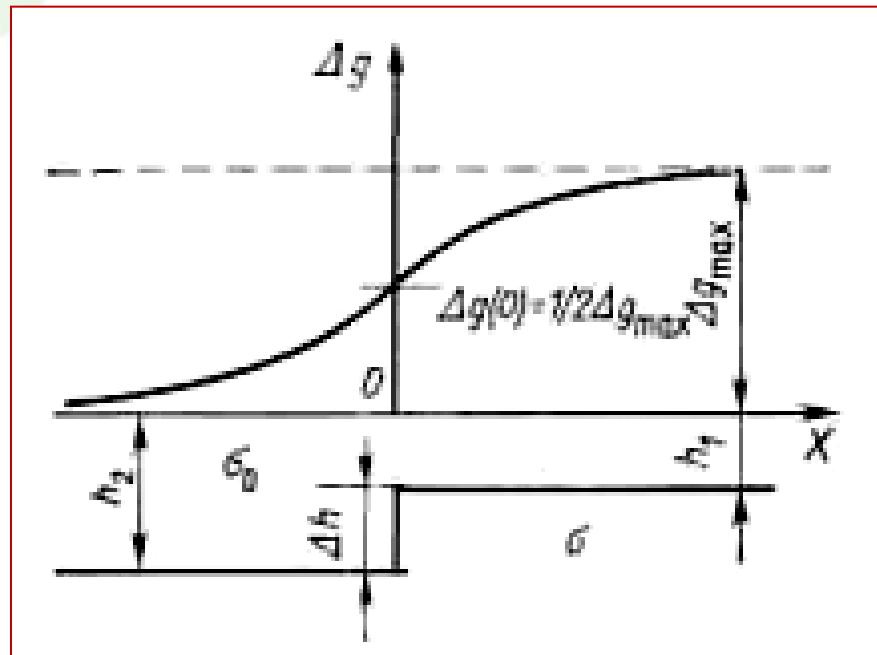
По заданным параметрам аномальных источников можно рассчитать аномалию.

По аномалии можно оценить лишь отдельные параметры аномальных источников.



Количественная интерпретация. Простейшие тела.

Кривые Δg над: вертикальным уступом



При решении обратной задачи пользуются соотношением

$$\begin{aligned} \Delta g &= 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty, \\ \Delta g &= f \sigma \pi (h_2 - h_1) \text{ при } x = 0; \text{ и} \\ \Delta g &= 2f \sigma \pi (h_2 - h_1) \text{ при } x \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

Тогда амплитуда сброса:

$$h_2 - h_1 = \Delta g_{\max} / 2f \sigma \pi$$

Положение проекции вертикальной плоскости сброса соответствует абсциссе точки, в которой $\Delta g = \Delta g_{\max} / 2$

Количественная интерпретация. Способ подбора.

- Палетка Гамбурцева (а) и пример ее использования для решения прямой и обратной задач гравиразведки (б).

Графики g_z :

- 1- расчетный, полученный с использованием палетки Гамбурцева;
- 2- наблюдаемый

$$g_z = 0.1 \cdot \sigma_{\text{изб}} \cdot N \cdot \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{р}}}$$

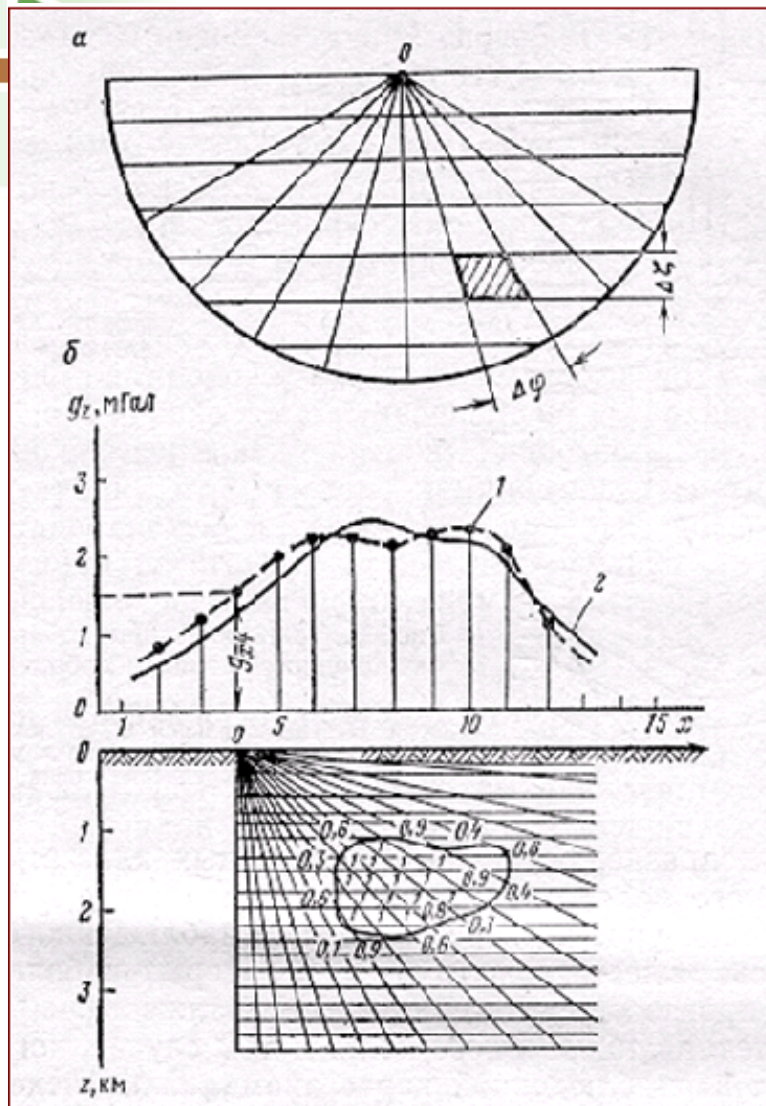
0,1- цена деления палетки+0,1 мГл

σ_{изб} – избыточная плотность аномалеобразующего тела;

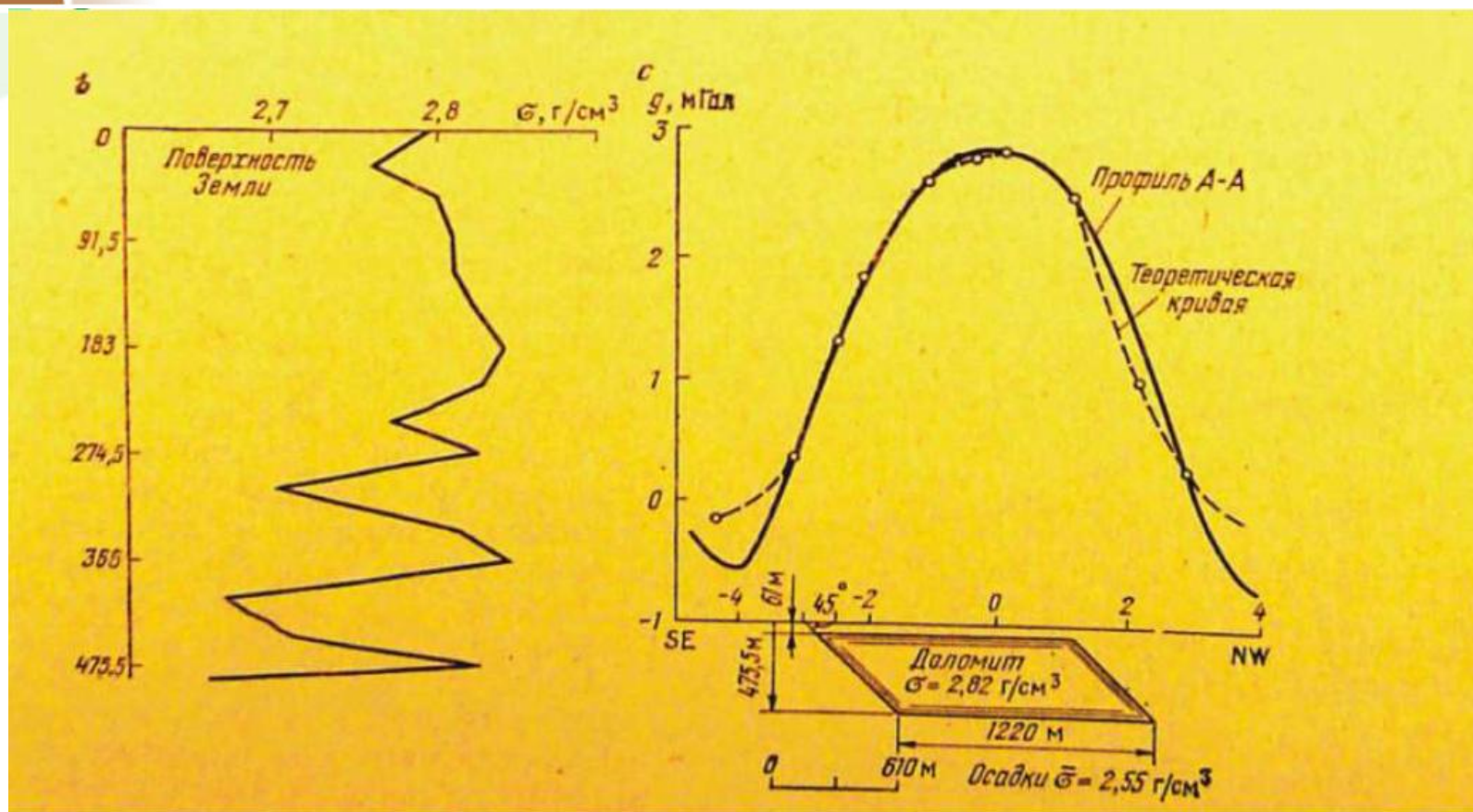
N- число трапеций палетки, попавших в контур тела;

M_п –масштаб палетки;

M_р- масштаб в котором изображено тело

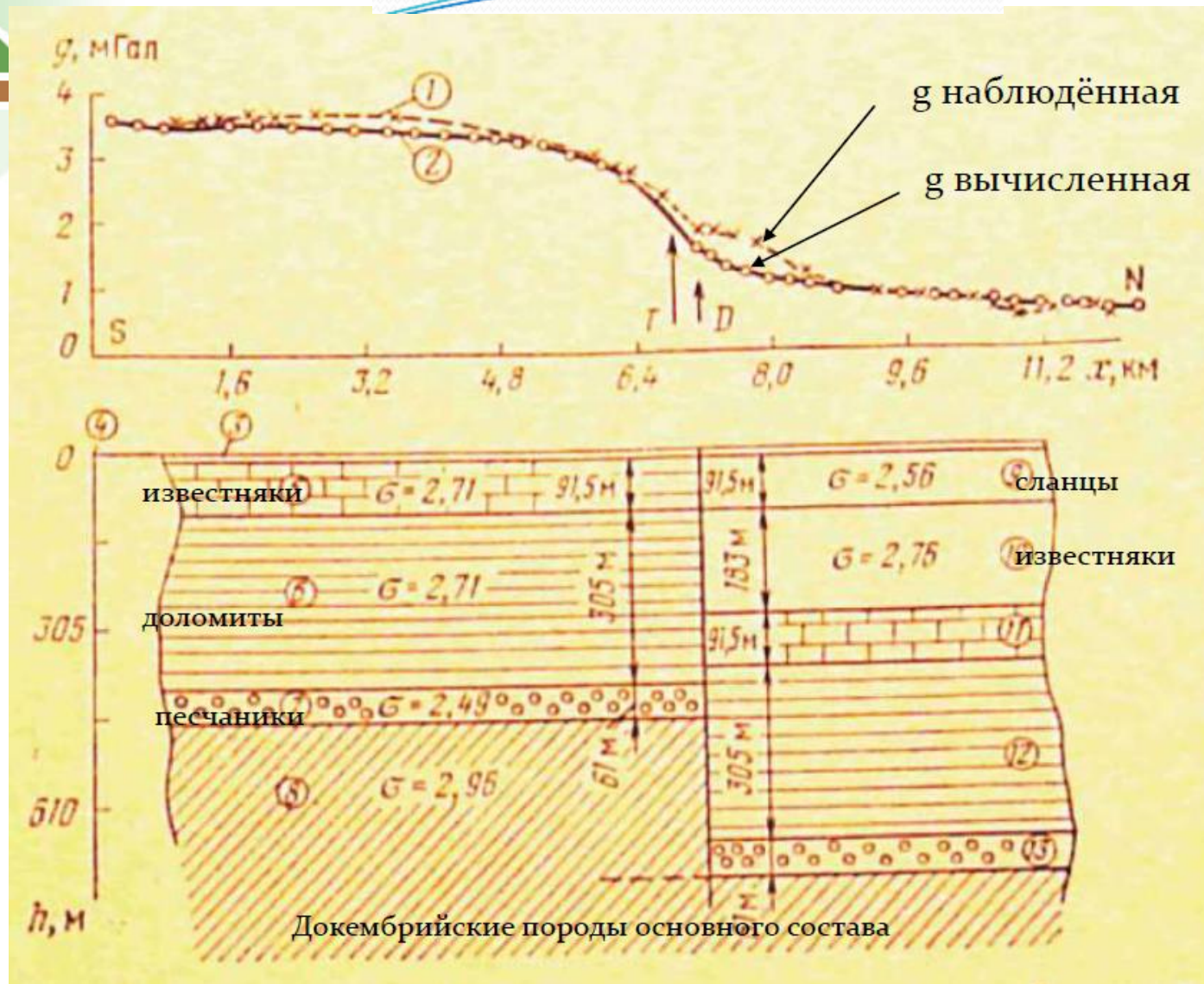


Количественная интерпретация. Способ подбора.

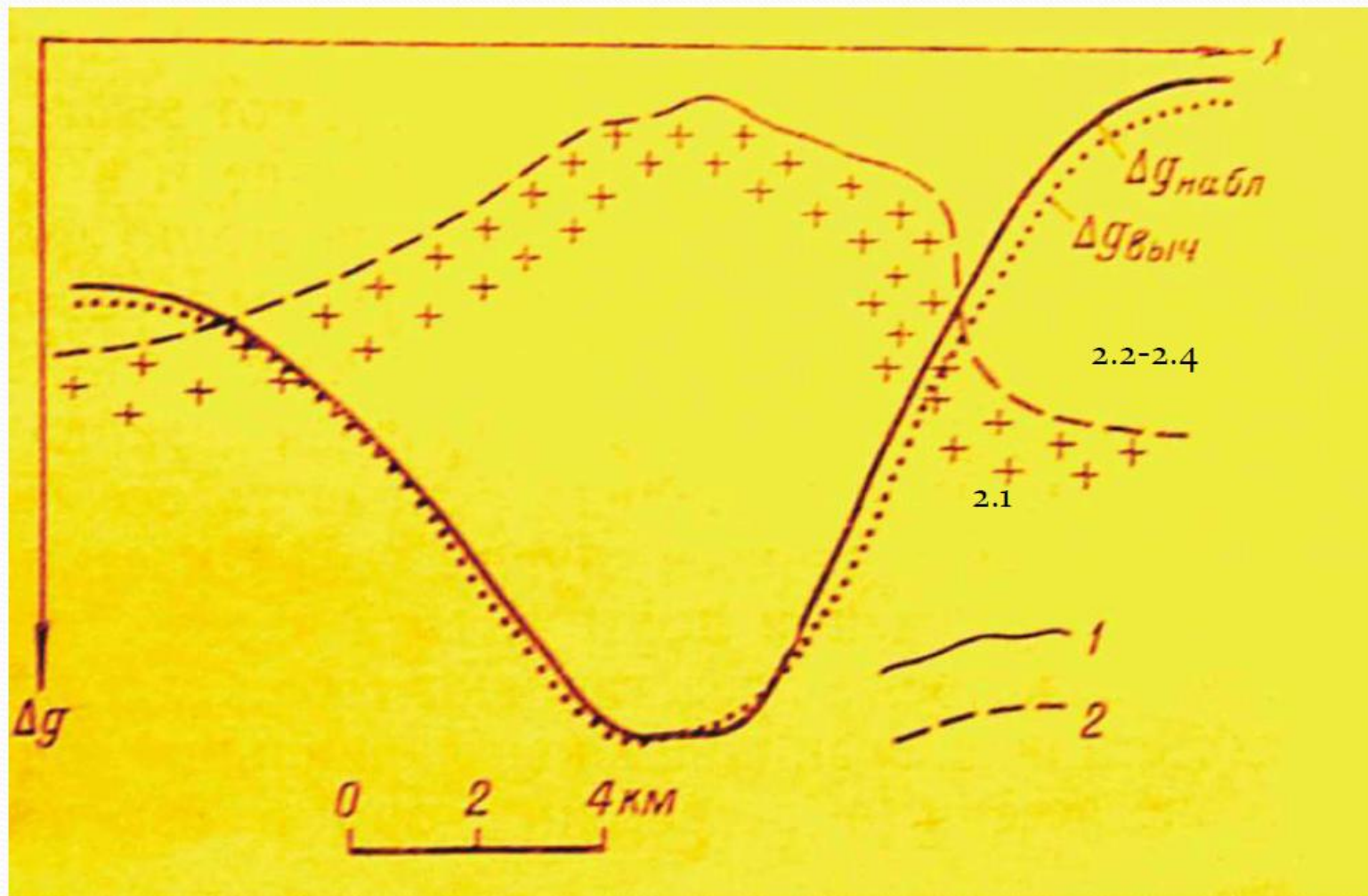


Количественная интерпретация. Способ подбора.

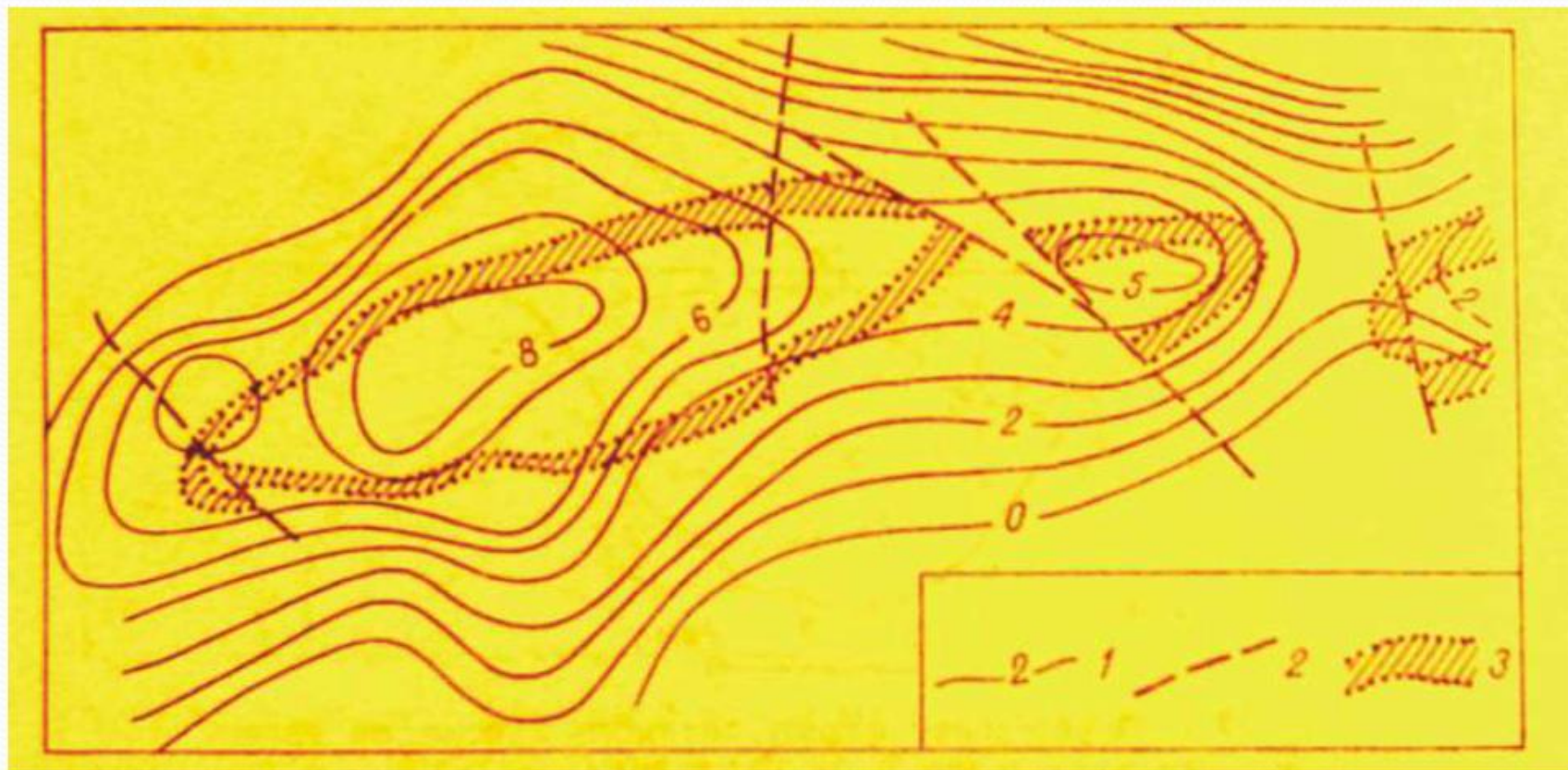
Оценка амплитуды сброса

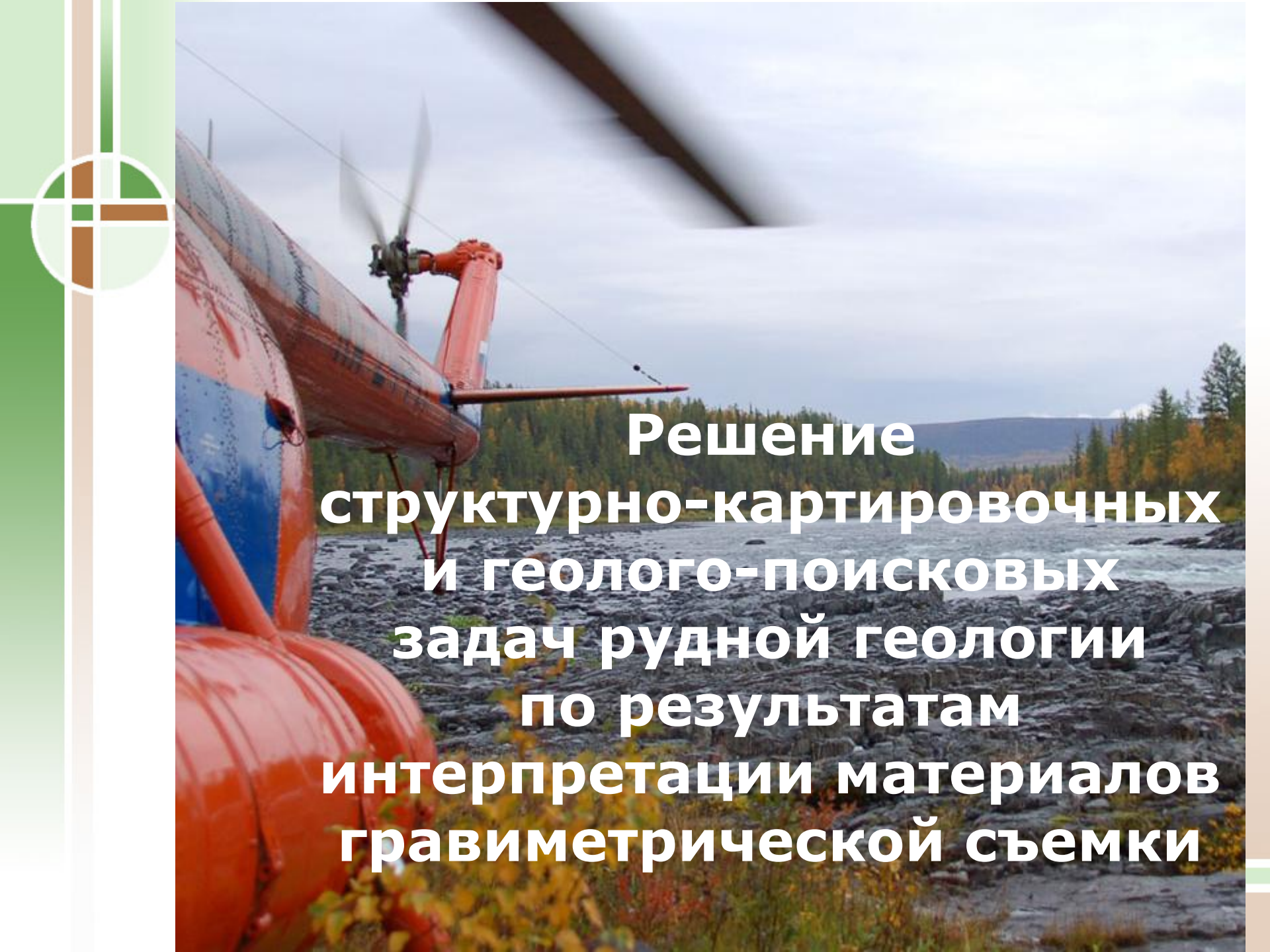


Отражение соляного купола в гравитационном поле



Отражение антиклинальной структуры в гравитационном поле





**Решение
структурно-картировочных
и геолого-поисковых
задач рудной геологии
по результатам
интерпретации материалов
гравиметрической съемки**

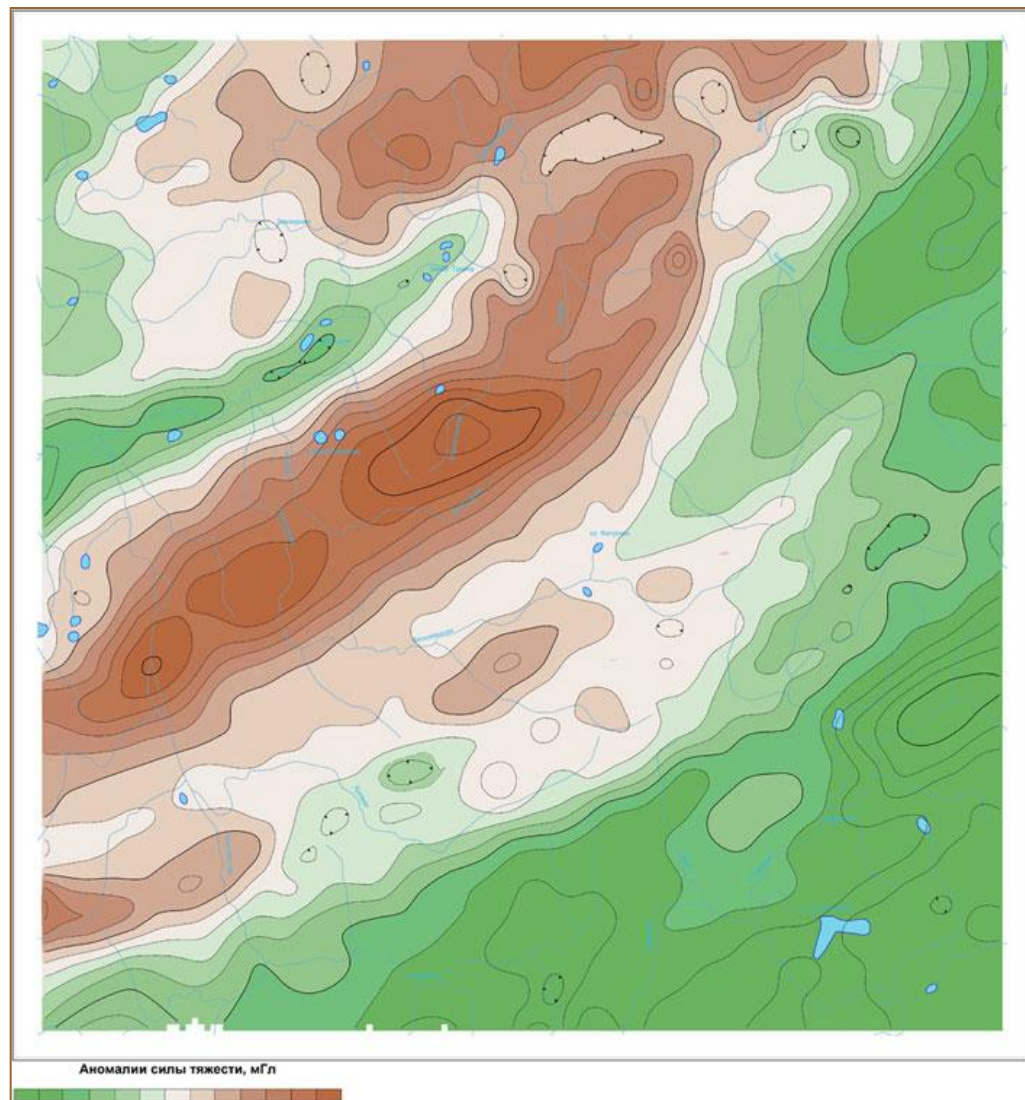
Гравиразведку применяют

- в комплексе с другими геофизическими методами также для разведки рудных и нерудных ископаемых, причем ее привлекают как **для крупномасштабного картирования** и выявления тектонических зон и структур, благоприятных для залегания тех или иных ископаемых, так и для непосредственных **поисков и разведки месторождений**.
- ***Существенное отличие рудной гравиметрии от нефтяной состоит в меньшей глубинности, большей детальности и точности разведки.***
- Классическим примером применения гравиметрии являются **поиски и разведка железорудных месторождений** (особенно Курская магнитная аномалия и Кривой Рог), где гравиразведку применяют для изучения структуры бассейна, картирования железорудной толщи и поисков богатых руд. На железорудных месторождениях наблюдаются локальные положительные аномалии за счет высокой плотности железосодержащих руд. Работы проводят совместно с магниторазведкой, что позволяет определить размеры, глубины залегания, мощности рудных залежей.
- Из-за высокой плотности **хромитов** гравиразведка практически является единственным методом поисков и разведки хромитовых руд.
- На **рудных колчеданных и полиметаллических месторождениях** гравиразведка существенно дополняет методы электроразведки при отделении рудных электрических аномалий от безрудных.
- С залежами колчеданных руд связаны интенсивные положительные аномалии за счет их повышенной плотности.

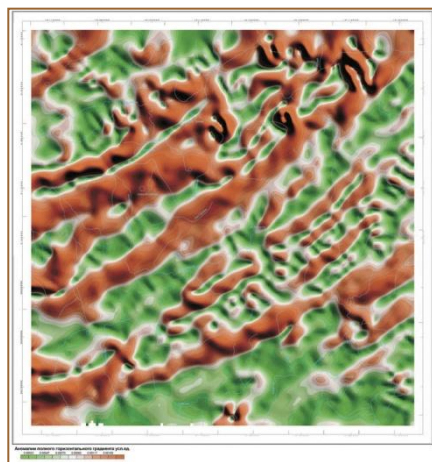
Гравиметрическое поле на карте отражает основные структурные элементы Таймырской складчато-надвиговой системы северо-восточного простирания

**Карта аномалий
силы тяжести
в редукции Буге**

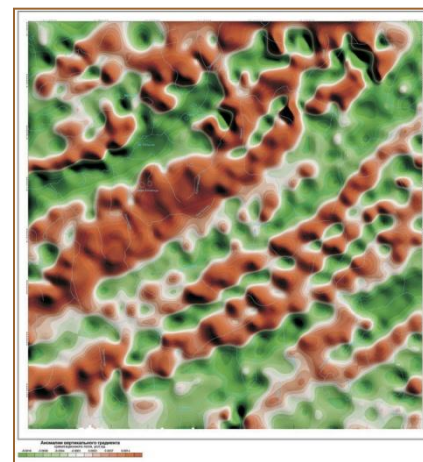
**Плотность
промежуточного
слоя – $2,67 \text{ г/см}^3$**



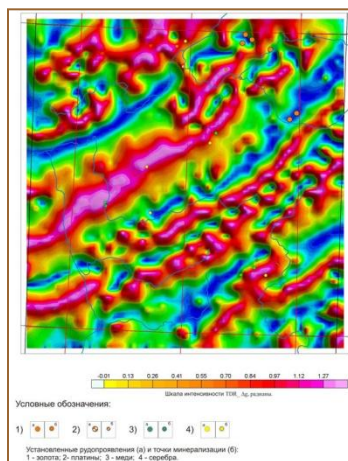
Для решения структурно-тектонических и прогнозно-поисковых задач использовались различные трансформанты потенциальных полей



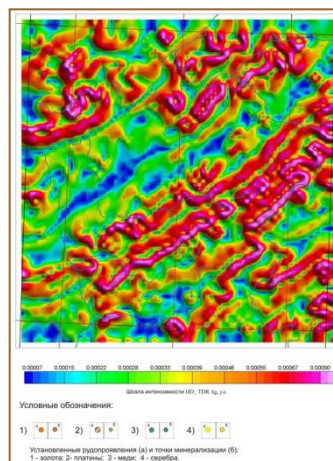
Карта полного горизонтального градиента гравитационного поля



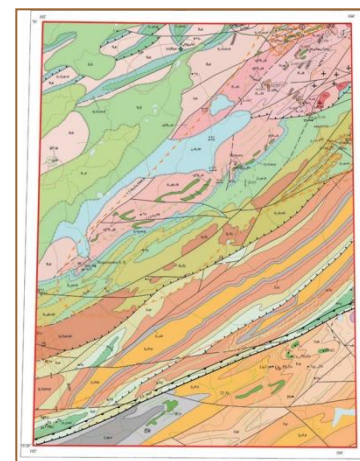
Карта вертикального градиента гравитационного поля



Карта трансформанты гравитационного поля
 $TDR_Dg = \arctg(VDR/THDR)$



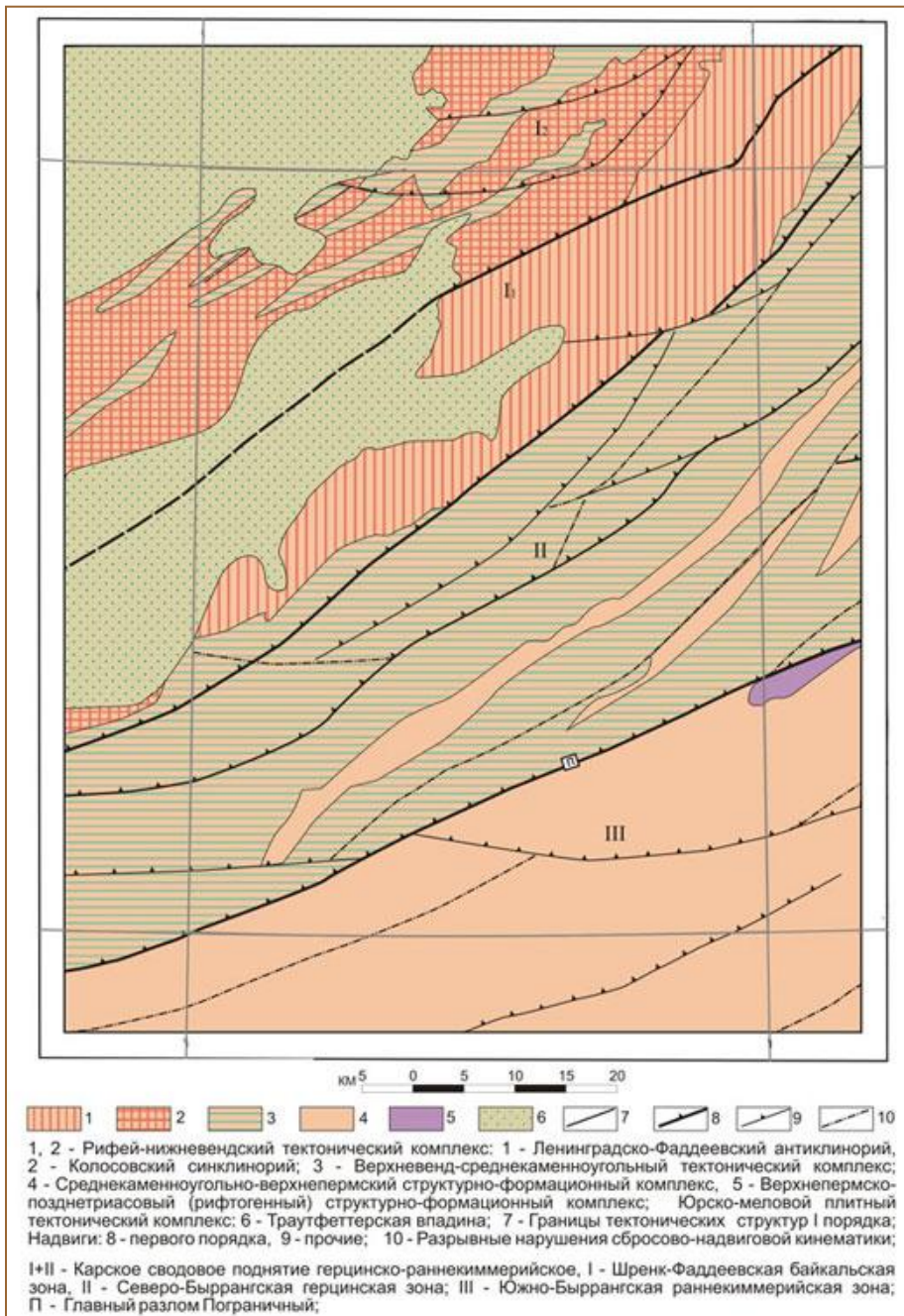
Карта трансформанты гравитационного поля
 $HD_TDR \square Dg =$
 $\sqrt{((dTDR/dx)^2 + (dTDR/dy)^2)}$



Геологическая схема

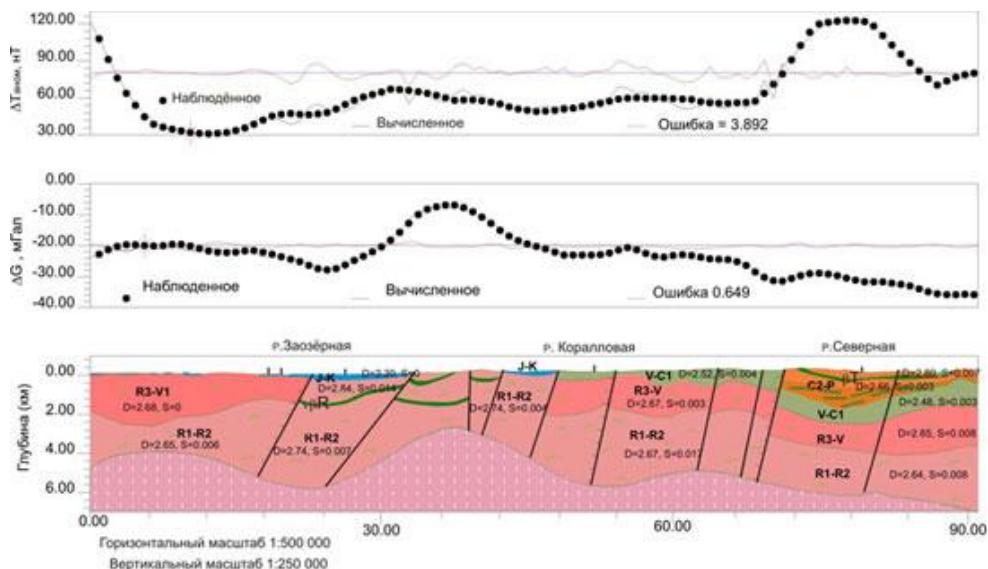
**На схеме показаны
основные
тектонические
нарушения
и геоблоки,
имеющие
контрастное
отражение
в гравитационном
поле**

Структурно- тектоническая схема



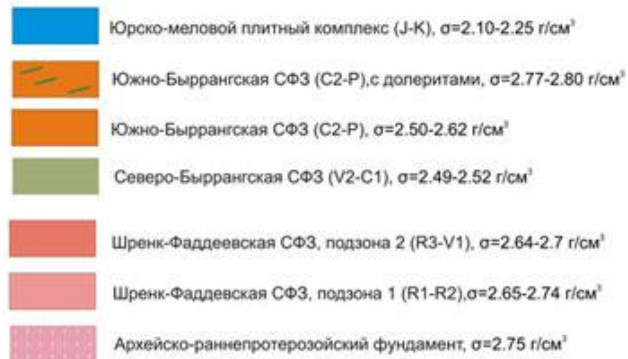
**На разрезе показаны
моделируемый
рельеф кровли
дорифейского
кристаллического
фундамента
и границы основных
структурно-
формационных
комплексов**

**Геолого-
геофизический
разрез**



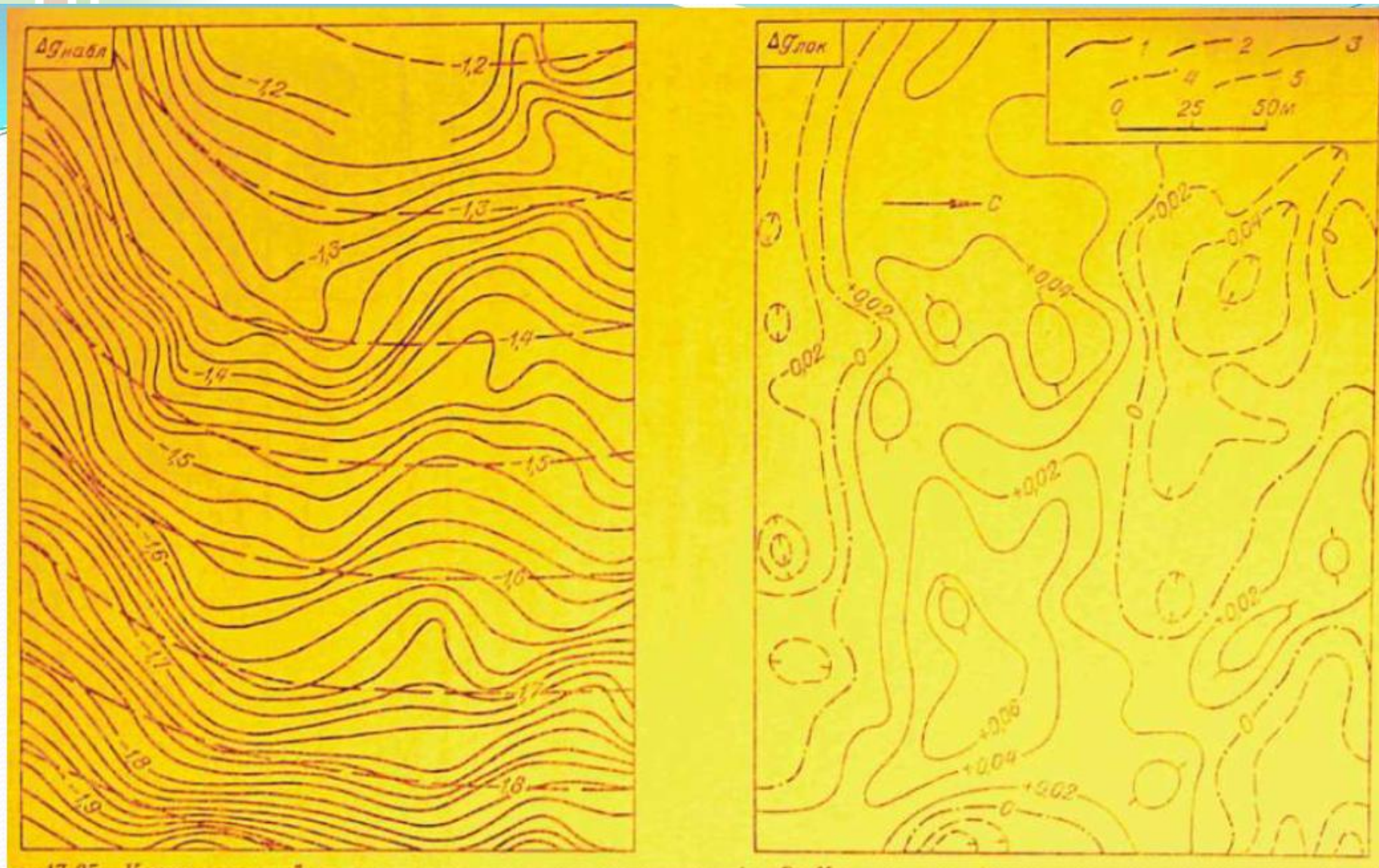
Условные обозначения

Структурно-формационные зоны и их средние плотности

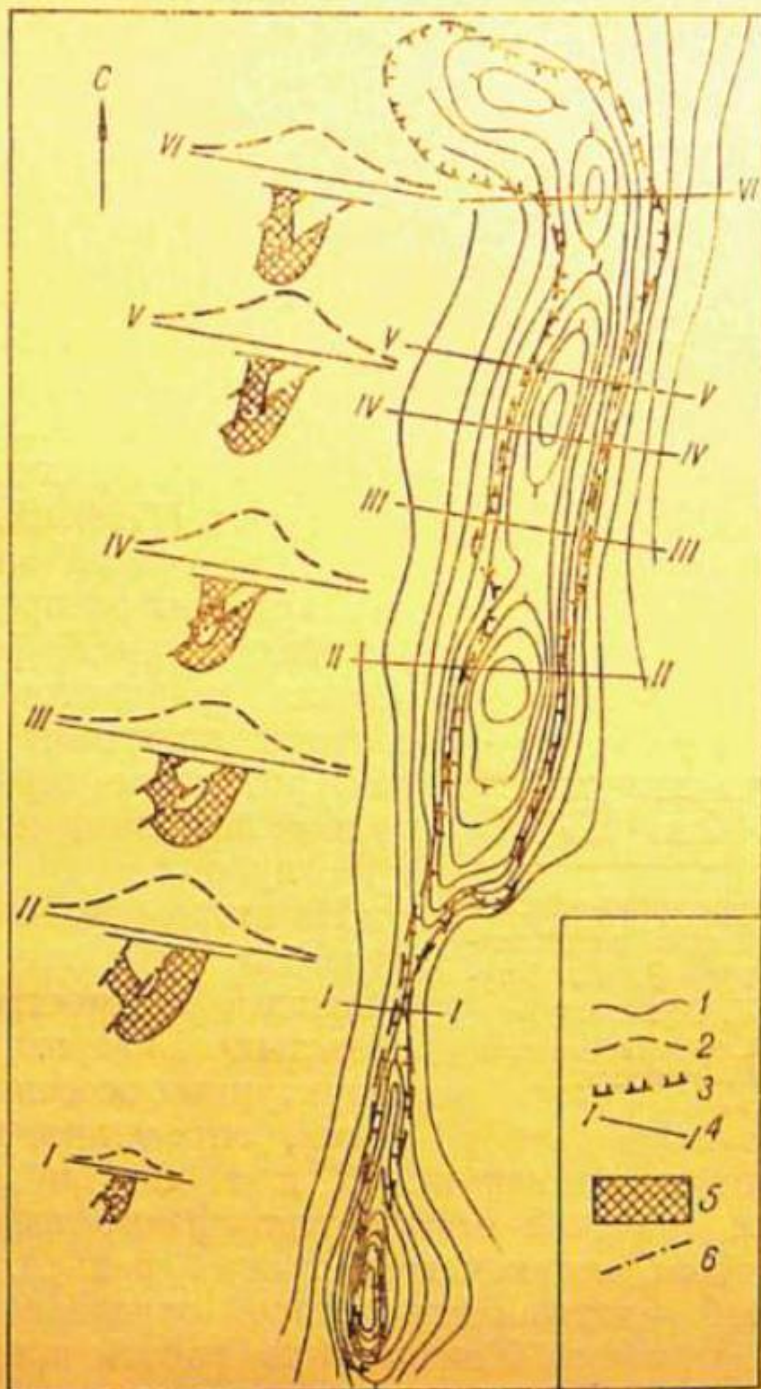


Интрузивные образования и их средние плотности





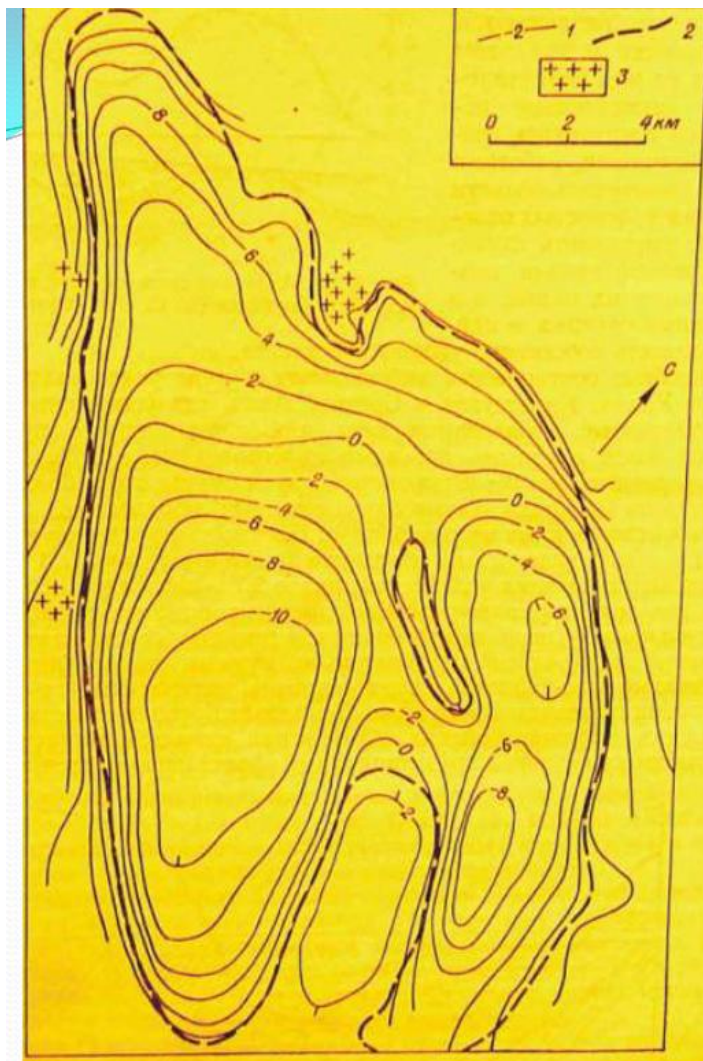
Карты наблюдаемого поля и локальных аномалий над хромитовым телом



Гравитационное поле
над телами железистых
кварцитов

(Руды: $2.84 - 5 \text{ г/см}^3$
Вмещающие породы:
 $2.88 - 3 \text{ г/см}^3$)

- В связи с разведкой **угольных месторождений** гравиметрию применяют как для определения границ угольного бассейна, так и для непосредственных поисков отдельных месторождений и пластов угля. В некоторых случаях мощные, неглубоко залегающие угольные пласты выделяются минимумами Δg_B за счет малой ($\sigma = 1,1 \text{ г/см}^3$) плотности углей.



Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге угленосного бассейна Колли (Австралия)

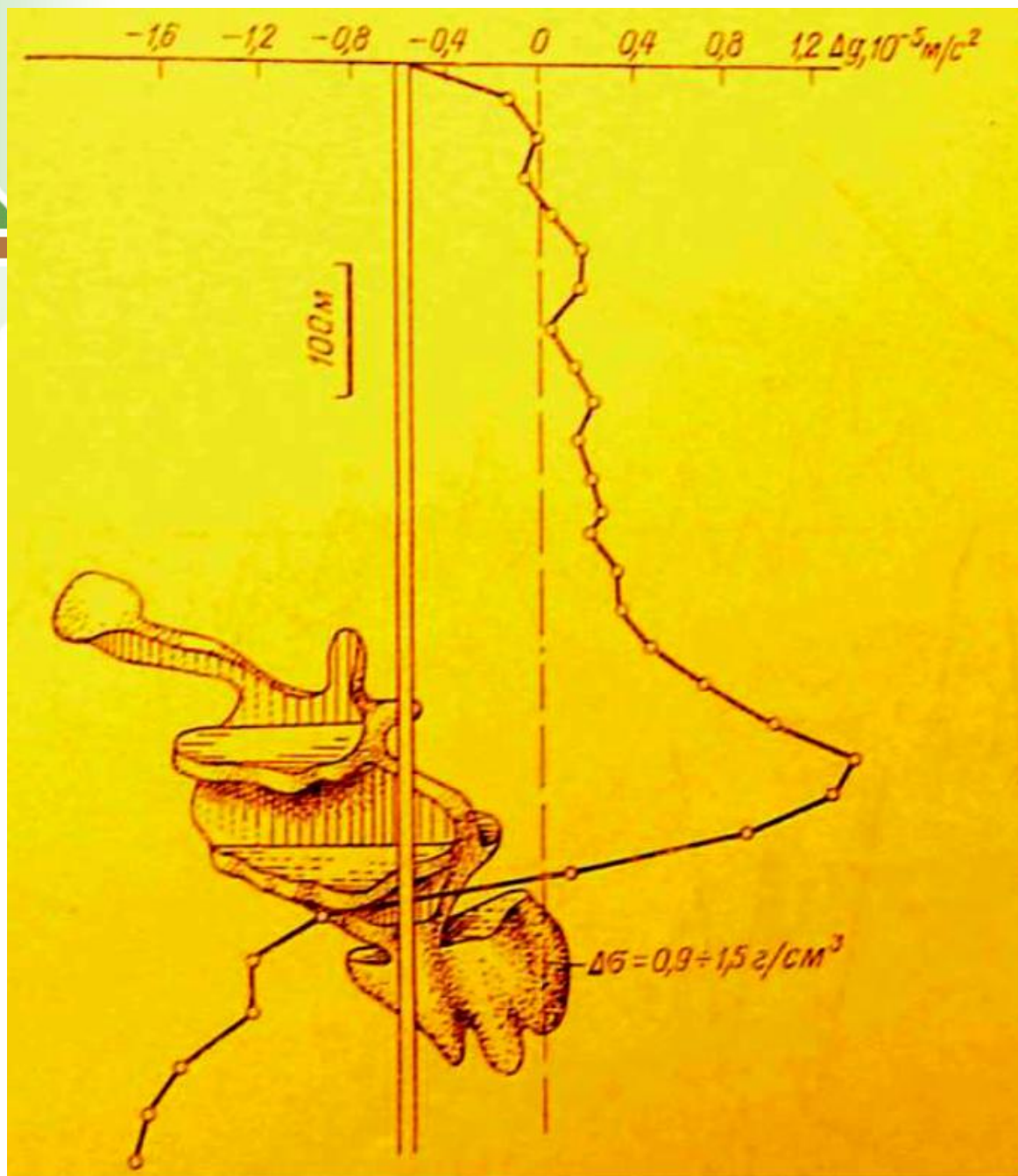
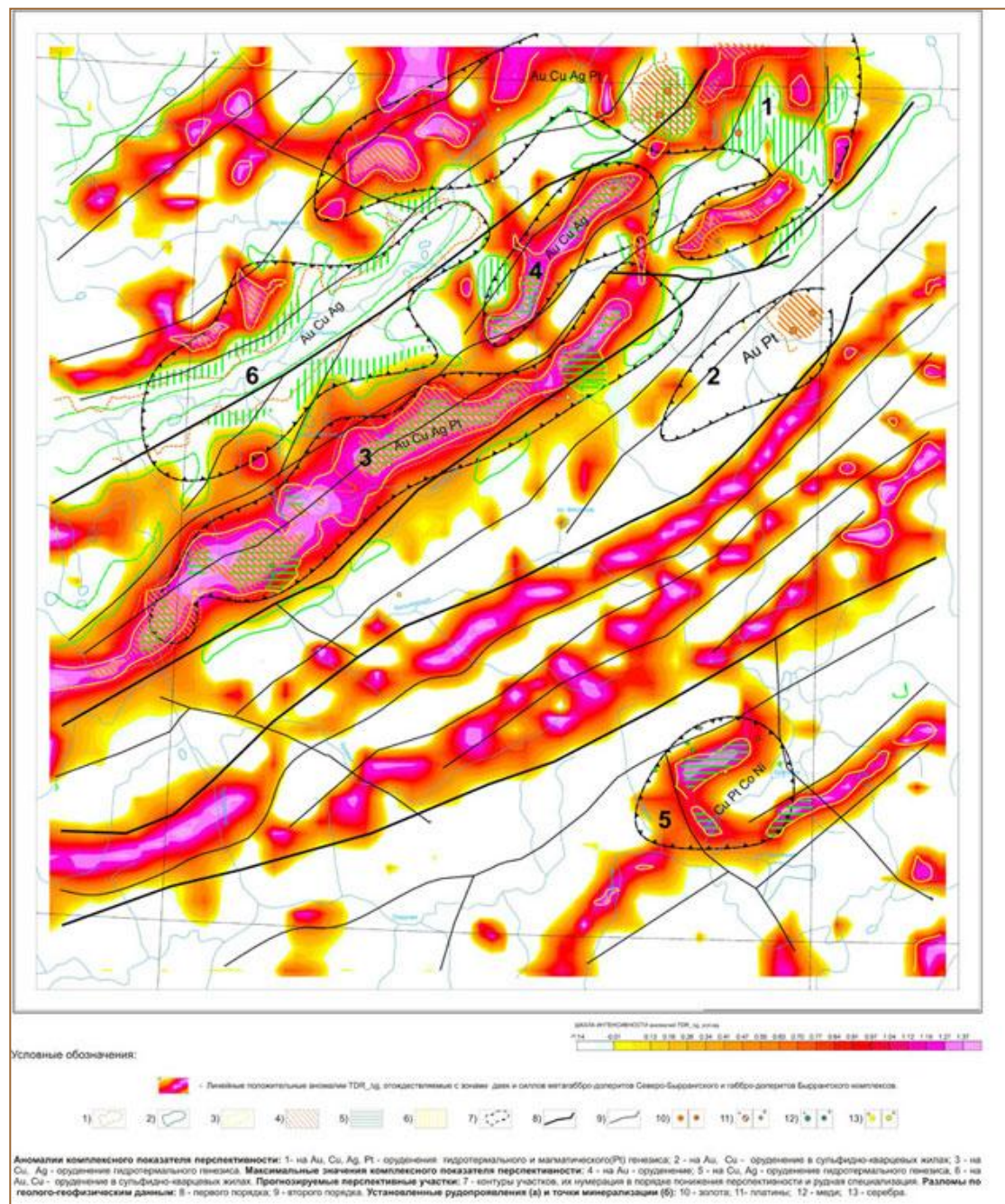
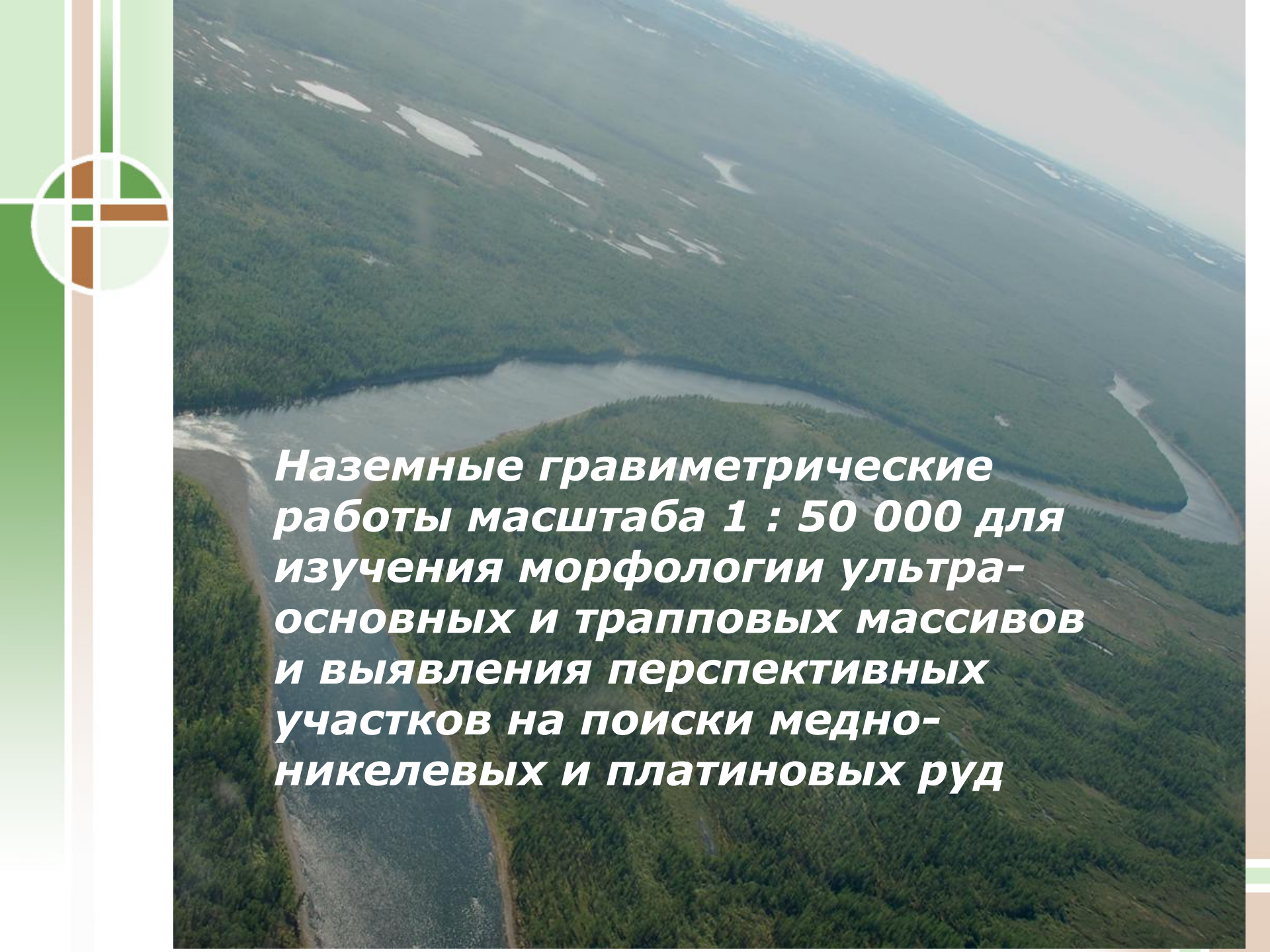


График Δg вдоль
ствола шахты, пе-
ресекающего суль-
фидное рудное
тело

Схема участков перспективных на обнаружение золотого, медно-серебряного и полиметаллического оруденения

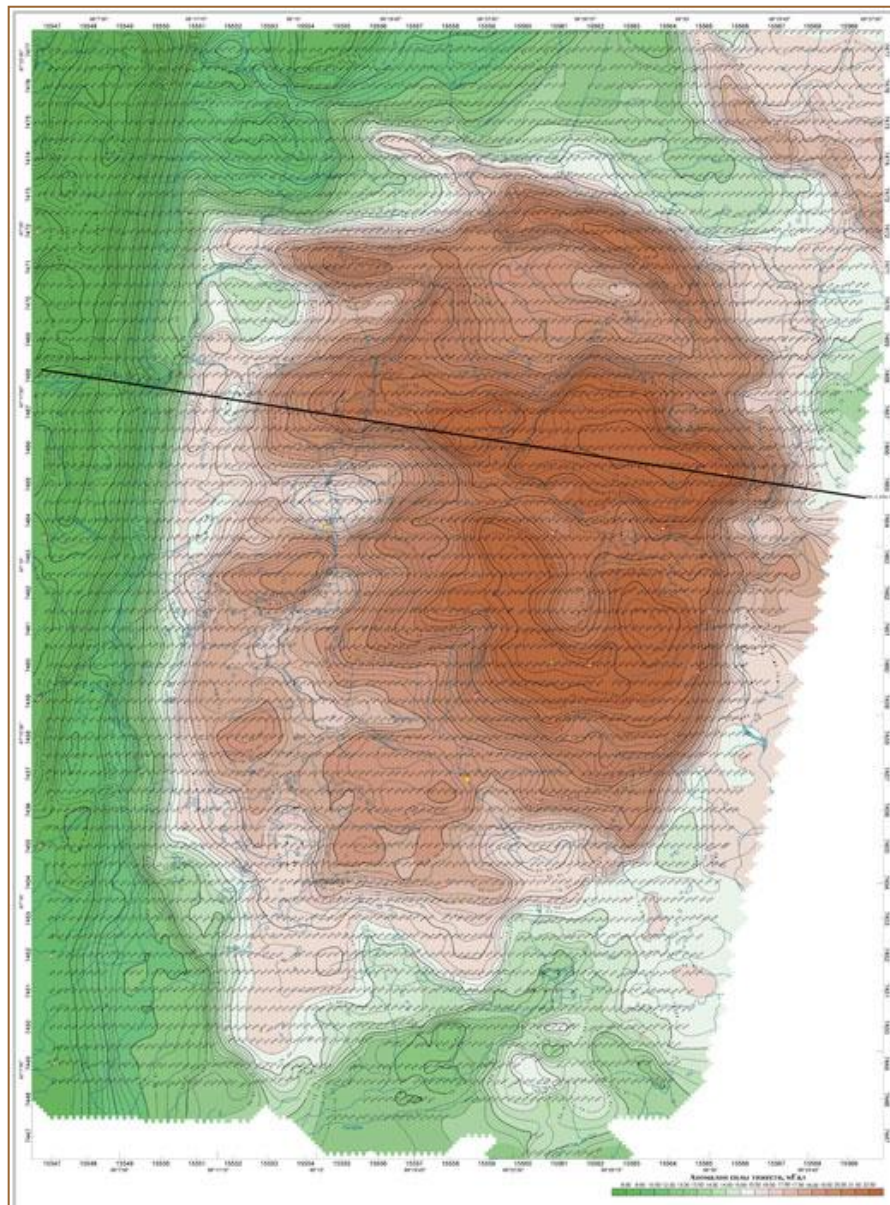


An aerial photograph showing a wide river flowing through a mountainous region. The river is surrounded by dense green forests. In the background, there are large, light-colored, irregularly shaped areas that appear to be snow-covered or rocky terrain, possibly representing ultrabasic and trap massifs mentioned in the text. The overall scene is a natural landscape with significant geological features.

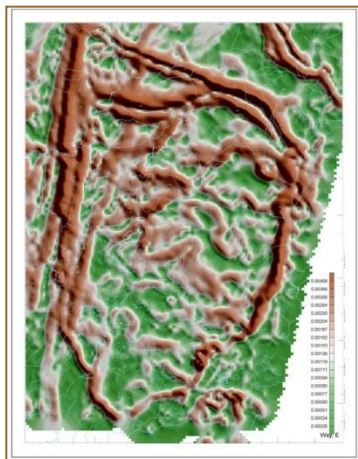
***Наземные гравиметрические
работы масштаба 1 : 50 000 для
изучения морфологии ультра-
основных и трапповых массивов
и выявления перспективных
участков на поиски медно-
никелевых и платиновых руд***

**Карта аномалий
силы тяжести
отражает
суммарный
гравитационный
эффект от
блокового
поднятия
кристаллического
фундамента
и массива
дифференциро-
ванных интрузий
трапповой
формации**

**Карта аномалий
силы тяжести
в редукции Буге**



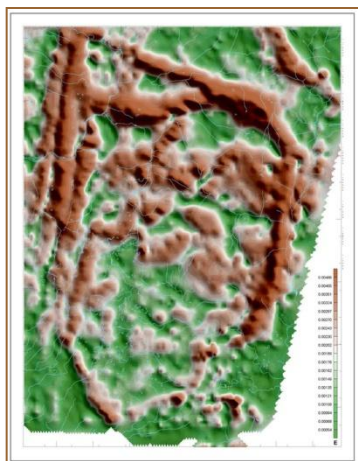
Для решения структурно-тектонических и прогнозно-поисковых задач использовался практически весь набор трансформант потенциальных полей



Карта полного горизонтального градиента гравитационного поля

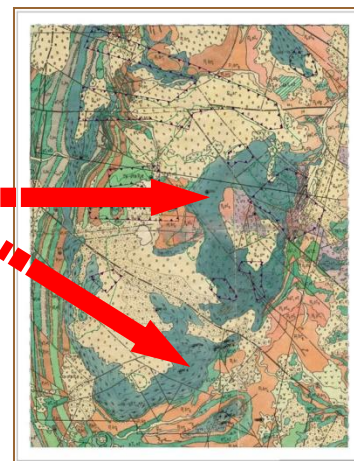


Карта вертикального градиента гравитационного поля



Карта полного градиента гравитационного поля

Трапповые интрузии, выходящие на дневную поверхность



Геологическая карта

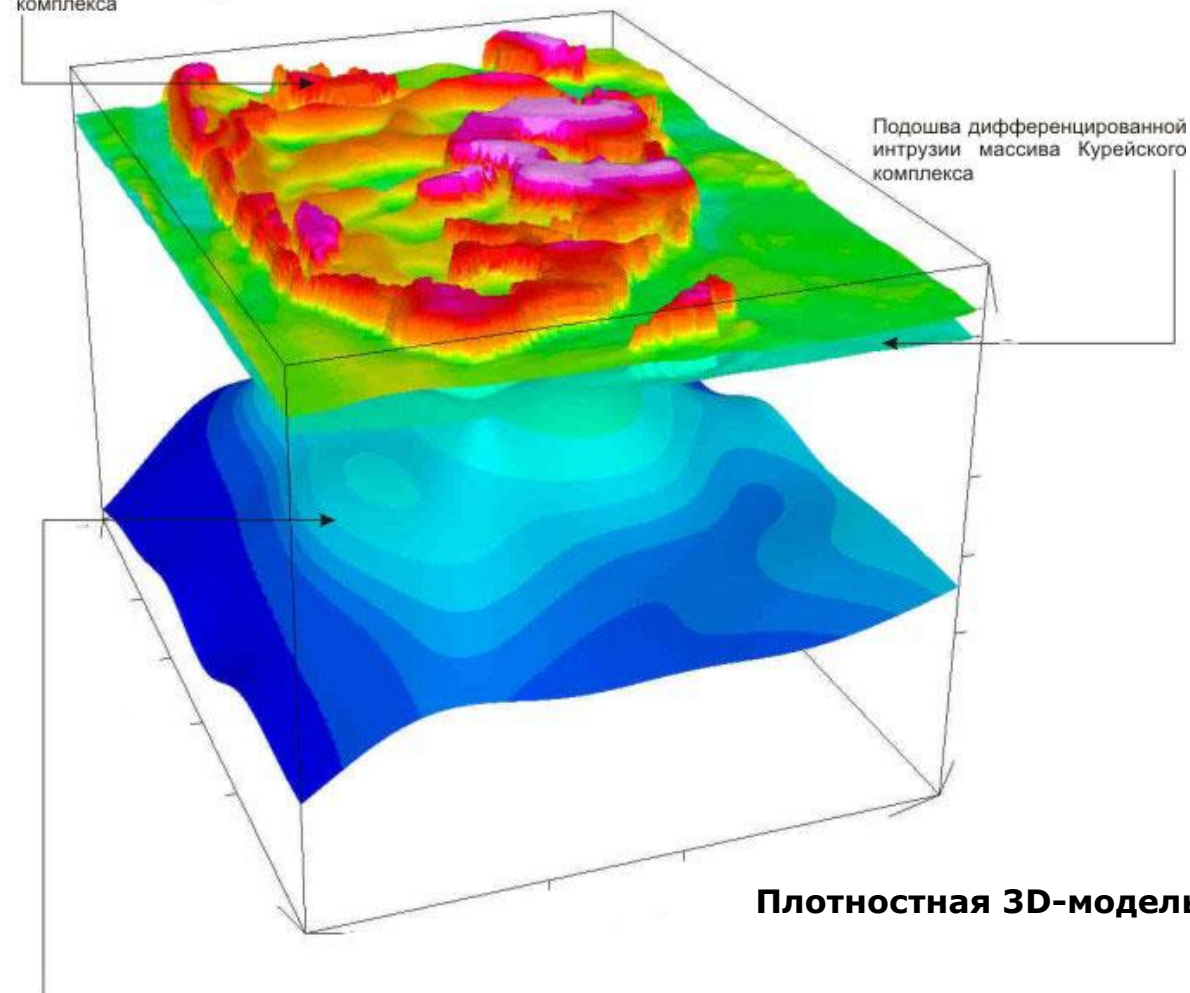


Структурно-тектоническая схема

На 3D-модели отражены основные гравитирующие геологические объекты: приподнятый блок кристаллического фундамента с предполагаемой гипербазитовой интрузией в кровле и выходящие на поверхность тела дифференцированных интрузий трапповой формации

Кровля дифференцированной интрузии массива Курейского комплекса

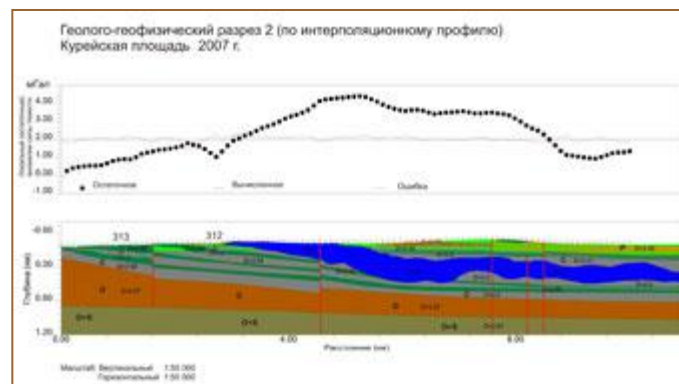
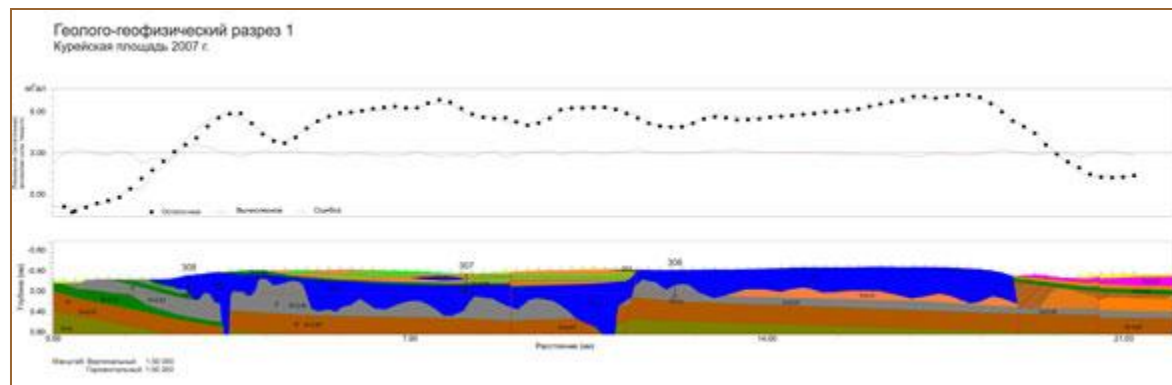
Подошва дифференцированной интрузии массива Курейского комплекса



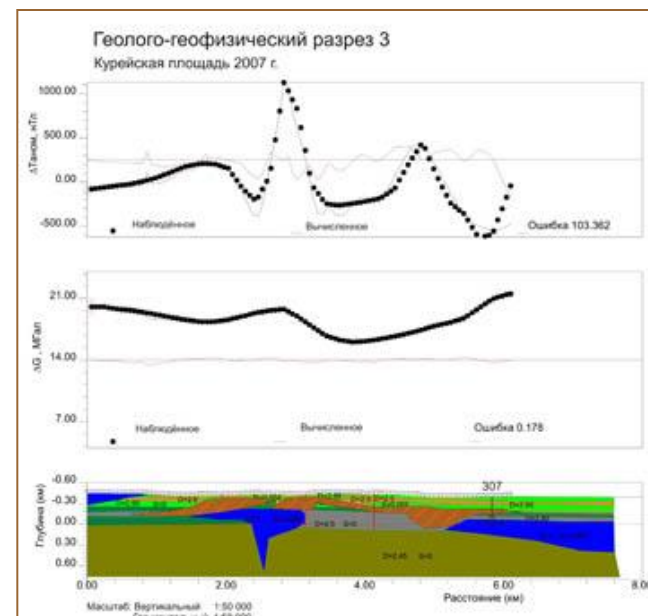
Плотностная 3D-модель

Выступ кристаллического фундамента

На разрезах показана форма и залегание потенциально-рудноостных интрузивных тел, смоделированные по гравитационному полю

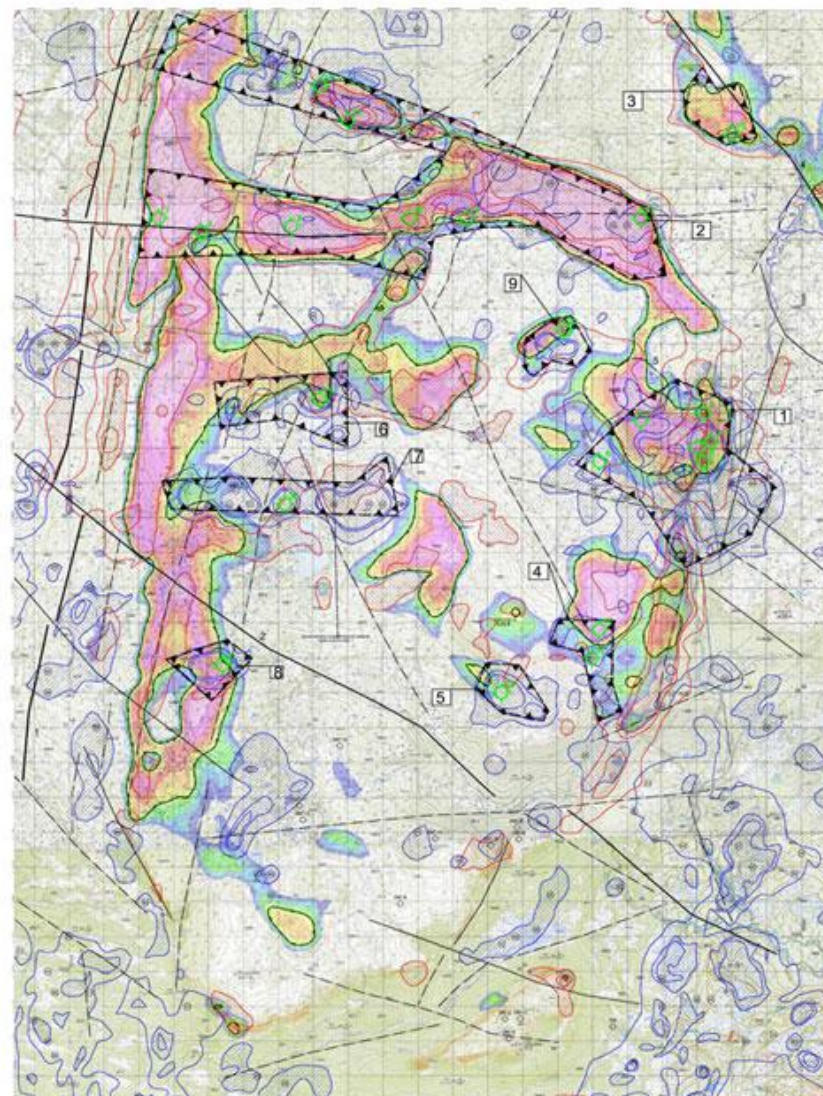


Геолого-геофизические разрезы



**На схеме
по результатам
комплексной
геолого-
геофизической
интерпретации
окоптурены
участки
под поисковое
бурение.
На Cu-Ni-Pt руды**

**Схема
прогнозных
участков**

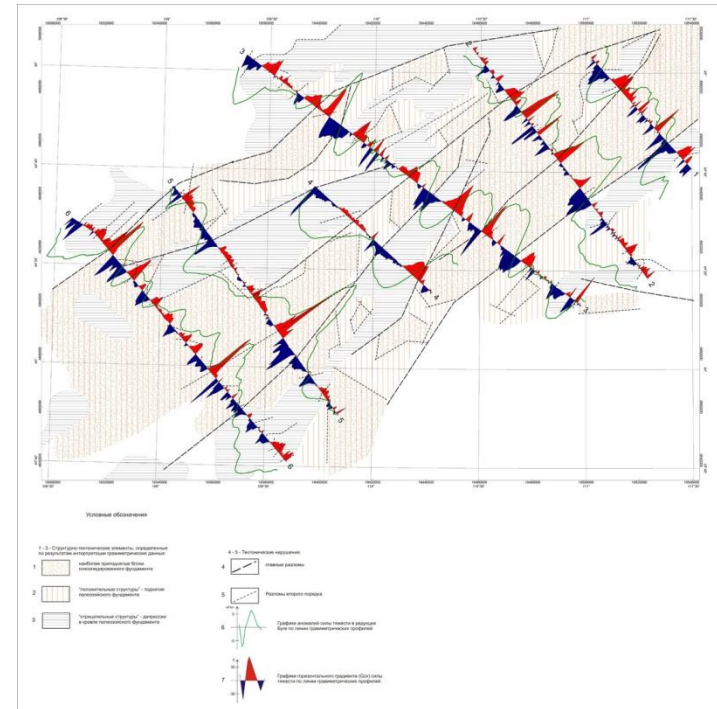


**Комплексные грави-
магниторазведочные
исследования**

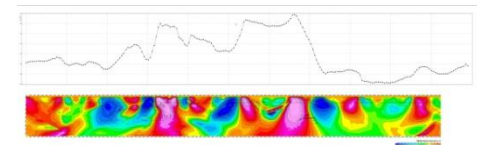
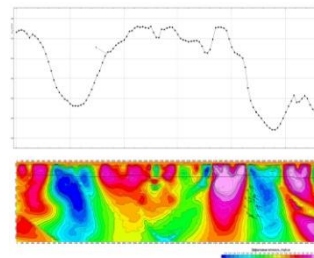


**Поисковое значение
выполненных работ
состоит в
определение границ
юрских –
раннемеловых
рифтовых структур,
перекрытых более
поздними
параплатформенными
комплексами,
выделении
осадочных
бассейнов,
определении по
линиям
гравиметрических
профилей глубины
залегания подошвы
рифтового
комплекса – кровли
палеозоя, разломов,
ограничивающих
рифт и основных
разломов,
осложняющих его
строение.**

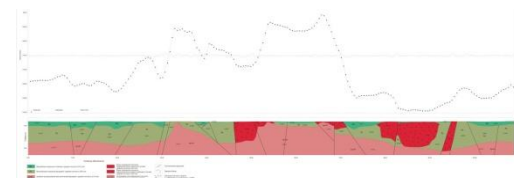
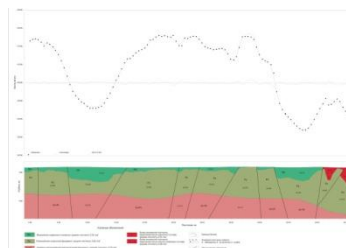
**Схема
структурно-
тектонического
районирования**



Плотностные разрезы по линиям гравиметрических профилей



Геолого-геофизические разрезы по линиям гравиметрических профилей



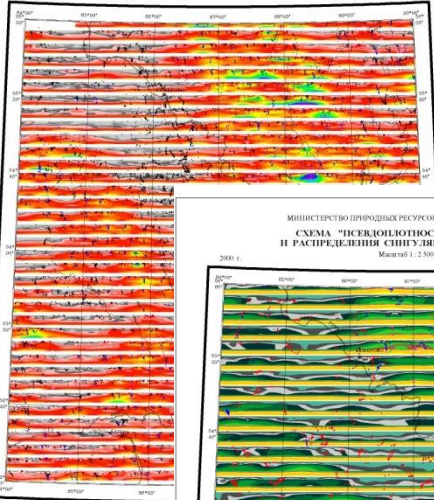
Трёхмерное моделирование структурно-вещественных неоднородностей верхней части земной коры по результатам обработки гравитационного и магнитного полей

РЕГУЛЯРНАЯ СИСТЕМА,
«ПСЕВДОПЛОТНОСТНЫХ» И «ЭФФЕКТИВНОЙ
НАМАГНИЧЕННОСТИ» РАЗРЕЗОВ ВЕРХНЕЙ КОРЫ

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОРФОЛОГИИ
ОСАДОЧНОГО СЛОЯ (PZ3-MZ)

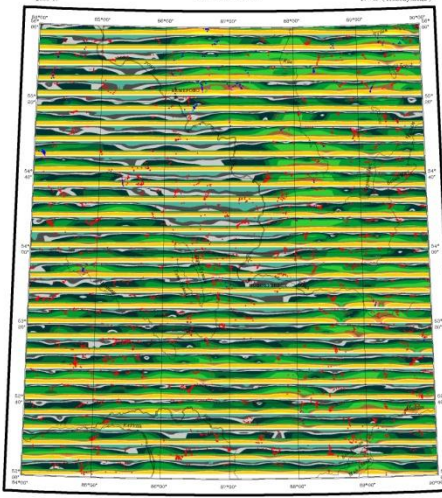
Графическое приложение № 8

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СХЕМА РАЗРЕЗОВ «ЭФФЕКТИВНОЙ» НАМАГНИЧЕННОСТИ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГУЛЯРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
Масштаб 1 : 2 500 000 N-45 (Новосибирск)



Графическое приложение № 11

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СХЕМА «ПСЕВДОПЛОТНОСТНЫХ» РАЗРЕЗОВ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГУЛЯРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
Масштаб 1 : 2 500 000 N-45 (Новосибирск)



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
Символы источников по программе «ИС-Триггер»
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
Вертикальный масштаб: 1 : 2 500 000
Обработка данных по программе «ИС-Триггер»

РЕГУЛЯРНАЯ СИСТЕМА
ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ
РАЗРЕЗОВ ВЕРХНЕЙ
КОРЫ

РЕГУЛЯРНАЯ СИСТЕМА
СХЕМАТИЗИРОВАННЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ

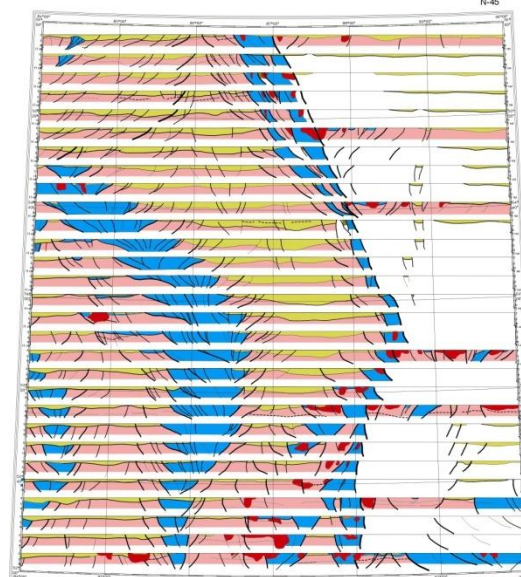
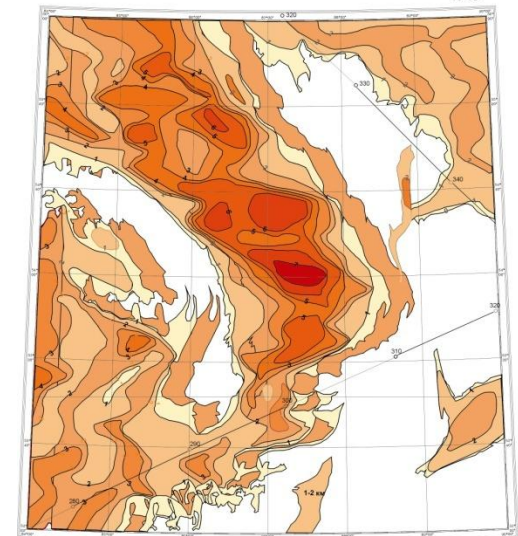


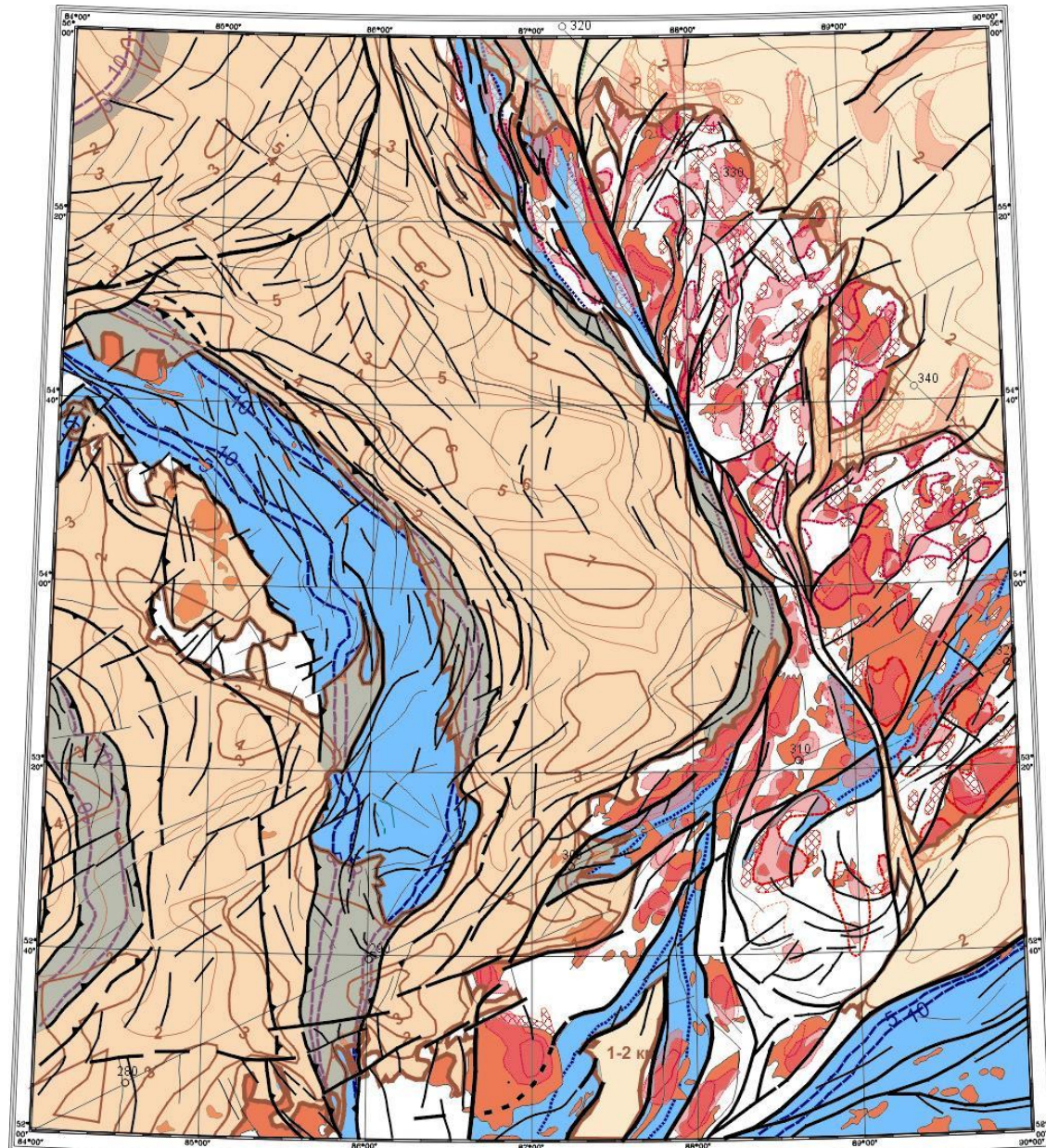
СХЕМА РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МОЩНОСТИ ОСАДОЧНО-ВУЛКАНОГЕННОГО СЛОЯ
(PZ3-MZ)

N-45



Карта глубинного строения

- В результате обработки и геологической интерпретации гравитационного и магнитного полей моделируется:
 - структура разрывных дислокаций (на пов-ти),
 - морфология главных разрывных дислокаций,
 - морфология петрофизически контрастных геологических объектов (сутурных зон, вулканических и осадочных депрессий, интрузивных массивов и др).



Перспективные направления развития технологий грави-магнитного моделирования

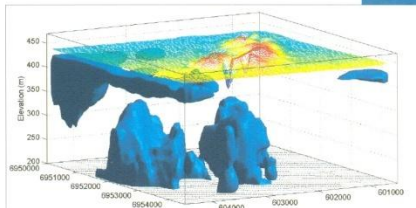
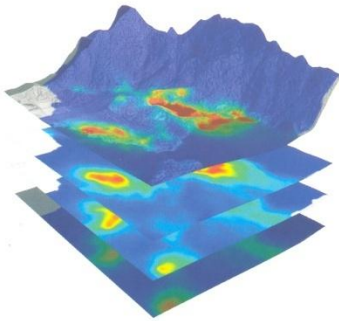
а)

Data Products and Interpretation

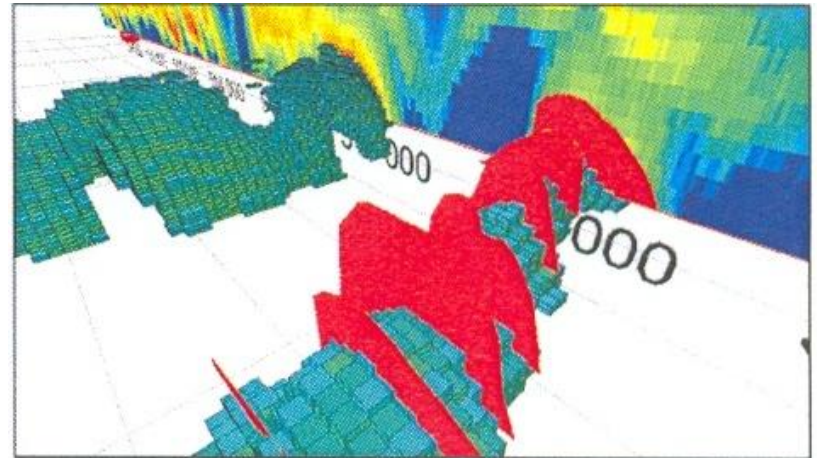
Fugro Airborne Surveys has a wealth of experience in processing and interpreting geophysical datasets from thousands of airborne geophysical surveys in a multitude of geologic environments. Our staff of geophysicists combine state-of-the-art hardware and software tools with experience and knowledge to process and interpret data, taking pride in hands-on attention to detail and thoroughness.

The geophysical teams are backed by sophisticated and totally integrated in-house facilities for image processing of geophysical data, CAD data capture, map production, 3D modeling and products, GIS merging and analysis of digital spatial datasets. This range of skills and capabilities provides a complete solution to your mapping requirements.

Fugro Airborne Surveys' proprietary PC-based processing software package, ATLAS, allows for the production of a complete suite of geophysical products in the field or in our processing centres. ATLAS' tools and compatibility ensure rigid quality assurance and quality control at the survey site, as well as a seamless and efficient flow of the data back to the processing centres.



б)



Example display of 3D Features in red, superimposed on the 3D voxel model derived from EM Flow CDI models

- Имеются отдельные примеры, когда геофизические съемки завершаются исполнителем не традиционными картами графиков или изолиний а трехмерными моделями:

- а) система послойных срезов и 3D модель,
- б) 3D модель.

Контрольные вопросы

1. Что такое гравirazведка и ее задачи?
2. Методика гравиметрических полевых работ
3. Чем отличается от других методов и насколько эффективно?
4. Распределение силы тяжести на поверхности Земли.
5. Качественная интерпретация данных гравirazведки
6. Аномалеобразующие факторы в гравirazведке
7. Характеристика горных пород по плотности
8. Трансформации гравитационных аномалий.
9. Применение гравirazведки для решения региональных, поисковых, и
 - разведочных задач.
10. Применение гравirazведки при поисках твердых полезных ископаемых.