

# Составляющие магнитного поля

- Магнитное поле, измеряемое на поверхности Земли включает несколько составляющих:

- **1.«Нормальное поле Земли**

1.1. Поле диполя Земли, связываемое с электрическими токами в ядре Земли;

1.2. Континентальные (мировые аномалии), связываемые с электрическими токами в верхней части ядра Земли;

---

2. Поле электрических токов, протекающих в ионосфере Земли (около 5% норм. поля);

**3. Поле намагниченных пород земной коры**

# Магнитное поле

- Рассмотрим теоретические основы.

Сила взаимодействия между двух изолированных точечных масс определяется законом Кулона (похож на закон притяжения Ньютона, но отличается тем, что магнитное поле зависит от свойств среды:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu \cdot \rho^2} \quad (*)$$

$m_1, m_2$  – точечн. магн. массы  
 $\rho$  – расстояние между ними  
 $\mu$  – магнитная проницаемость

Если массы различного знака – действуют силы притяжения;

Если массы одного знака - действуют силы отталкивания.

Сила действующая на единичную массу - **напряженность магнитного поля “Т”**

$$T = \frac{m}{\mu \cdot \rho^2}$$

Связь между Т и В:

$$T = \mu \cdot \mu_0 \cdot B = \mu_a \cdot B$$

где:  $\mu_0$  – **абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)**; в СИ

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (генри на метр); в СГС  $\mu_0 = 1$  (она безразмерна);

$\mu$  – **относительная магнитная проницаемость вещества**, безразмерная величина, зависящая от его состава и состояния. В СИ и СГС значения одинаковы. Для воздуха и воды они равны единице.

Произведение  $\mu_0 \cdot \mu$  – имеет ту же размерность, что и  $\mu_0$  и называется **абсолютной магнитной проницаемостью вещества**.

# Единицы магнитного поля

## •Единицей магнитной индукции «В»

- в системе СИ является тесла (Тл);
- в системе СГС – гаусс (Гс).

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл};$$

В магниторазведке широко используется более мелкая единица нанотесла (нТл);  $1 \text{ нТл} = 10^{-9} \text{ Тл}$ .

## •Единицей напряженности магнитного поля (Т):

- в системе СИ –ампер на метр (А/м);
- в системе СГС – эрстед (Э).

$$1 \text{ Э} = 10^3/(4\pi) \text{ А/м}$$

# Свойства «Нормального» магнитного поля Земли

- Земное поле проявляет себя как очень большой магнит, как если бы большой намагниченный брусок поместили в ядре Земли.
- Магнитное поле воздействует на стрелку: она ориентируется вдоль силовых линий, выходящих из одного полюса и входящих в противоположный.
- Силовых линий много. Их можно увидеть рассыпав железные опилки на лист, размещенный над магнитом. Каждая частица станет магнитом и их концы объединятся вдоль силовых линий.
- Магнитное поле Земли аналогично продуцируется электрическими токами в жидком ядре – процесс называемый «геодинамо».
- Мы называем этот источник магнитного поля – «магнитным диполем»

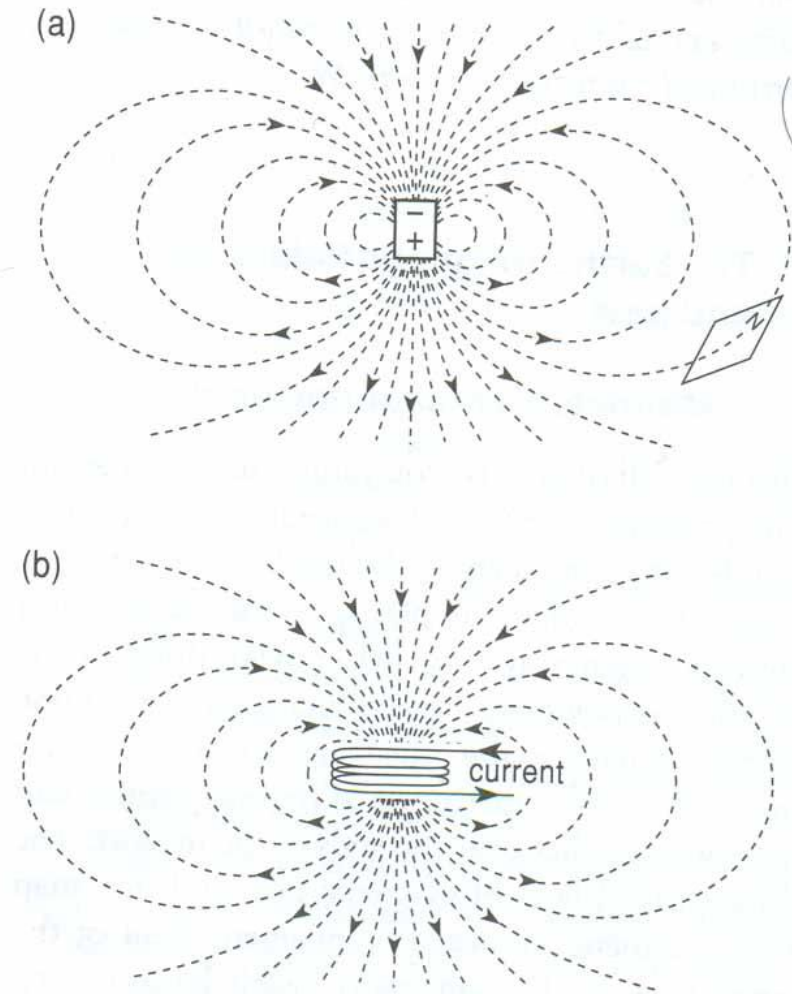


Figure 10.1 Magnetic field of a bar magnet and of a coil.

# 1. Нормальное магнитное поле Земли

- Ось магнитного поля отклонена от географической оси (оси вращения Земли) на  $11.5^\circ$  –

**МАГНИТНОЕ СКЛОНЕНИЕ**  
(географической оси).

- Относительно оси магнитного поля намечаются полюса (северный и южный) и отсчитывается экватор.

- Напряженность магнитного поля изменяется в пределах:

- от  $\approx 30\,000$  нТл на экваторе

- до  $\approx 60\,000$  нТл на магнитных полюсах

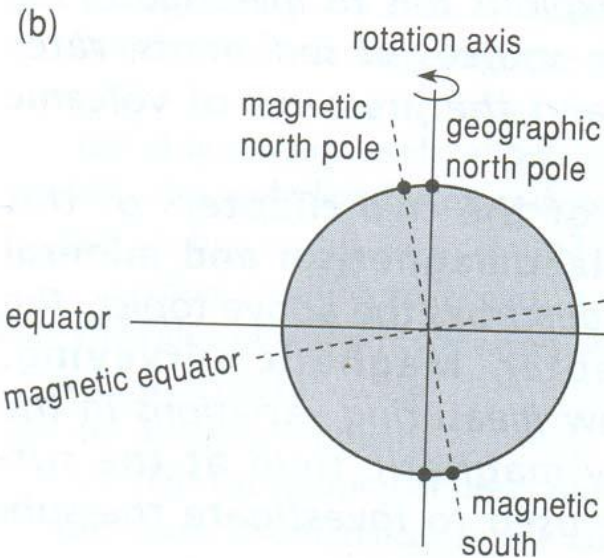
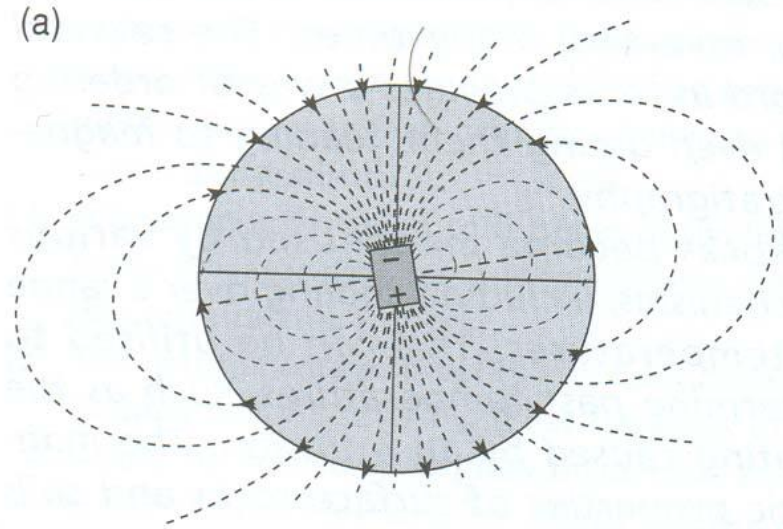
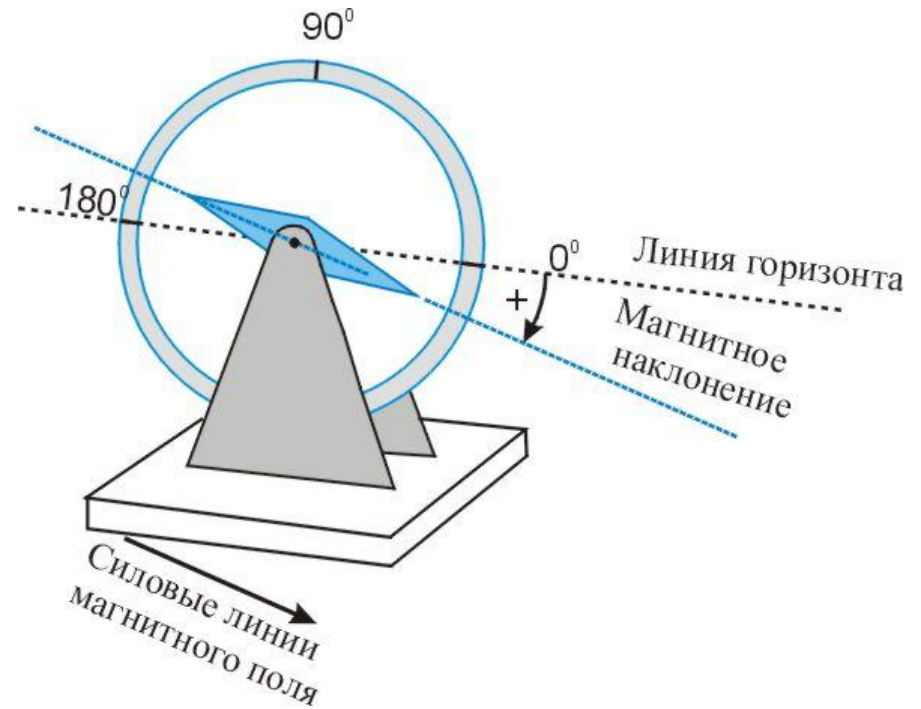


Figure 10.2 Magnetic field of the Earth.

- Линии магнитного поля пересекают поверхность Земли под разными углами. Магнитная стрелка, закрепленная на горизонтальной оси покажет направление силовых линий магнитного поля.
- Угол между линией горизонта и направлением линий магнитного поля –

# Магнитное наклонение



## МАГНИТНОЕ НАКЛОНЕНИЕ

- Наклонение “I” положительно, когда стрелка ниже линии горизонта; отрицательно – когда выше.
- $I = 0^0$  на экваторе,
- $I = +90^0$  на магн. сев. полюсе.
- $I = -90$  на магн. южном полюсе.
- Пусть: I – наклонение  
 $\lambda$  - географическая широта

$$\text{tg } I = 2 \text{tg } \lambda$$

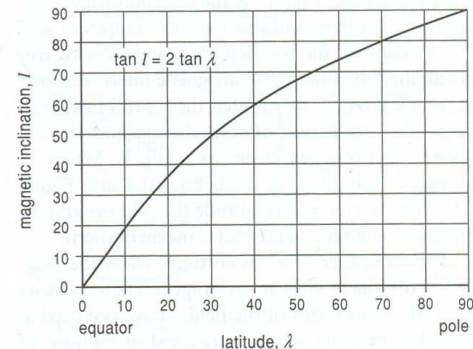
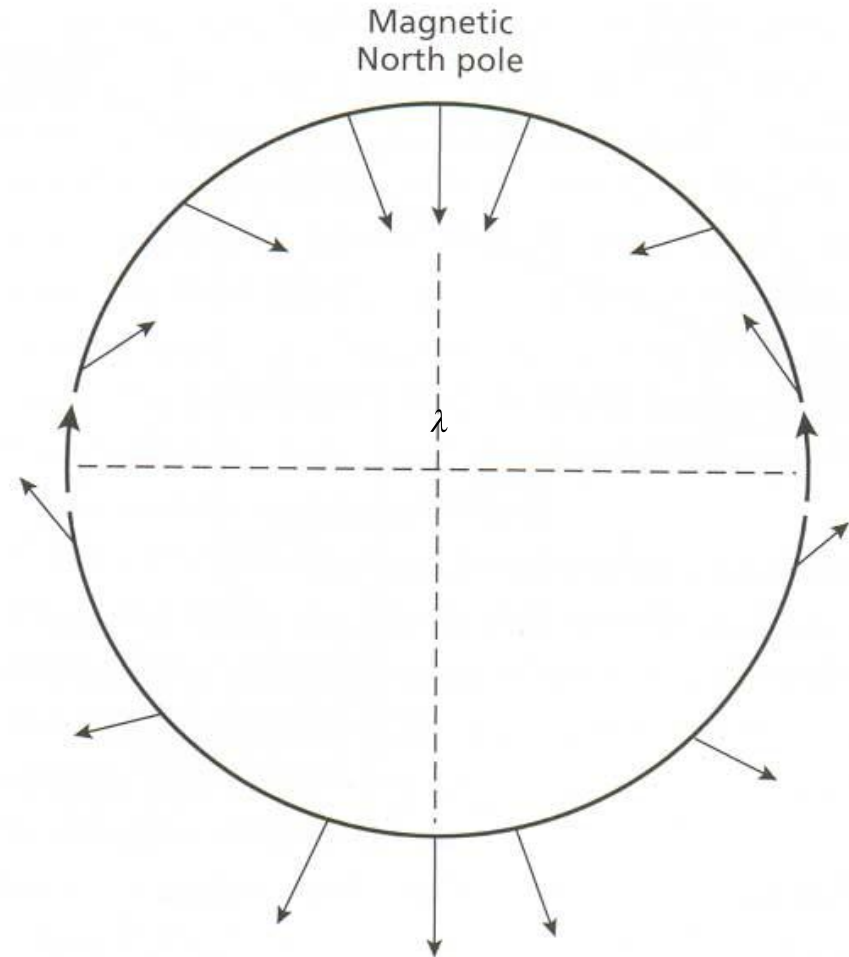


Figure 10.4 Magnetic inclination versus latitude.

# Магнитное наклонение

$$\operatorname{tg} I = 2\operatorname{tg} \lambda$$

- Пользуясь этой формулой и зная направление на север можно рассчитать широту (но не долготу)



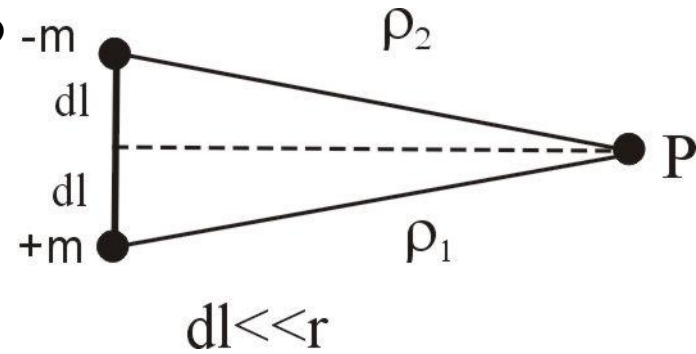
**Fig. 7.7** The variation of the inclination of the total magnetic field with latitude based on a simple dipole approximation of the geomagnetic field. (After Sharma 1976.)



# Поле намагниченных пород земной коры

## Магнитные свойства пород

- Магнитные свойства пород определяются суммарным аномальным эффектом элементарных диполей (атомарного масштаба).
- Рассмотрим систему из двух аномальных магнитных масс ( $m$ ) разных знаков, расположенных на расстоянии  $2dl$  друг относительно друга.
- $M$ -магнитный момент (основная величина, характеризующая магнитные св-ва).



- Если мы имеем объемные массы то магнитный момент равен сумме диполей:

$$d\bar{M} = 2dl \cdot m$$
$$\bar{M} = \sum d\bar{M}$$

- Вектор  $J$  – магнитный момент, приходящийся на единицу объема – **интенсивность намагничения**.

Единицей интенсивности намагничения является А/м.

Магнитный потенциал объема выражается через  $J$ :

$$U = \int_{\Omega} \frac{J d\Omega}{\rho_0^2 \cdot \mu}$$

$\Omega$  – объем       $\bar{J}$  – вектор

- Часто для х-ки магнитных св-в используют скалярную величину:

• **Магнитная восприимчивость ( $\chi$ )** –

способность г.п.

намагничиваться под

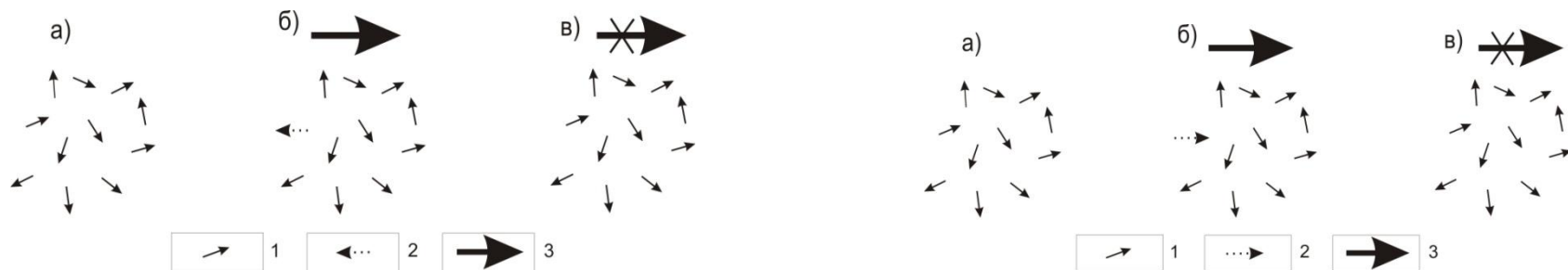
действием внешнего

магнитного поля.

$$\bar{J} = \chi \cdot \mu_0 \cdot \bar{T}$$



# Намагниченность пород



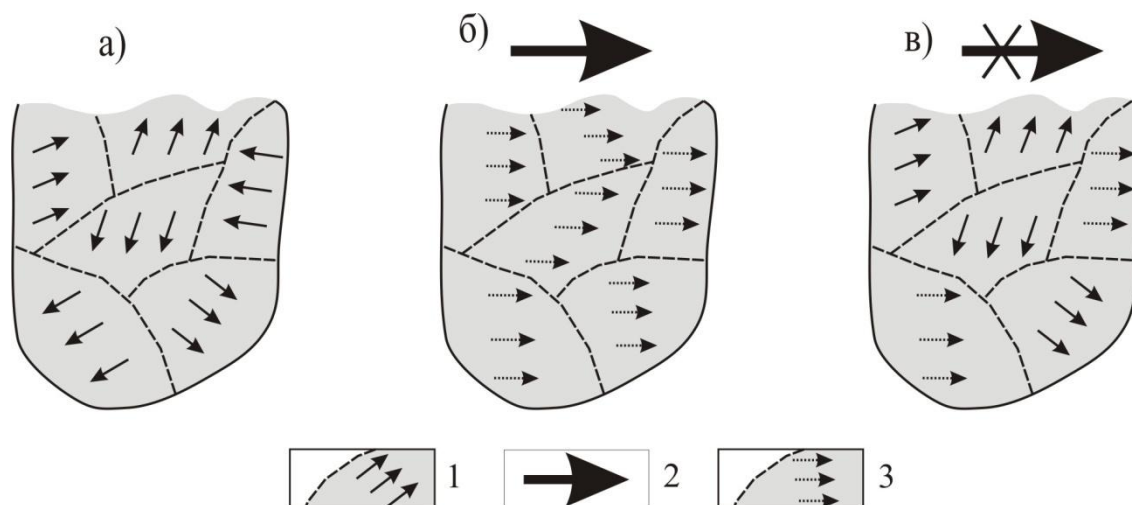
- **ДИАМАГНЕТИКИ** – намагничивание происходит в направлении, противоположном действующему на материал внешнему магнитному полю (вода, соль, Au, Ag, Cu и др)
- Атомы большинства химических элементов магнитоактивны, но у большинства элементов направления намагниченности атомов случайно ориентированы. Под воздействием внешнего магнитного поля Земли атомы слабо ориентируются – м-л становится слабомагнитным. После снятия поля – намагниченность исчезает (отсутствует способность создавать остаточное поле) – **«ПАРАМАГНЕТИК»**

# «ФЕРРОМАГНЕТИКИ»

направления намагниченности атомов самопроизвольно согласуется

в пределах доменов. Под воздействием внешнего поля домены стремятся перестроиться под него. После снятия внешнего поля сохраняется частичная ориентация доменов – остаточное поле.

Большинство ферромагнетиков – соединения железа, широко представленные во многих породах.



# Точка Кюри

- При подъеме температуры колебания зерен (или доменов) возрастают, увеличивается возможность разрушения стен между доменами или разворота направления их намагничения. — «блокирующая температура»;
- При дальнейшем нагревании до точки Кюри атомарные магниты теряют связь друг с другом и свойство самопроизвольной намагниченности (св-во ферромагнетика) исчезают — М-Л СТАНОВИТСЯ парамагнетиком.

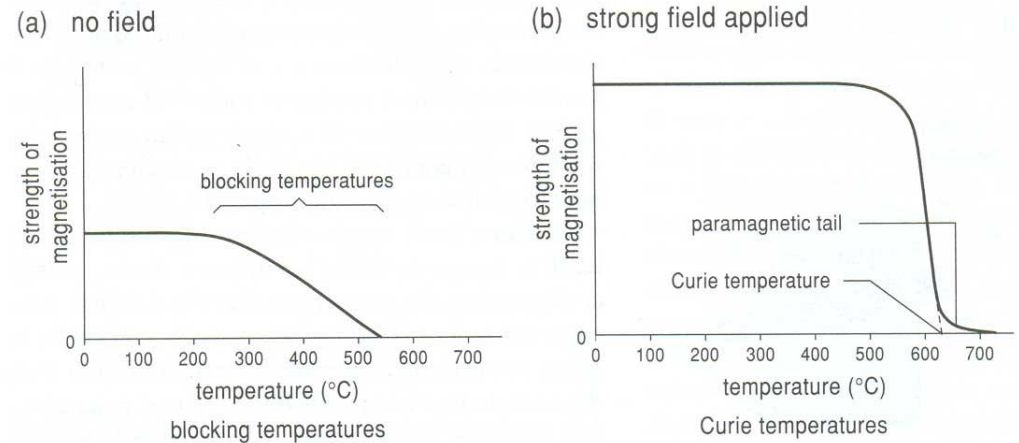


Figure 10.14 Demagnetisation by increasing temperature.

# Механизмы намагничивания пород

- **1. Термальная (остаточная) намагниченность.**

Когда лава или интрузия остывает, происходит формирование зерен ферромагнетиков. При охлаждении ниже точки Кюри атомарные магниты внутри каждого зерна начинают самопроизвольно формировать домены и ориентируются по внешнему полю – формируется остаточная намагниченность.

- **3. Химическая остаточная намагниченность.** Формируется при химическом преобразовании немагнитных железистых материалов в магнитные в результате выветривания или при осаждении окислов железа из воды, просачивающейся через горные породы. Это важный механизм намагничивания песчаников .

# Магнитные свойства минералов и пород

## Магнитные свойства ферромагнитных минералов

Минерал	Хим. формула	Точка Кюри (°C)	Намагниченность $10^3$ А/м	$\chi$ Ед. СИ
магнетит	$Fe_3O_4$	578	490	4-25
гематит	$Fe_2O_3$	560-640	1.5-2.5	$10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-3}$
маггемит	$Fe_2O_3$	560-640	435	4-25
пирротин	$Fe_7O_8$	300-325	17-70	$10^{-2}$ - $10^{-1}$

## Магнитные свойства горных пород

$\chi$  (магнитная восприимчивость) опр-ся главным образом концентрацией ферромагнитных минералов.

Кроме того:  $\chi = f$  (размера кристалла ф.м. —  $\chi$  — растет с увел. зерен),

$\chi = f$  (формы включений ф.м. — менее магнитны г.п., где ф.м. минералы образуют изолированные включения),

$J_n$ -(естеств. остат. намагн.)=  $f$  (состава и истории развития — не изм-ся при изменении направления и интенсивности внешнего поля),

$J_i$ ,- индуцированная намагниченность обычно пропорциональна  $\chi$  и имеет то же направление, что и магнитное поле Земли.

# Магнитные свойства горных пород

$J_n$  и  $J_i$  - в общем случае не совпадают. Причины:

- инверсии (изменения полярности Земли),
- остаточная намагниченность отражает намагниченность, полученную в ходе предыдущих эпох.

**Осадочные породы** – наименее магнитны  $\chi=5-10 \cdot 10^{-5}$  СИ,  
в т.ч. карбонатные и хемогенные  $\chi=4 \cdot 10^{-5}$  СИ,

**Магматические породы:**  $\chi$  зависит от состава. Содержание ферромагнетиков повышается от кислых к основным и ультра-основным г.п.

Наименее магнитны - граниты:  $\chi_{\text{ср}}=0-0.4 \cdot 10^{-3}$  СИ,

- диориты:  $\chi_{\text{ср}}=2-4 \cdot 10^{-3}$  СИ,

- габбро:  $\chi_{\text{ср}}=2-8 \cdot 10^{-3}$  СИ,

- пироксениты  $\chi_{\text{ср}}=2-25 \cdot 10^{-3}$  СИ.

**Ультраосновные породы:** неизменные разности – слабомагнитны, т.к. большая часть Fe входит в состав силикатов. Но при серпентинизации этих г.п. часть высвобождаемого Fe преобразуется в магнетит.

# Измерения магнитного поля

• Для измерения магнитного поля используются магнитометры:

- протонные,
- квантовые,
- феррозондовые и др.

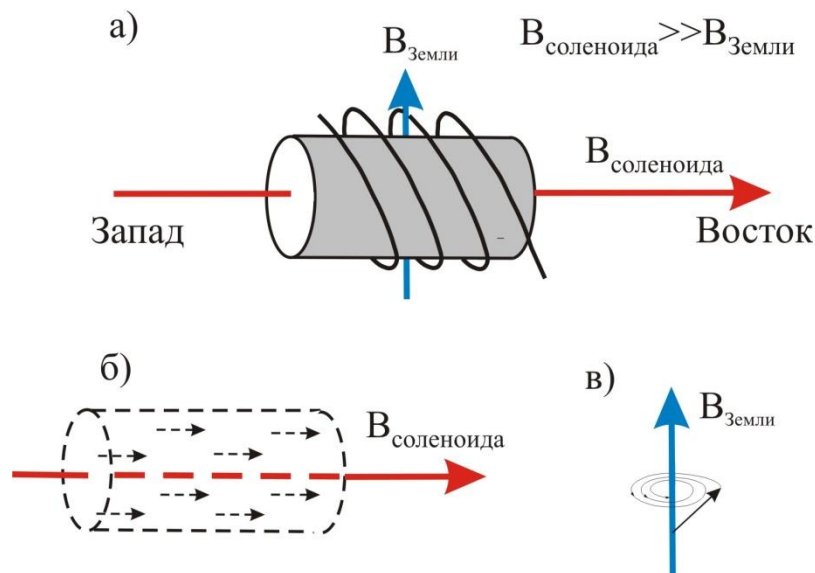
• Протонные магнитометры используются для измерений модуля полного вектора напряженности магнитного поля.

Ядра водорода (или углеводорода (керосин)) располагаются в центре атома и имеют положительный заряд – маленький магнит.

Главный элемент системы – сосуд с керосином помещенный в соленоид.

а) С помощью соленоида вокруг сосуда создается сильное магнитное поле  $\gg$  поля Земли. Направление поля соленоида перпендикулярно полю Земли.

б) При включении поля соленоида протоны жидкости выстраиваются вдоль направления этого поля.



с) После выключения поля соленоида элементарные магнитики начинают подстраиваться под поле Земли. Наведенный момент протонов начинает вращаться (процессирует) вокруг оси поля Земли как волчек (гороскоп) в течении нескольких секунд.

Напряженность поля =  $f$  (частоты процессии)



# Виды съемок

- **Наземные магнитные съемки**

- Наземные съемки обычно охватывают небольшие площади (м-б 1:10 000 и крупнее): пункты измерения размещаются на расстоянии 10-40 м, профили – 100 м и меньше.

- Измерения не следует проводить вблизи от металлических объектов (железные дороги, изгороди, транспортные средства и др.).

- Оператор не должен иметь металлических предметов.

- Необходимо учитывать вариации поля (одна станция устанавливается стационарно и в мониторинговом режиме измеряет поле).

- Проведению съемки предшествует разбивка опорных и рядовых пунктов. Намечаются контрольные пункты, на которых проводятся измерения в начале и конце дня. Опорная сеть создается замкнутыми полигонами. Разность измерений рассматривается как сумма «смещения нуля пункта» и вариации.

- Автомобильная съемка проводится по той же схеме, что и пешеходная.

## Протонный магнитометр-градиентометр



# Виды съемок (аэромагнитные съемки)

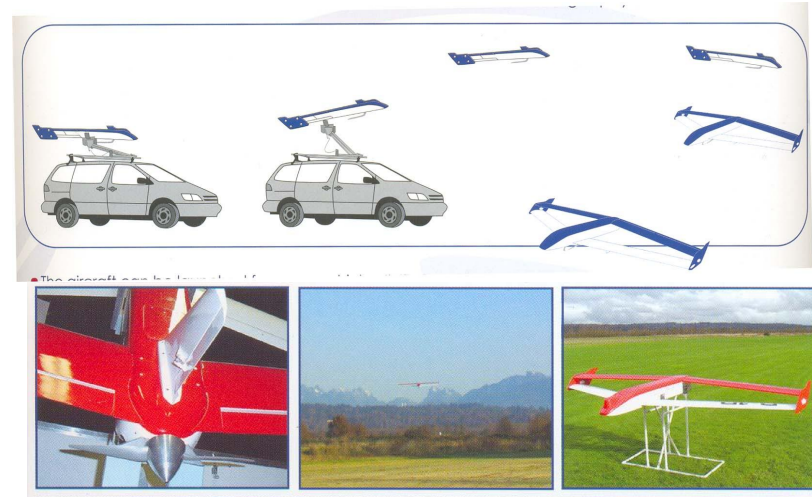
Аэромагнитная съемка с самолетов и вертолетов



- Особенности аэромагнитной съемки: выбор высоты полета и расстояния между маршрутами зависит от масштаба съемок.

Масштаб съемки	Расстояние между маршрутами	Высота полета
1:200 000	1 - 2 км	200-250 м
1:50 000- 1:100 000	0.1 - 0.5 км	50-75 м

Аэромагнитная съемка беспилотными аппаратами



Градиентометрическая аэромагнитная съемка



Sander Geophysics' Magnetic Gradiometer System



# Аэромагнитные съемки

- В начальный период съемочных работ создаются опорные маршруты, на которые в дальнейшем замыкаются маршруты рядовой съемки.
- Если рельеф контрастный – съемки ведутся с обтеканием рельефа.
- Аэромагнитные съемки быстрее и дешевле наземных съемок (стоимость 1 км аэросъемки = примерно 40% наземной).
- Наиболее сложная проблема аэросъемки – привязка. Ныне решается просто с использованием GPS.

- **Морские съемки.**

Методика сходна с аэросъемкой. Сенсор тянется на гондоле на расстоянии не менее чем 2-х длинны корабля. Обычно на гондоле монтируется несколько геофизических приборов (гравитационный, сейсмический и др.)



# Количественная интерпретация

## Прямые и обратные задачи магниторазведки

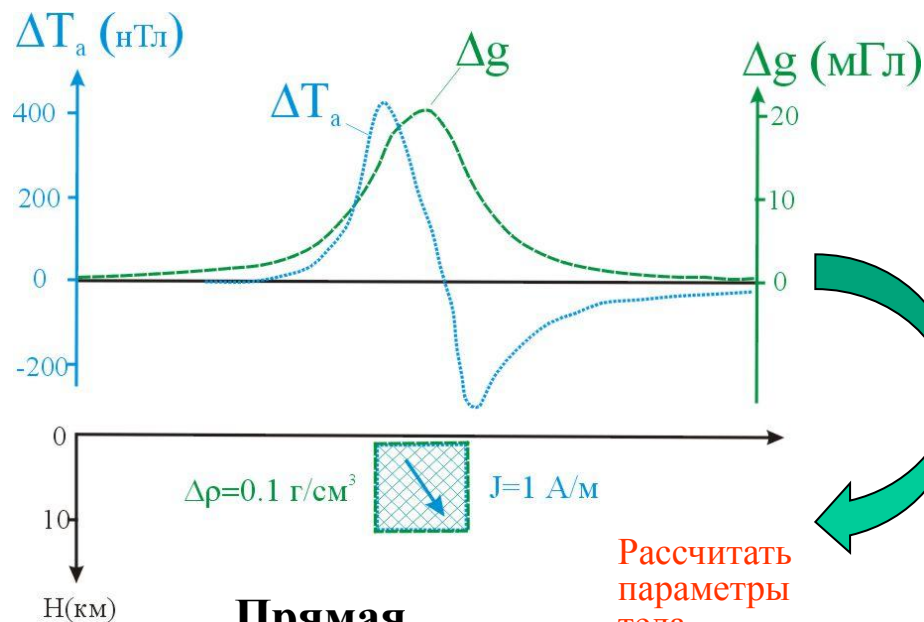
- Количественная интерпретация — определение структурных и вещественных параметров геологических объектов (глубина залегания, морфология, намагниченность, эффективная масса) на основе специализированных математических алгоритмов.

**Обратная задача** — вычисление по распределению аномального магнитного поля параметров геологического объекта.

**Прямая задача** — вычисление магнитной аномалии по заданному распределению аномальных масс — предполагается, что известны намагниченность (направление и интенсивность намагничения, форма, размер тела).

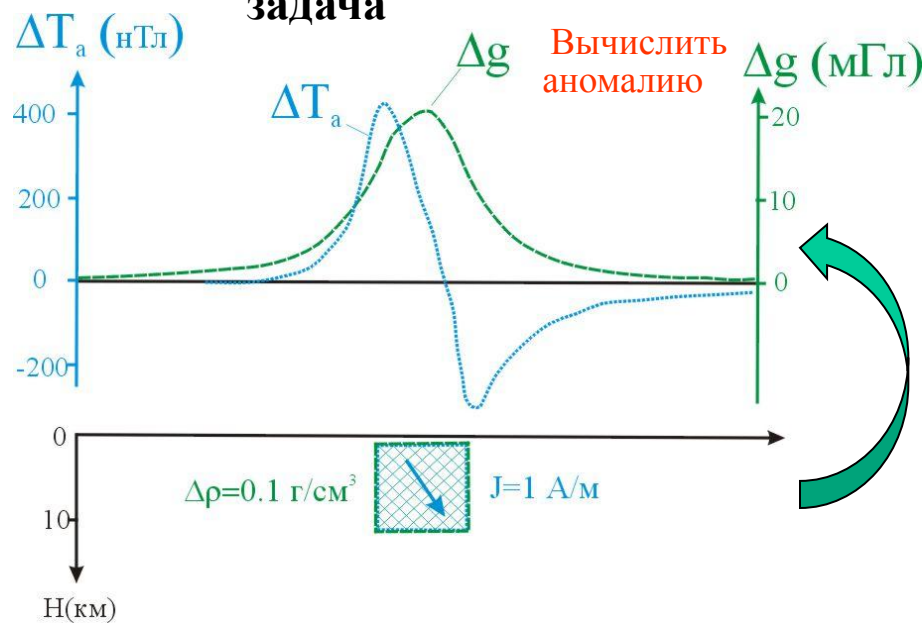
Обратная  
задача

Задано -  
аномалия



Рассчитать  
параметры  
тела

Прямая  
задача



Вычислить  
аномалию

# **Методы решения обратной задачи магнитометрии**

- **Используются:**
  - а) Аналитические выражения для аномалий от тел простой формы,**
  - б) Компьютеризированные математические алгоритмы оценки отдельных параметров аномальных источников (методы особых точек и сингулярных источников).**

# Использование аналитических выражений для аномалий от тел простой формы

- Пласт малой мощности (наклонный, намагниченный по современному полю):

1. Определение начала координат ( $\mathbf{0}$ )- над центром пласта):

$$\Delta T(0) = \Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}$$

2. Определение угла  $\varepsilon$ :

$$\cos \varepsilon = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}$$

3. Определение глубины  $h$ :

$$h = 0.5 \cdot (x_2 - x_1) \cdot \sin \varepsilon$$

$$h = 0.5 \cdot (x_4 - x_3) \cdot \cos \varepsilon$$

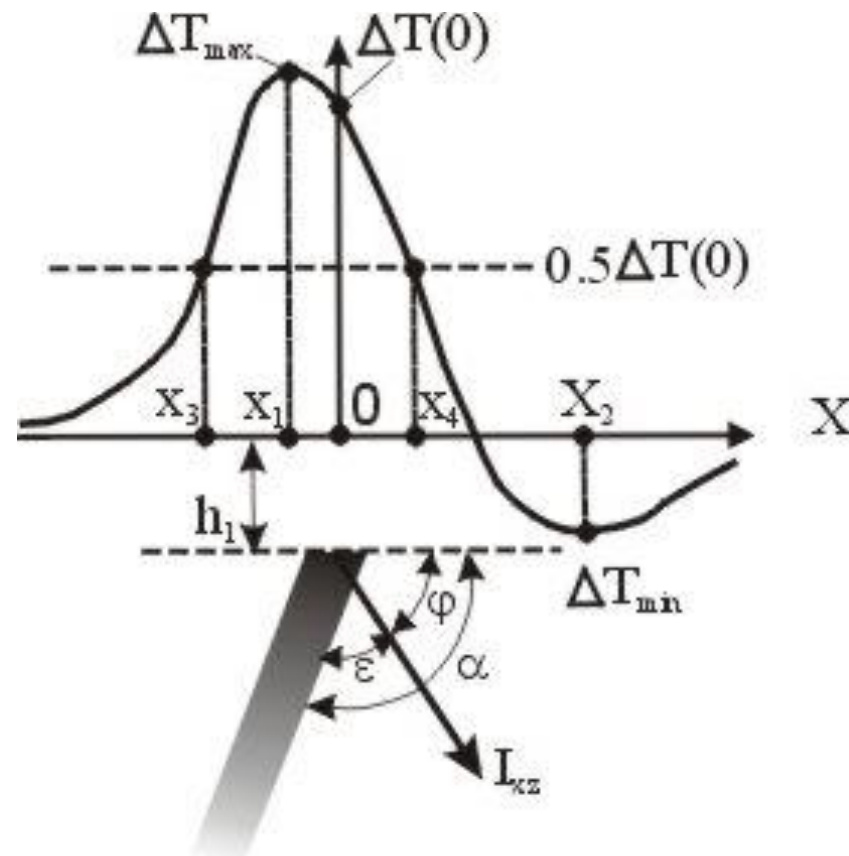
Не определить!

Значения:  $2b$  - мощности пласта;

- $\alpha$  - угол наклона пласта
- $J$  - намагниченность.

Наклон пласта можно определить, если тело намагничено по современному полю ( $\varphi$ ).

$J$  и  $2b$  не разделять – они входят в формулу.



$I_{kz}$  - направление вектора намагничения

# Использование аналитических выражений для аномалий от тел простой формы

Горизонтальный круговой цилиндр.

1. Определение начала координат (0) - над центром пласта):

$$\Delta T(0) = \frac{2Q}{x_2 - x_1}$$

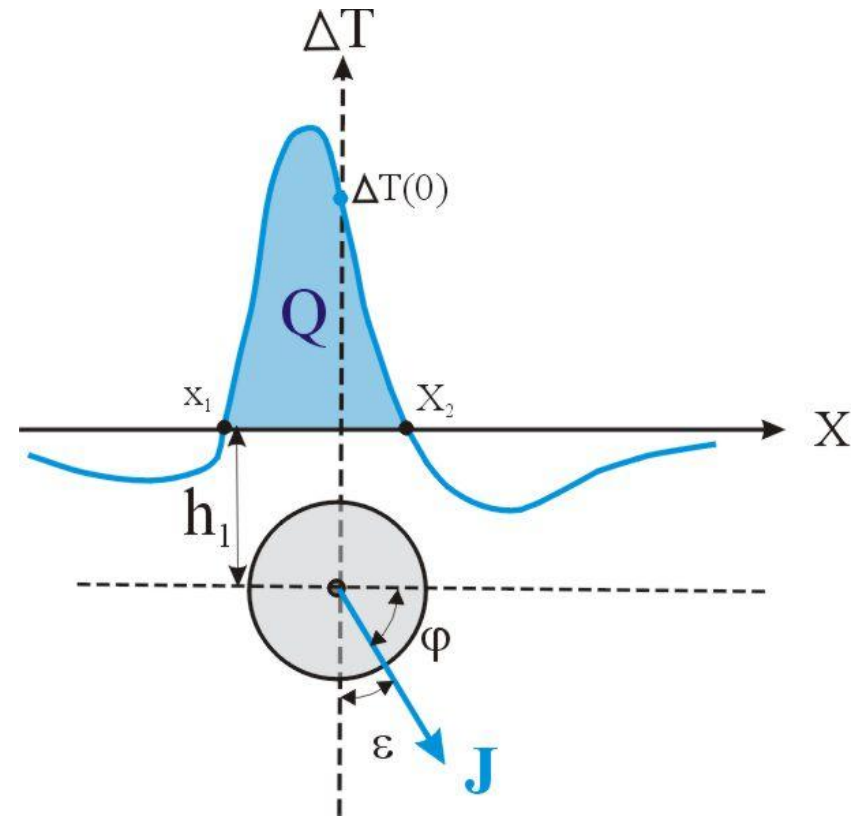
2. Определение глубины **h**:

$$h_1 = \sqrt{-x_1 \cdot x_2}$$

3. Определение магнитного момента.

$$M = \frac{2\pi \cdot \Delta T(0) \cdot h_1^2}{\mu_0 \cdot \cos \varepsilon}$$

Вычисление магнитного момента «M» имеет смысл, когда известно значение намагниченности: тогда можно определить площадь сечения тела.

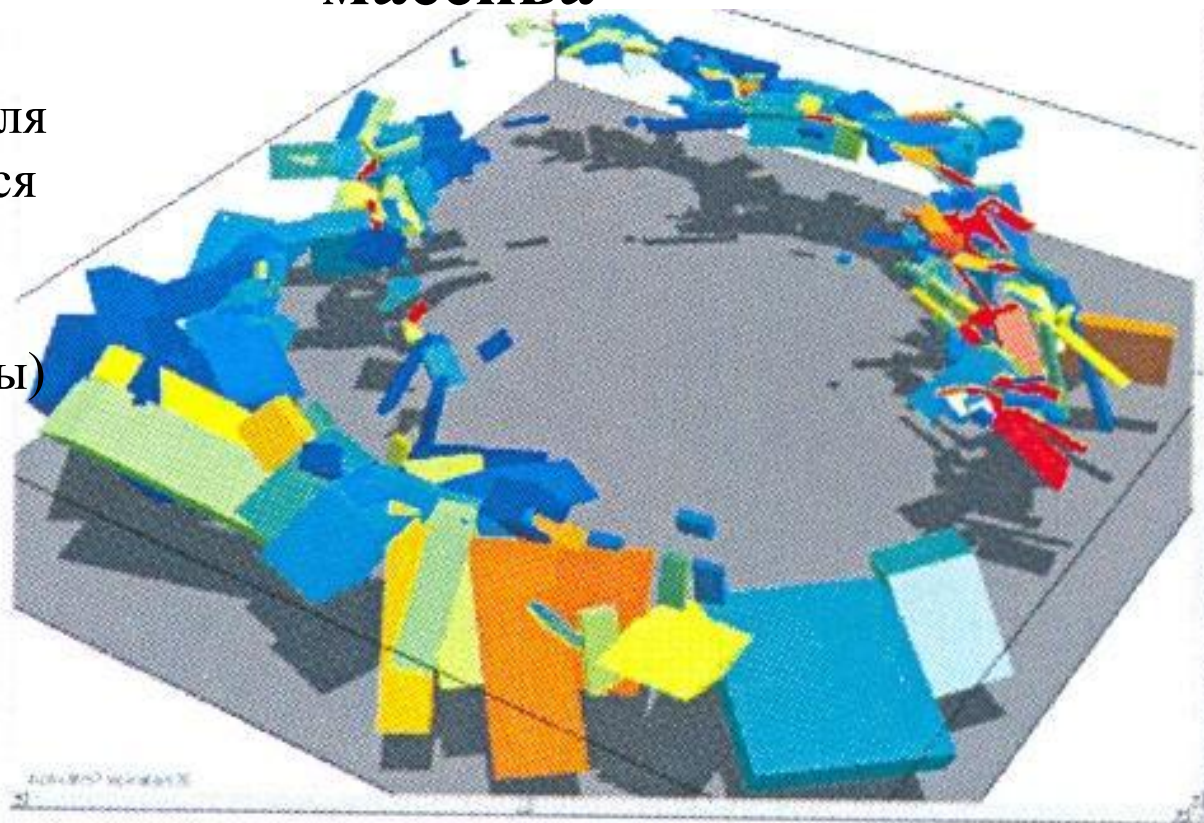


- Начало координат – над центром масс;
- **Q** – площадь, ограниченная кривой и осью «OX».
- **J** – вектор намагничения тела



# Трёхмерное моделирование аномальных магнитных источников в приконтактовой части гранитного массива

- По аномалиям магнитного поля рассчитываются параметры тел простейшей формы (призмы)



*Tanami district 3D model of magnetic features*

# Трехмерное магнитометрическое моделирование

- Одним из результатов съемок магнитного поля являются послойные срезы и трехмерные модели наиболее контрастных аномальных источников (Южноафриканская компания FURGO – крупнейшая в мире аэрогеофизическая компания).

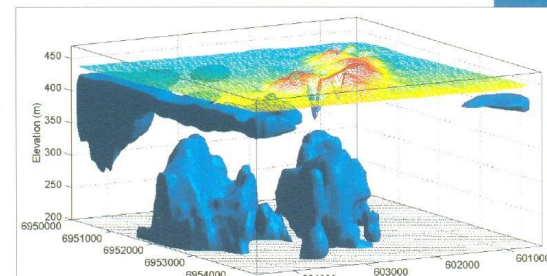
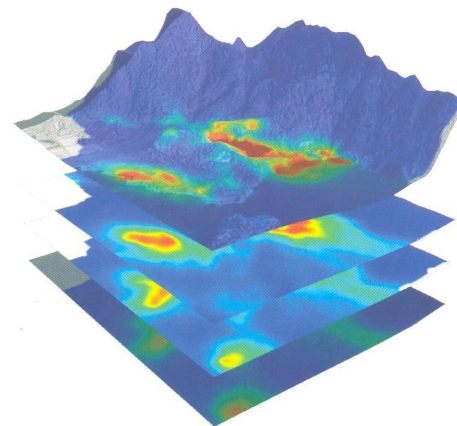
## Data Products and Interpretation



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.

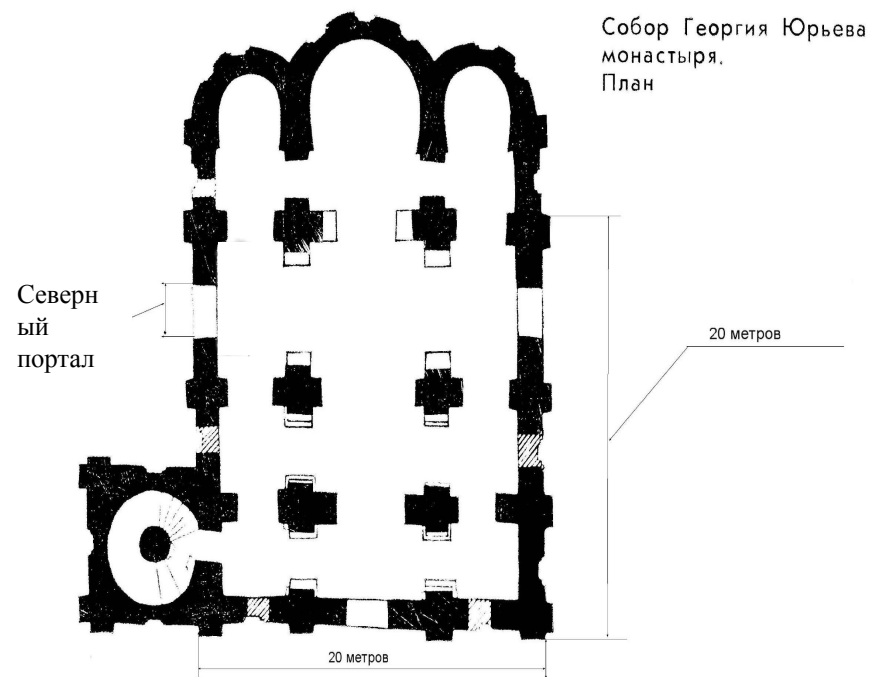
Fugro Airborne Surveys' proprietary PC-based processing software package, ATLAS, allows for the production of a complete suite of geophysical products in the field or in our processing centres. ATLAS' tools and compatibility ensure rigid quality assurance and quality control at the survey site, as well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



# ОТЧЁТ ИНЖЕНЕРНО - ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОРГИЕВСКОГО СОБОРА ЮРЬЕВА МОНАСТЫРЯ



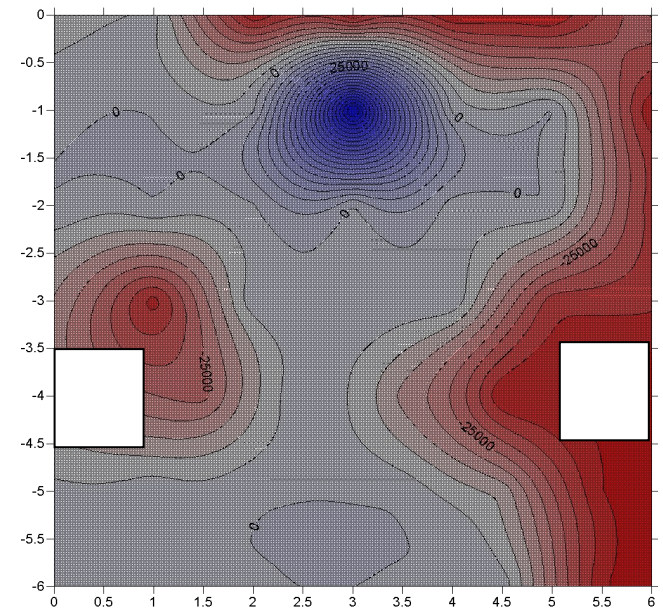
Общий вид Георгиевского собора Юрьева монастыря



План Георгиевского собора Юрьева монастыря



# ОТЧЁТ ИНЖЕНЕРНО - ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОРГИЕВСКОГО СОБОРА ЮРЬЕВА МОНАСТЫРЯ



Обзорная схема магниторазведочных точек наблюдений в Георгиевском соборе в районе Северного портала.

Карта распределение магнитного поля в пределах площади исследований.

# Результаты работы

- Уважаемый Алексей Сергеевич, считаю своим долгом еще раз поблагодарить Вас и Ваших сотрудников за оказанную помощь в исследовании Георгиевского собора нашего монастыря. В начале Июля начались пробные раскопки в Георгиевском соборе от РАН под руководством Седова В.В. Ваши исследования являлись дополнительным основанием для начала этих работ. 6.07.13. обнаружена плита от 1814 года вместо предыдущей с надписью о захоронении в этом месте новгородского чудотворца святителя Феокиста. Плита лежит немного западнее (0.5-1м.) от центра магнитной аномалии Ваших исследований. Такая находка дала почти полную уверенность в обнаружении захоронения свт.Феокиста. Но что предполагала эта "магнитная аномалия", мы, скорее всего, не узнаем, так как пока Владыка Лев решил не вскрывать захоронение, как и в других подобных случаях. Ваш отчет может быть приложен к отчету В.В. Седова. Он просил меня согласовать с Вами этот вариант, поэтому прошу Ваших разъяснений. С благодарностью и уважением иеродиакон Феокист.