A diagram showing the Earth's magnetic field lines. The Earth is represented as a small globe at the center, with blue and green field lines looping around it, illustrating the dipole nature of the field. The background is a dark space with some stars.

Исследование магнитного поля Земли с помощью низкоорбитальных спутников

Лукьянова Р.Ю.

дфмн, гнс

Геофизический Центр

РАН

Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли»

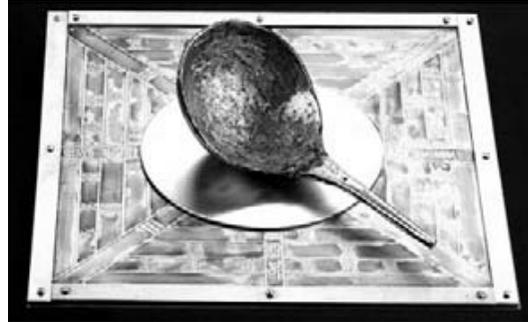
Таруса, 3-7 апреля 2017 г.

Магнитное поле Земли

~3.5 млн лет

Китай: 220 г. до н. э.

Европа: 1200 г. н.э.

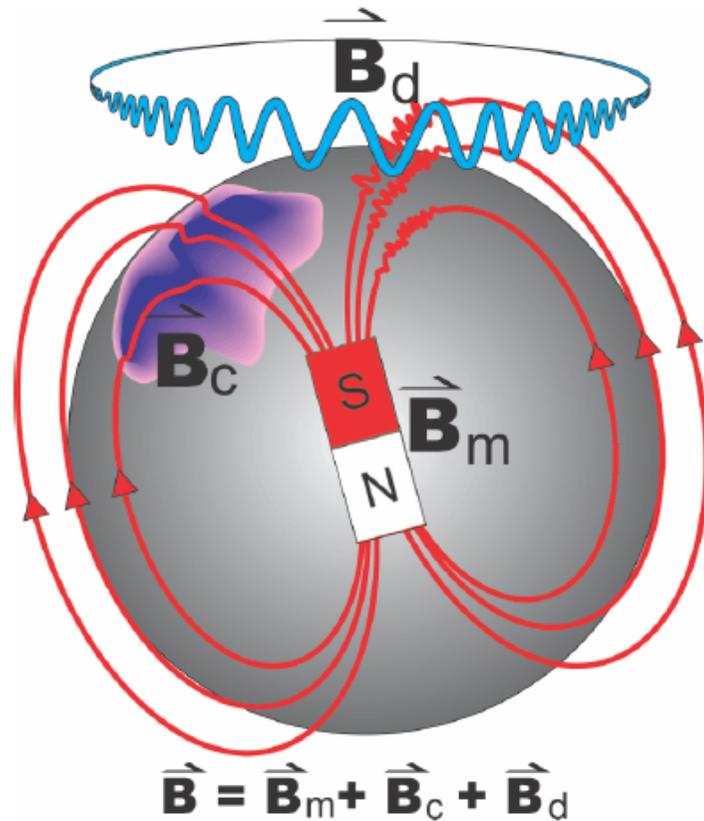


Навигация по компасу: XIII—XIV вв.



На территории
России
измерения
магнитного
склонения
начались во
второй половине
XVI столетия. в
Арктике в районе
Белого и
Баренцева морей

Три источника магнитного поля



B_m - Главное поле

~60000 нТл полюс / вертикальная компонента; ~30000 нТл экватор / горизонтальная компонента
>95% общей величины B
Изменчивость : годы / вековой ход

B_c - Литосферное поле

1-1000 нТл
Локальные аномалии,
Не меняется во времени

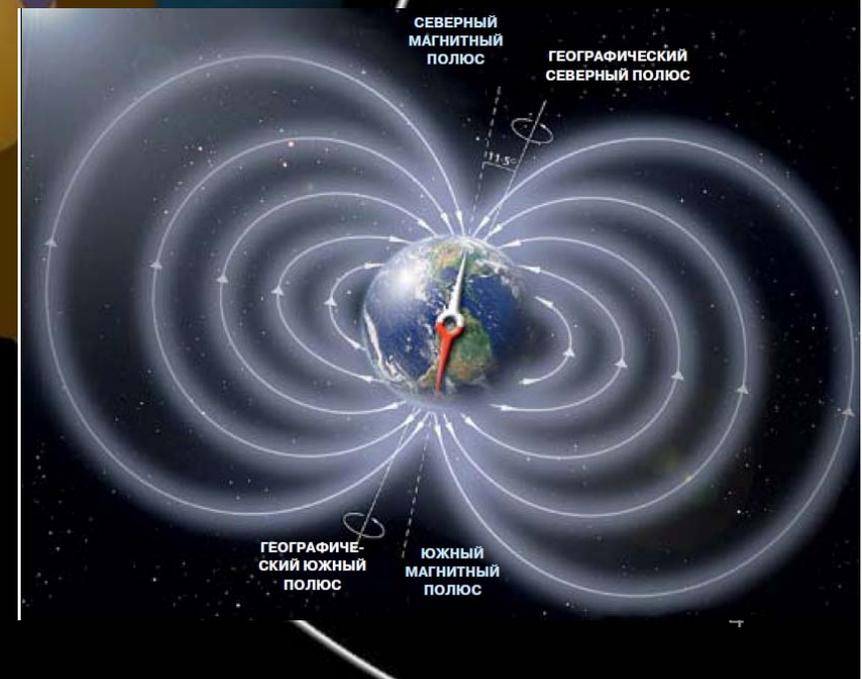
B_d - Внешнее поле

1-5000 нТл (магнитные бури)
Изменчивость: доли сек / сек / мин / час / сутки

Главное магнитное поле

Главное магнитное поле Земли генерируется во вращающемся внешнем ядре Земли, состоящим из жидкого металла – геодинамо.

Главное поле - диполь, ось которого составляет с осью вращения Земли угол 11.5° .



Математическое описание главного поля МАГНИТНОГО ПОЛЯ

состоит в аппроксимации двойным рядом присоединённых функций Лежандра с парой коэффициентов для каждой функции, зависящих от широты и долготы. Напряжённость поля получается из градиента геомагнитного скалярного потенциала

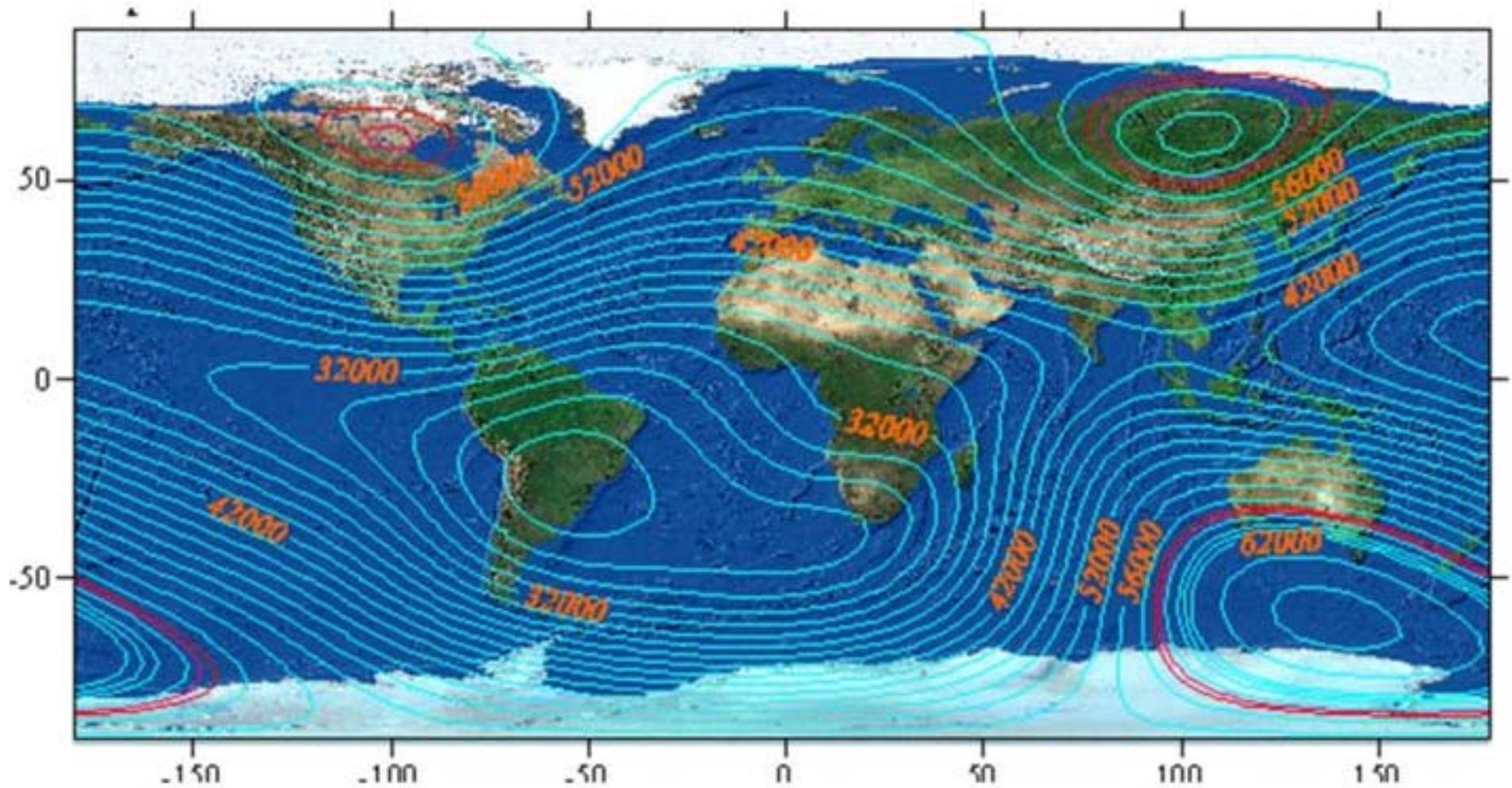
$$\mathbf{B} = -\nabla V$$

$$V = a \sum_{n,m} (g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n^m(\vartheta)$$

Больше коэффициентов в разложении – точнее модель

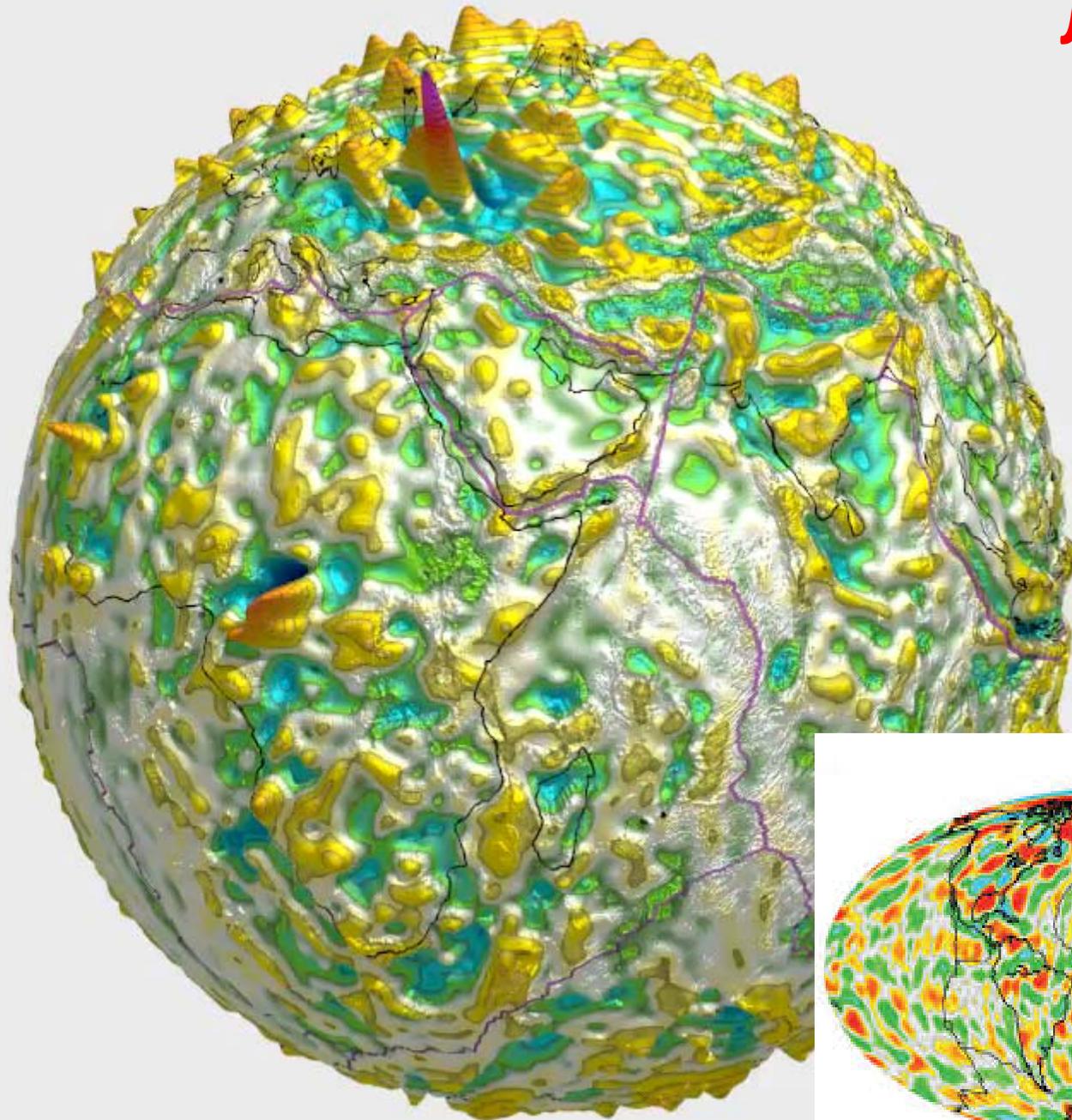
Недипольная составляющая главного поля

Отклонения от дипольного поля возникают за счет мировых (материковых) аномалий: Бразильской, Южной, Канадской и Восточно-Сибирской.



Литосферное поле: мелко-масштабные магнитные аномалии

Намагниченные геологические породы



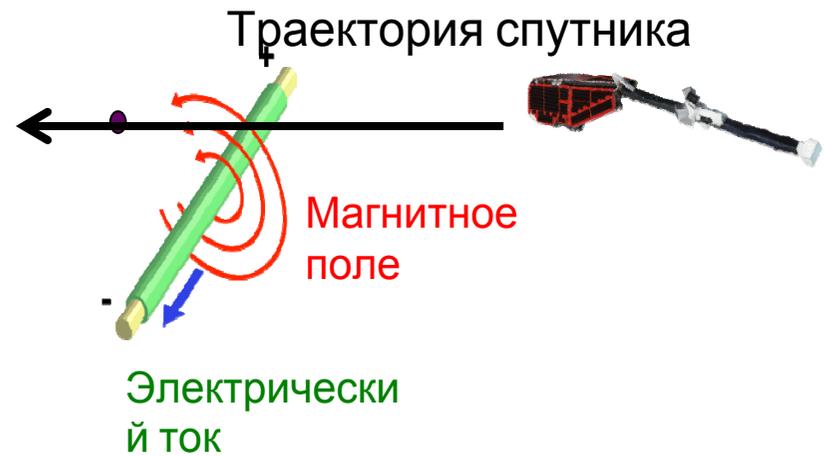
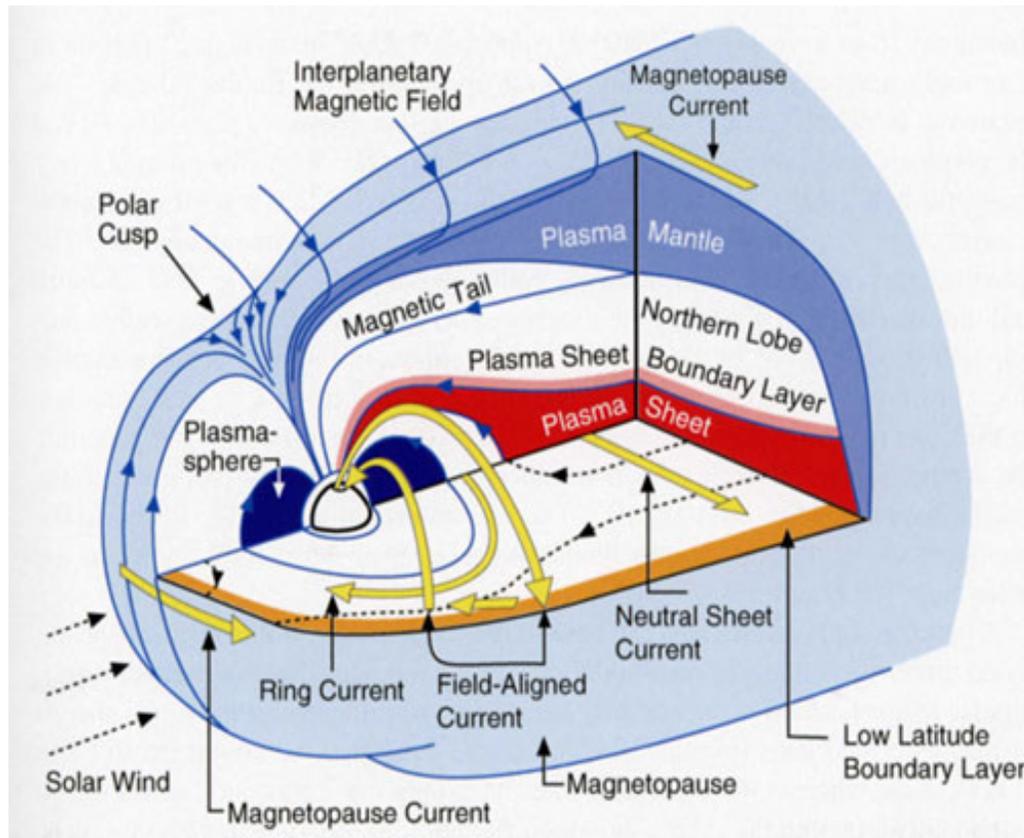
Магнитное поле Земли и солнечный ветер формируют магнитосферу

На больших расстояниях от Земли магнитный диполь несимметричен

Плазма в пограничных слоях и хвосте магнитосферы

Внешнее магнитное поле Земли

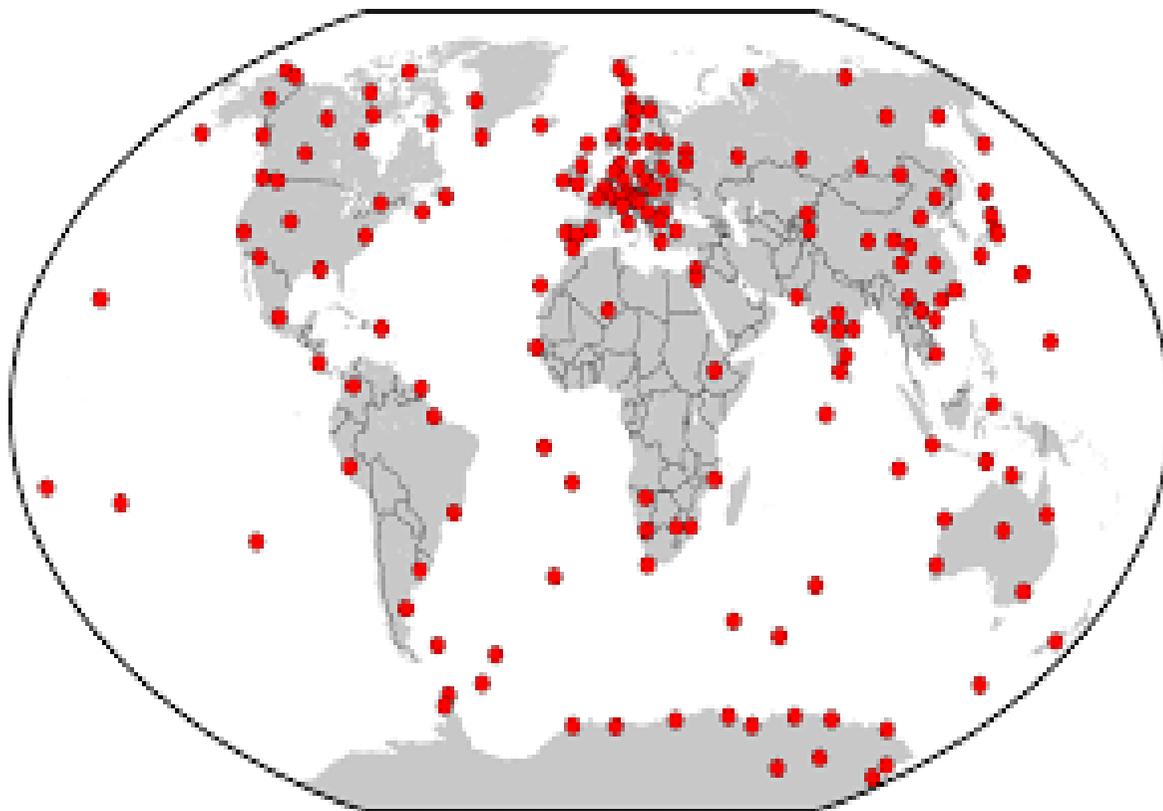
Создается электрическими токами, текущими в околоземном космическом пространстве: в ионосфере и магнитосфере



$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{j}$$

От наземных к спутниковым измерениям

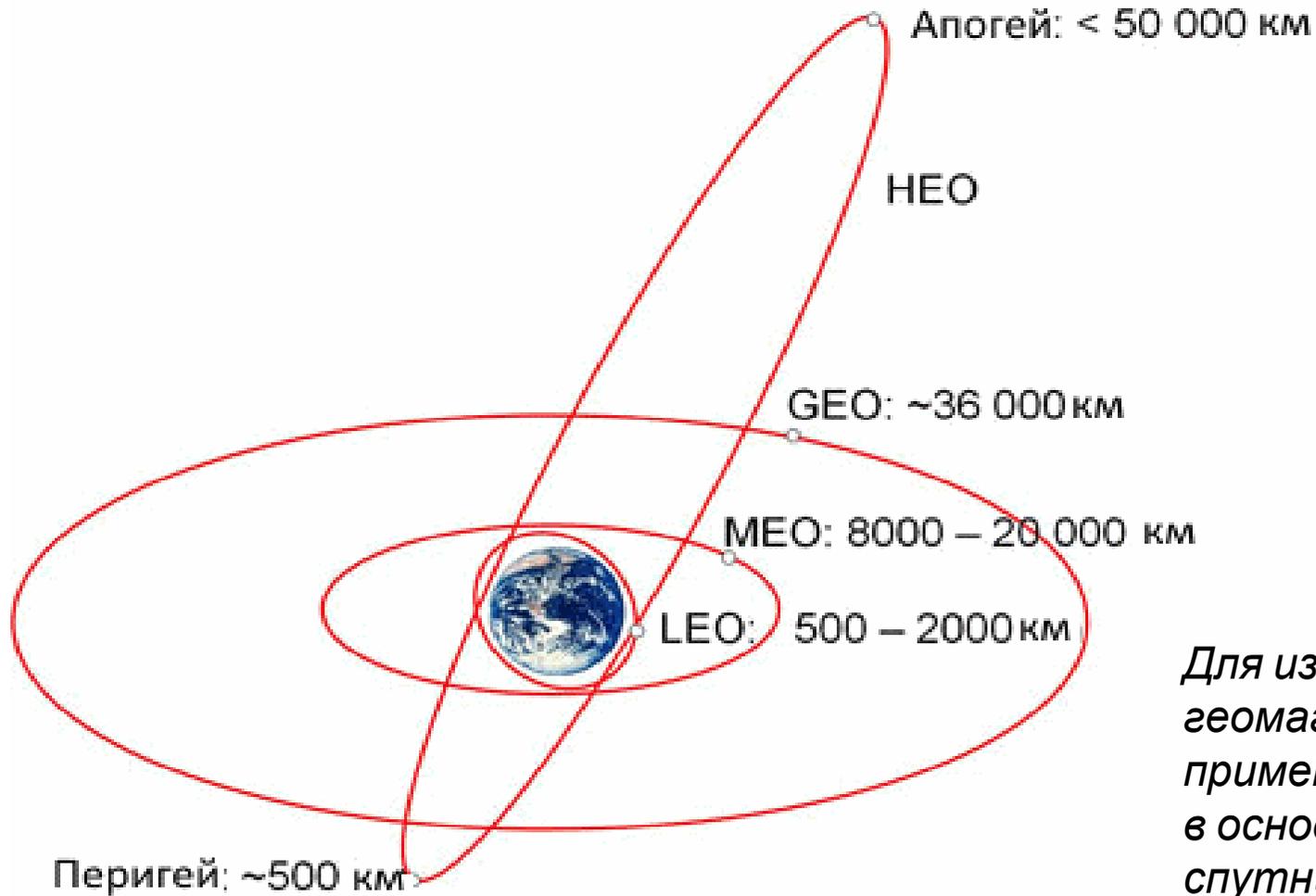
Карта расположения наземных обсерваторий



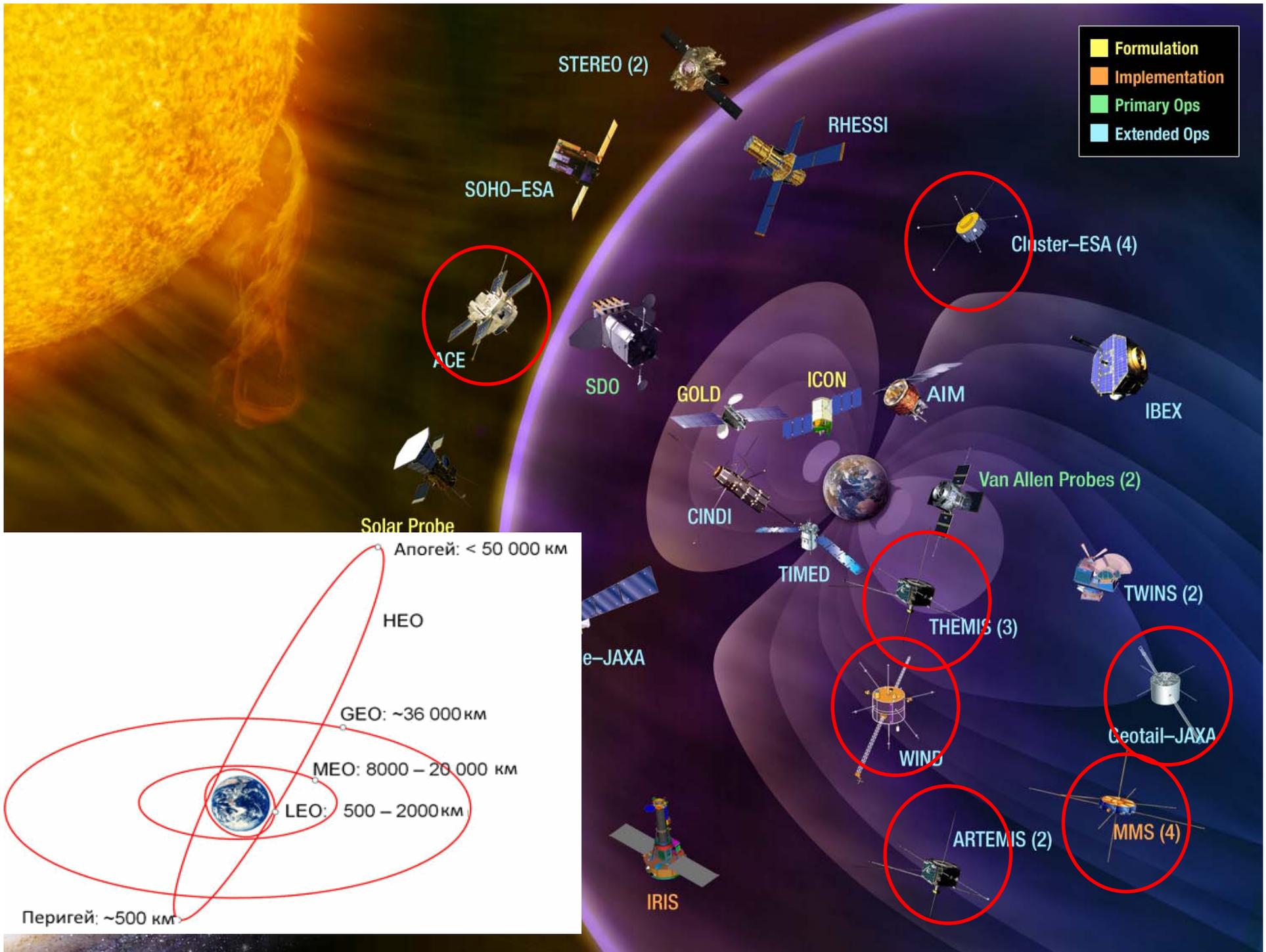
Глобальное покрытие



Типы орбит



Для измерения геомагнитного поля применяются в основном спутники с низкой полярной орбитой





Источники магнитного поля, измеряемого в околоземном пространстве

Внутренние:

- (Квази)диполь >95% (60000 нТл)
- Геологические структуры ~1%
- Индукционные токи ~1% ?

Внешние:

- Магнитосферные токи ~1%
- Ионосферные токи ~1%
- Токи, связывающие М-И ~1%
- Океанские течения <0.1%

Требования к параметрам орбиты и аппаратуре спутника для измерения магнитного поля Земли

A satellite is shown in orbit around the Earth. The Earth is depicted with continents and oceans. Blue lines represent magnetic field lines. The satellite is positioned in a low orbit, and its trajectory is shown as a series of overlapping loops.

Корректное разделение внутреннего и внешнего поля, временных и пространственных вариаций

Спутниковые магнетометры: скалярный и векторный

Диапазон и точность измерений 0.1 - 70000 нТл

Ориентация в пространстве системами оптического позиционирования по звездам

Низкая орбита

Высота: 150 – 2000 км

Орбитальный период: 80 – 120 мин

Медленный дрейф траекторий для покрытия всех долготных секторов

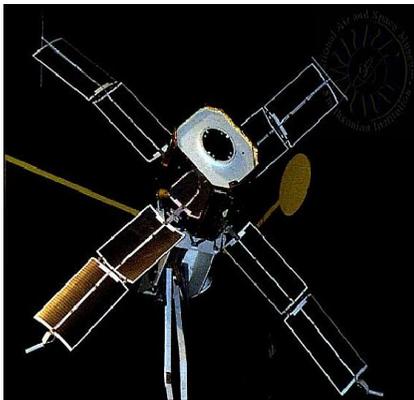
Swarm



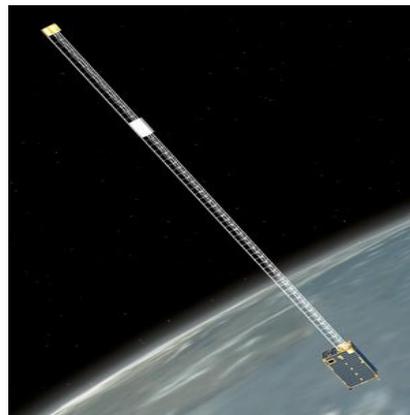
Спутники для измерения магнитного поля

Низколетящие спутники с полярной орбитой, оснащенные высокоточными магнетометрами и системами оптического позиционирования по звездам

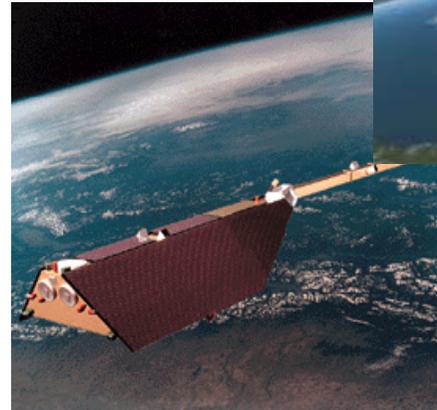
Magsat 1979-1980
(NASA)



CHAMP
2000-2012
(Германия)



Oersted
1999-2010
(Дания)



SWARM 2013-
(ЕКА)



Одноаппаратные миссии

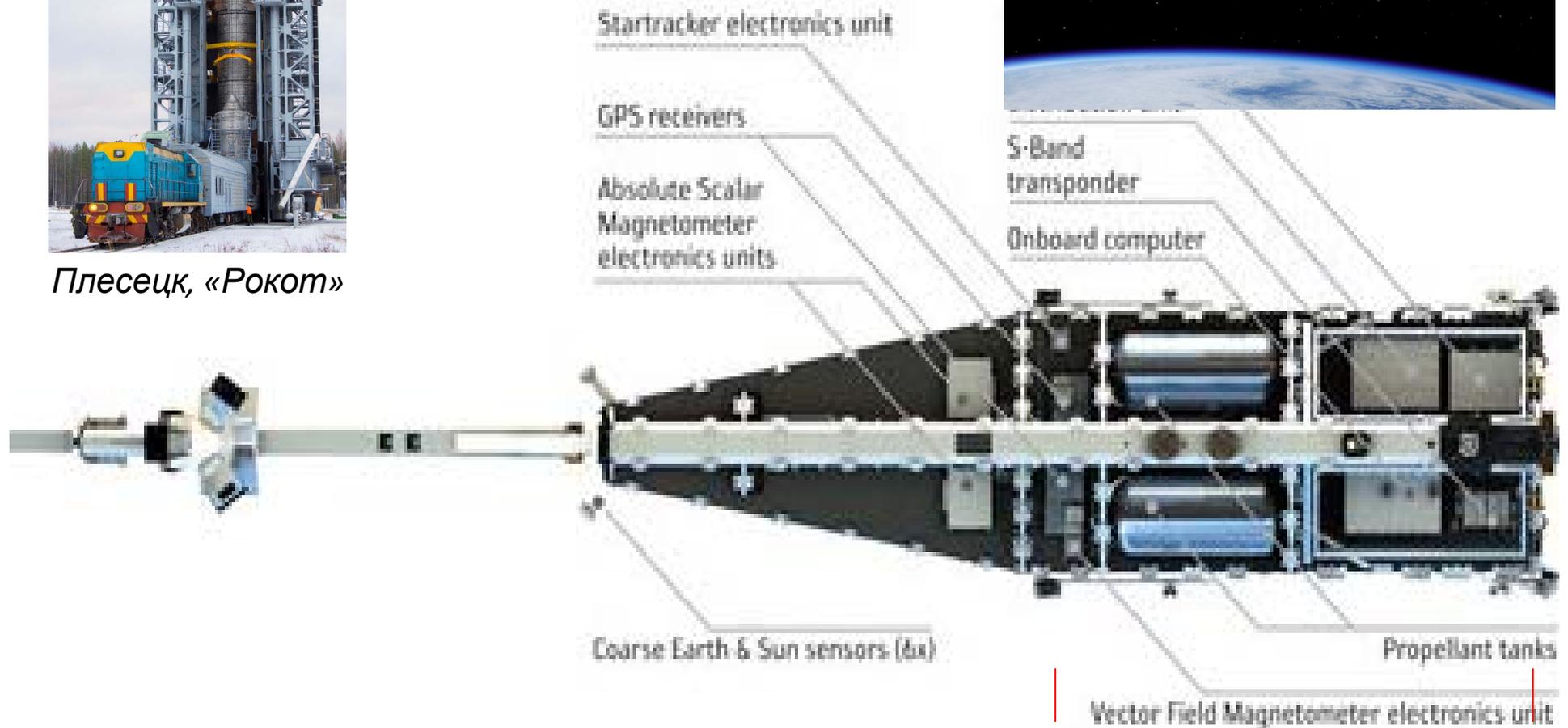
Мультиаппаратная миссия – одновременные измерения в нескольких точках – разделение временных и пространственных вариаций

Группировка Swarm: 3 идентичных



Плесецк, «Рокот»

Европейское
космическое агентство



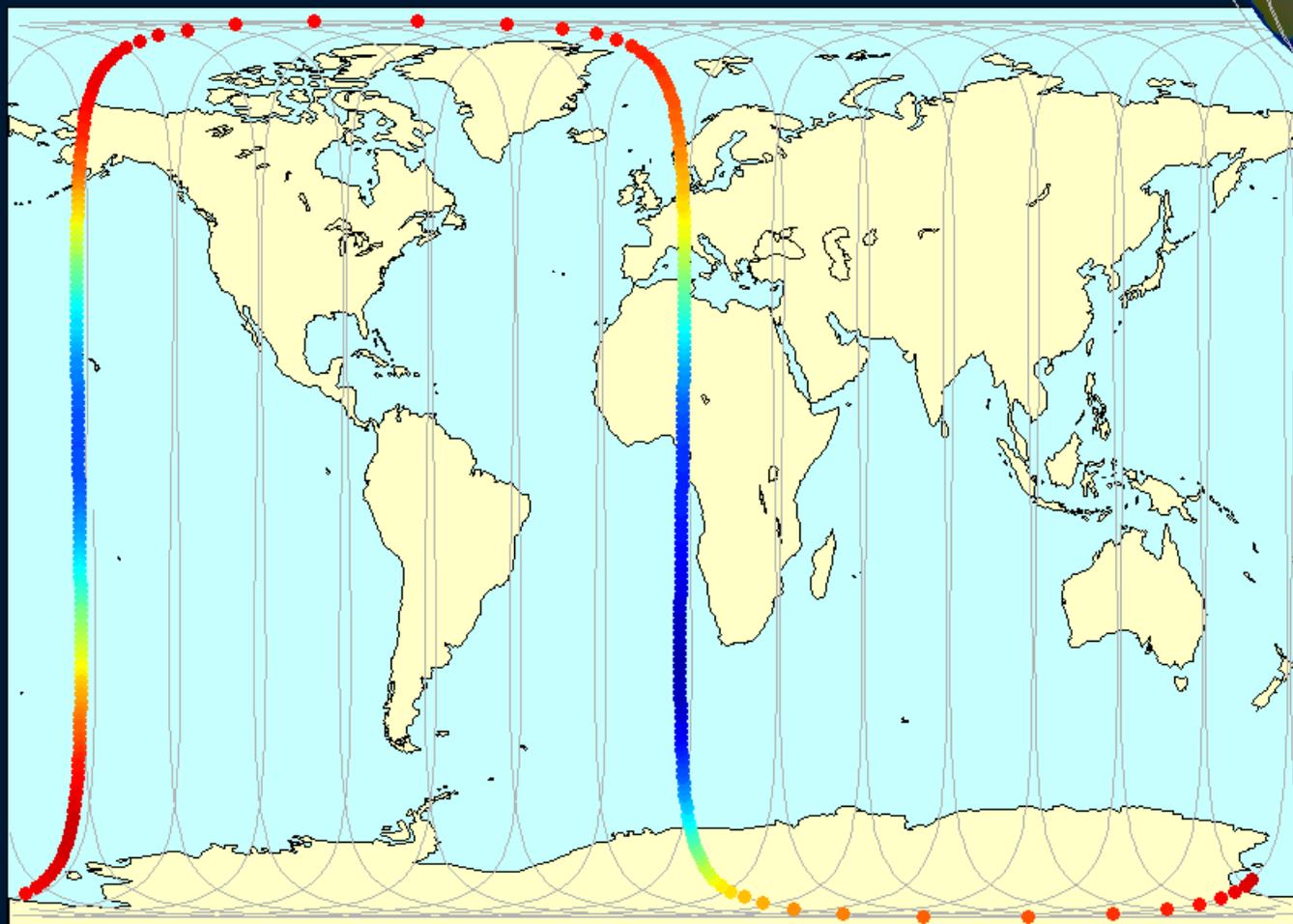
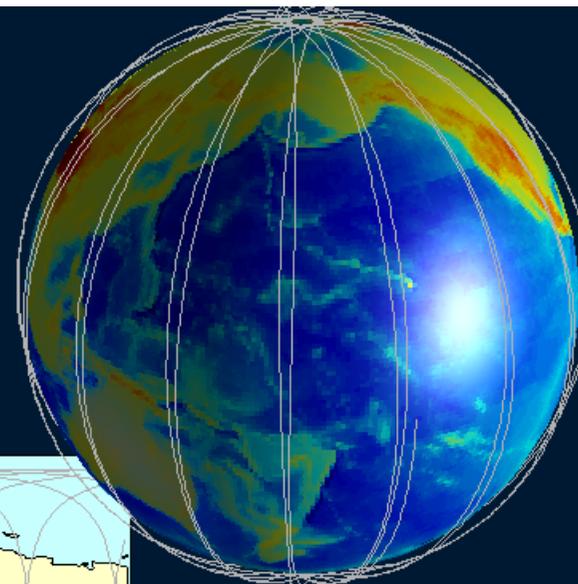
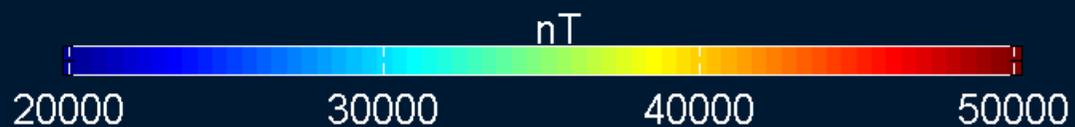
Swarm



Вес каждого КА 468 кг; 106 кг топлива;
Поперечное сечение $\sim 1.0 \text{ м}^2$;
Длина $\sim 9 \text{ м}$

Swarm-A 02-12-2013

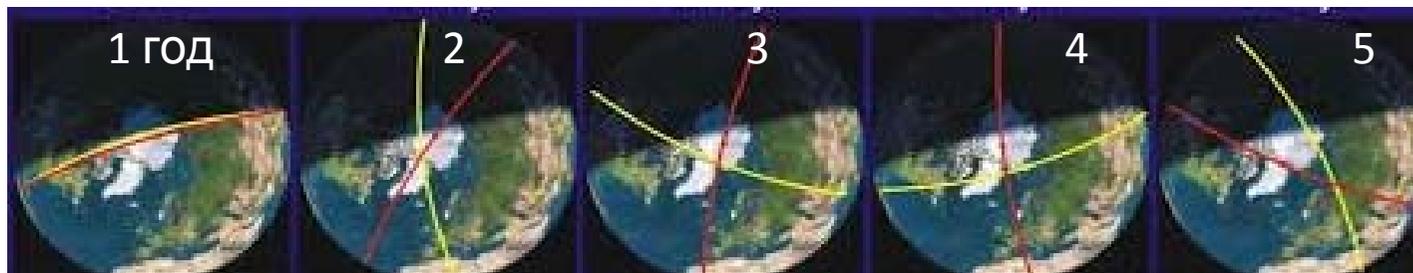
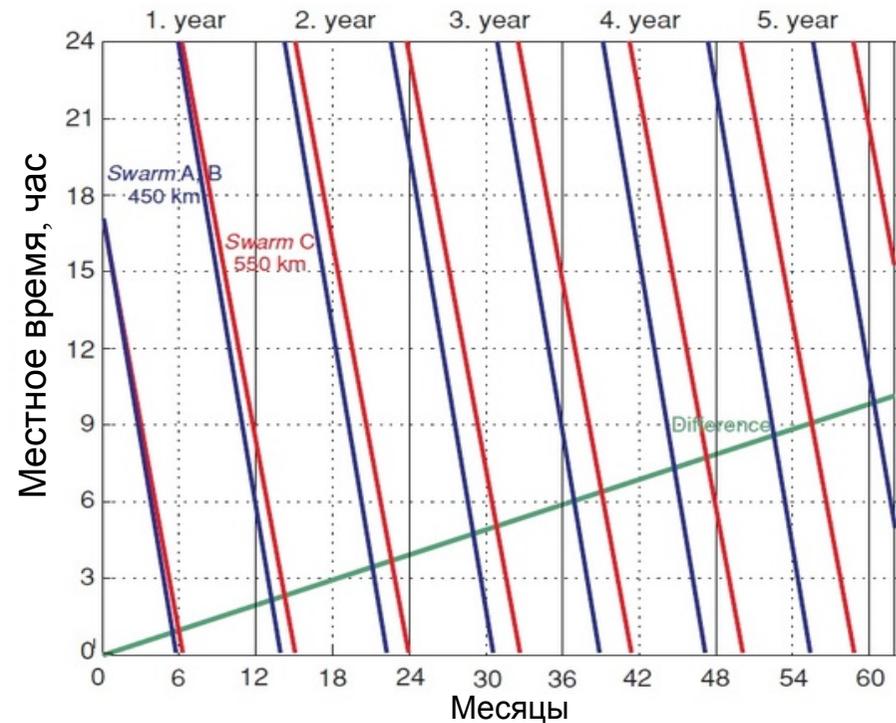
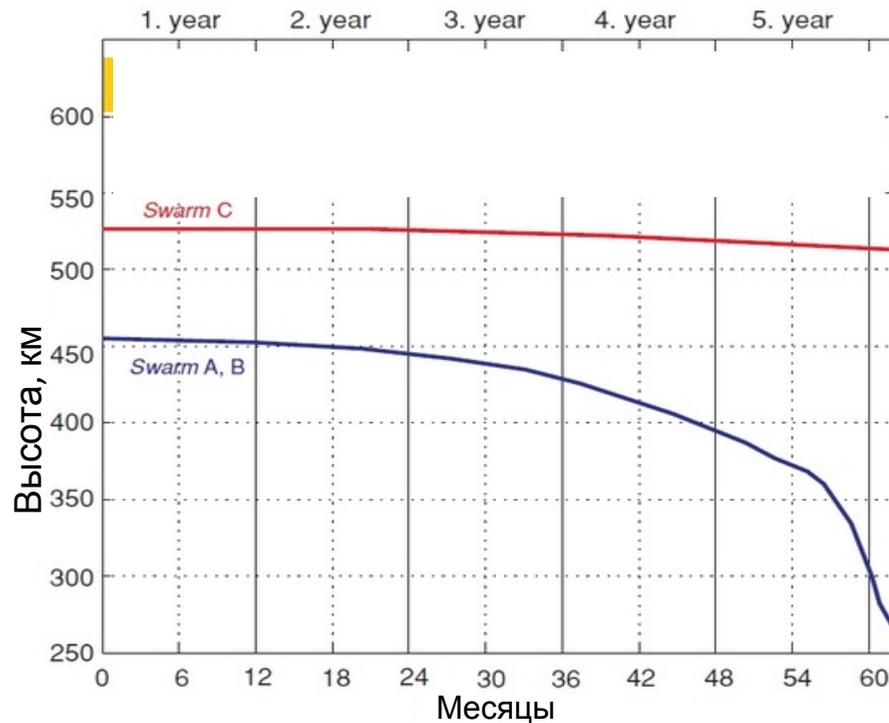
Орбиты



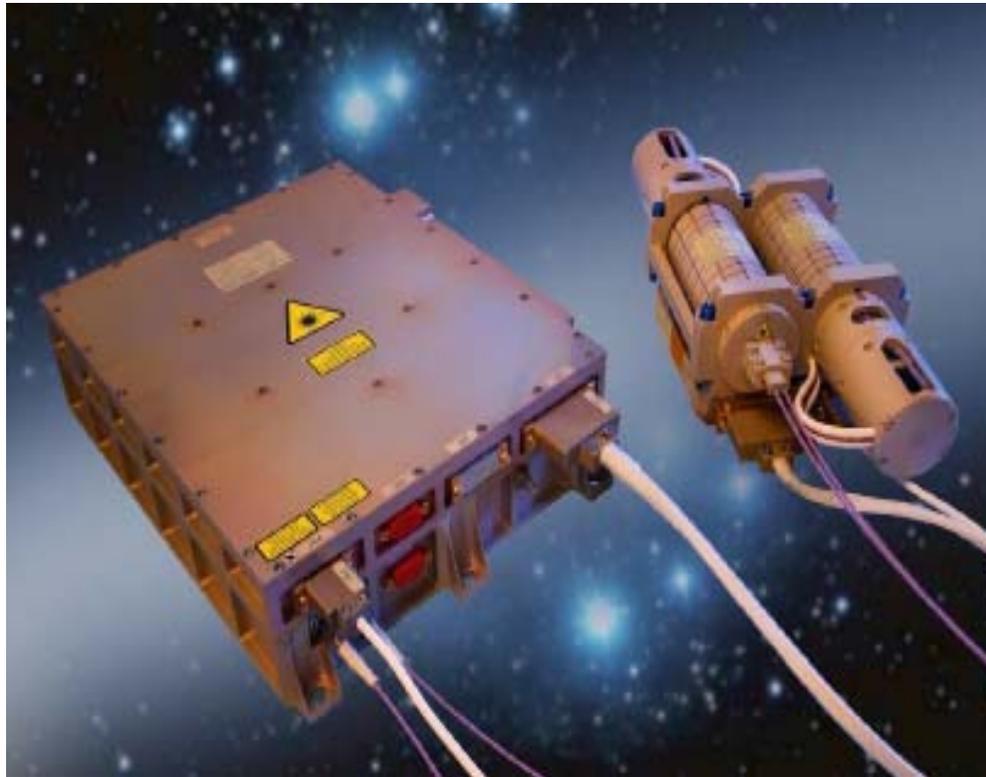
Эволюция орбит Swarm 2013-2018

3 идентичных аппарата на полярной орбите.

Два спутника летят параллельно ($\Delta=1.6^\circ$) на $h\sim 460$ km; один спутник - на $h\sim 530$ km



Скалярный и векторный магнитометры



Чувствительность:

0.1 нТл (скал.)

0.5 нТл (вект.)

Частота 50 Гц

Диапазон ± 65000 нТл

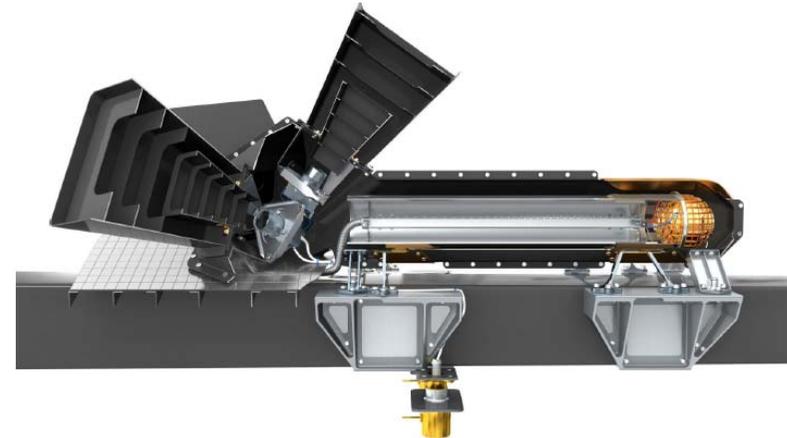
Скалярный (протонный) магнитометр для абсолютных измерений и векторный (феррозондовый) магнитометр для измерений трех ортогональных компонент
Производство CNES/LETI

Другие приборы

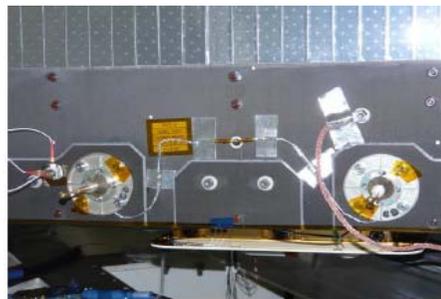
Измеритель
 T_e и T_i
в ионосфере



Система оптического
позиционирования по звездам



Ленгмюровский
зонд



Акселерометр



Основные научные задачи Swarm

1. Поле, генерируемое в жидком ядре, и его вариации

- Определение пространственно-временной структуры и изменений поля ядра

2. Намагниченность литосферы

- Определение мелкомасштабного поля в коре

3. Электропроводность мантии

- Глобальная 3D картина проводимости мантии

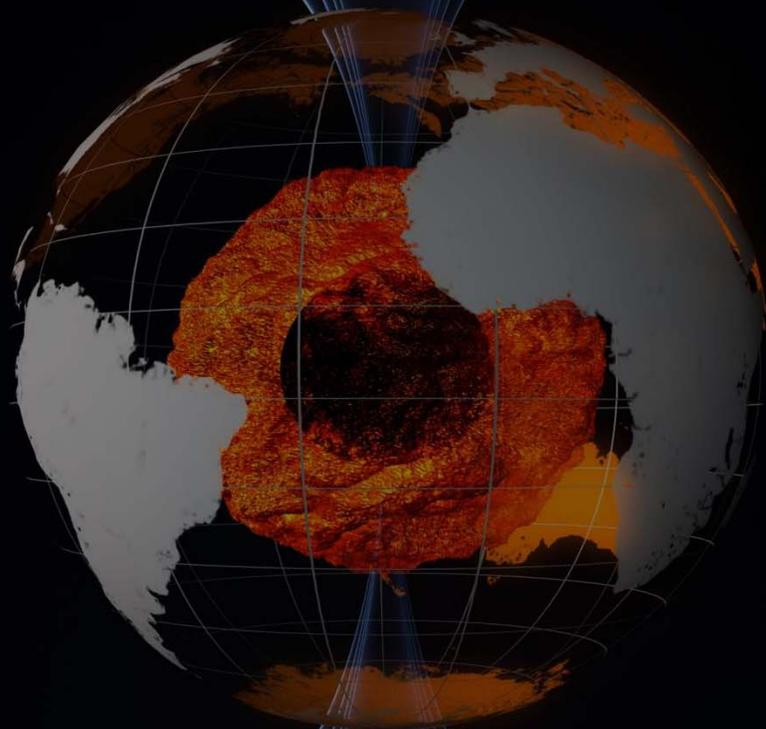
4. Электродинамическое состояние околоземного пространства

- Ионосферные, магнитосферные и продольные токи
- Дрейфы ионосферной плазмы, плазменные неоднородности.

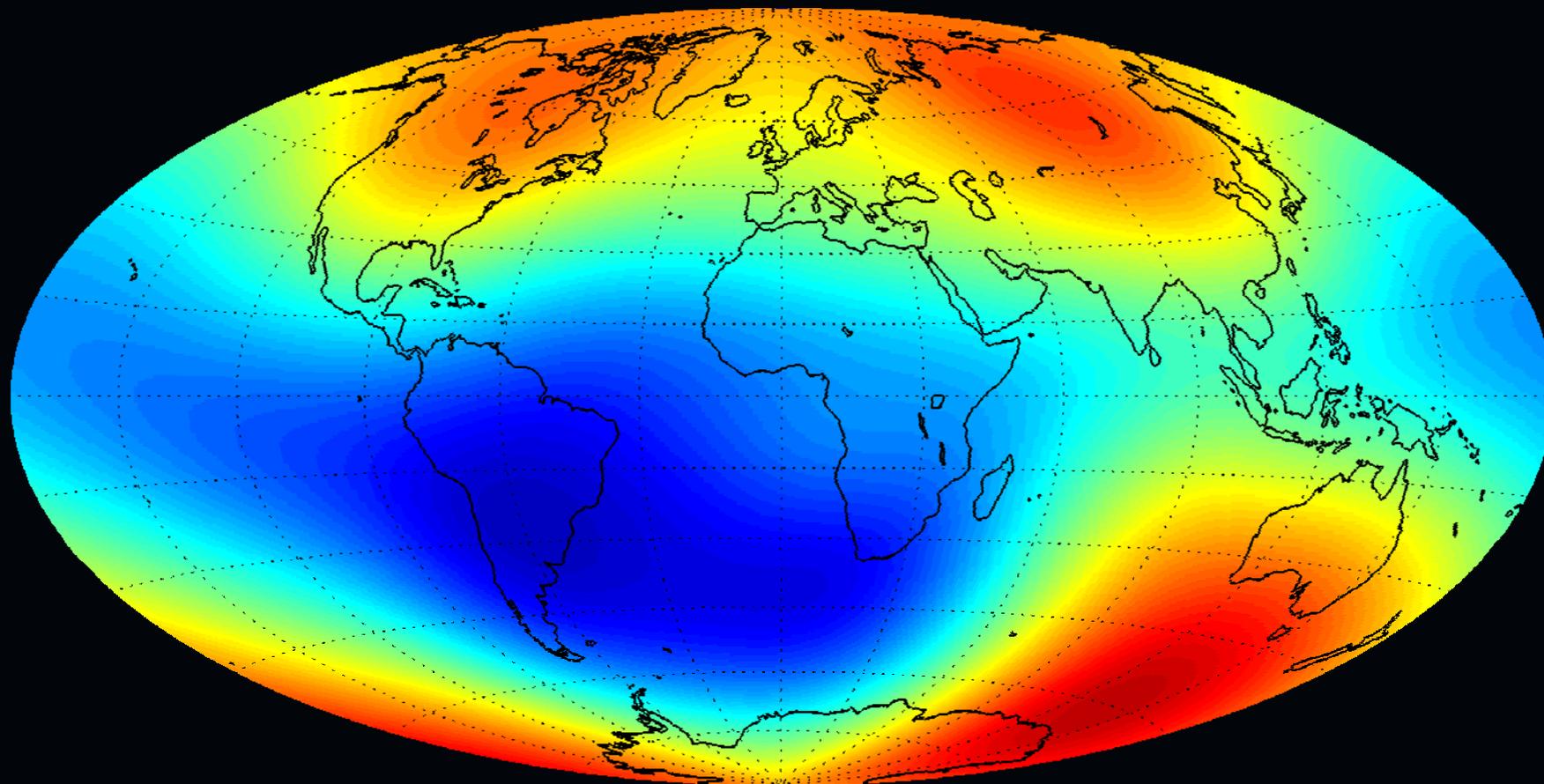
5. Магнитное поле океанских течений



Результаты Swarm



Глобальное распределение интенсивности магнитного поля

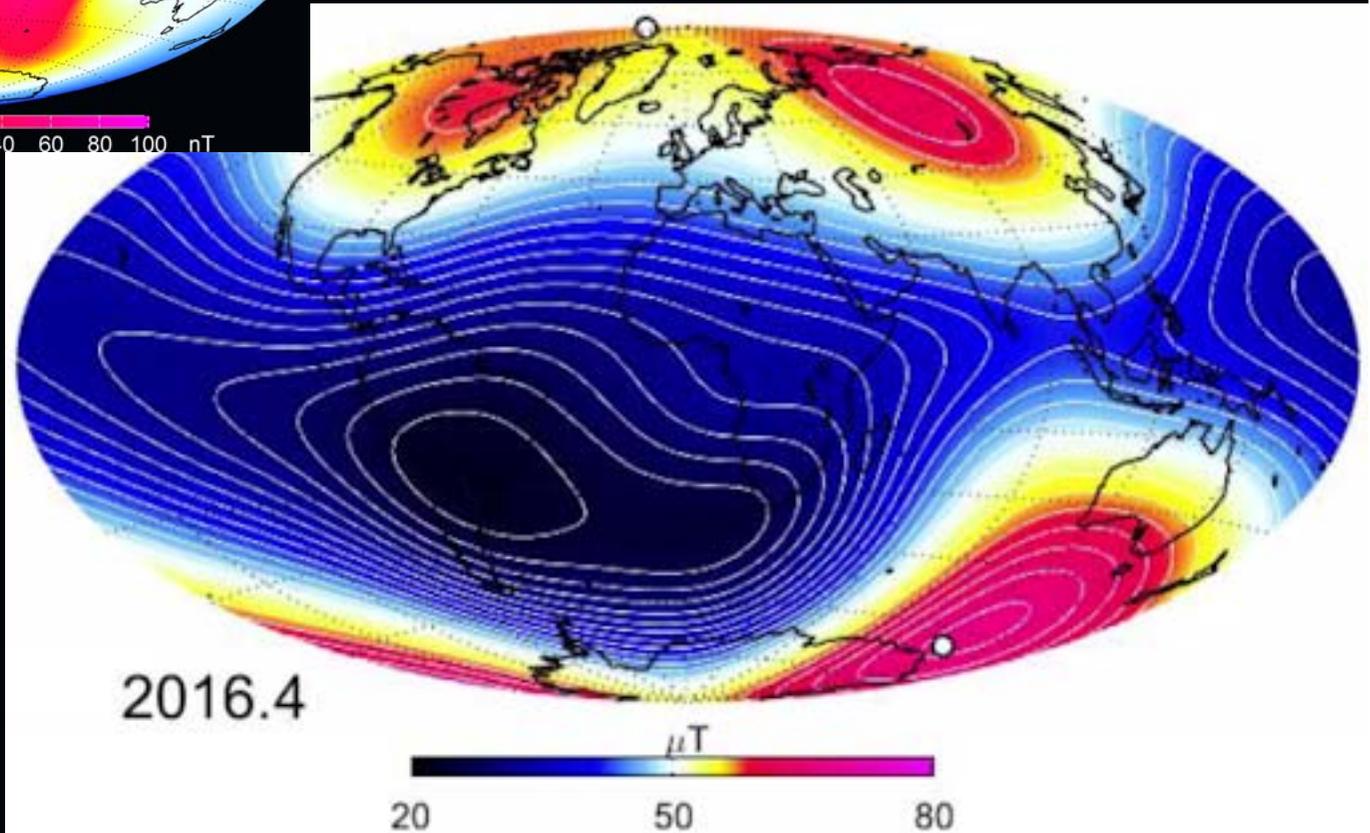
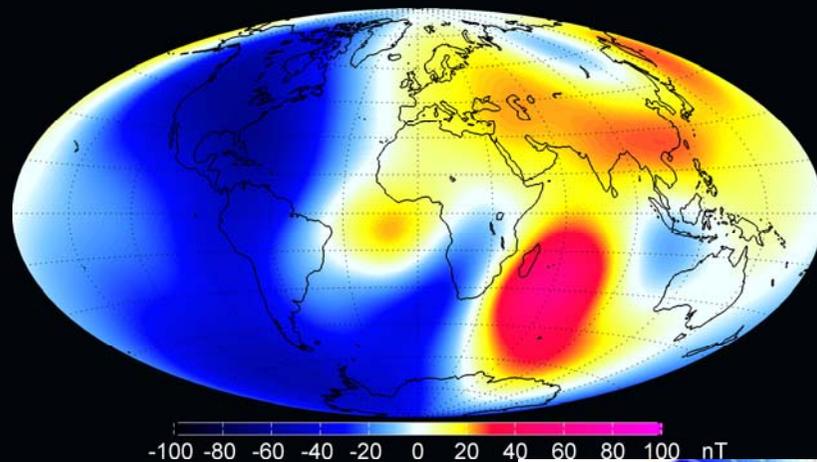


20000 30000 40000 50000 60000 70000 nT

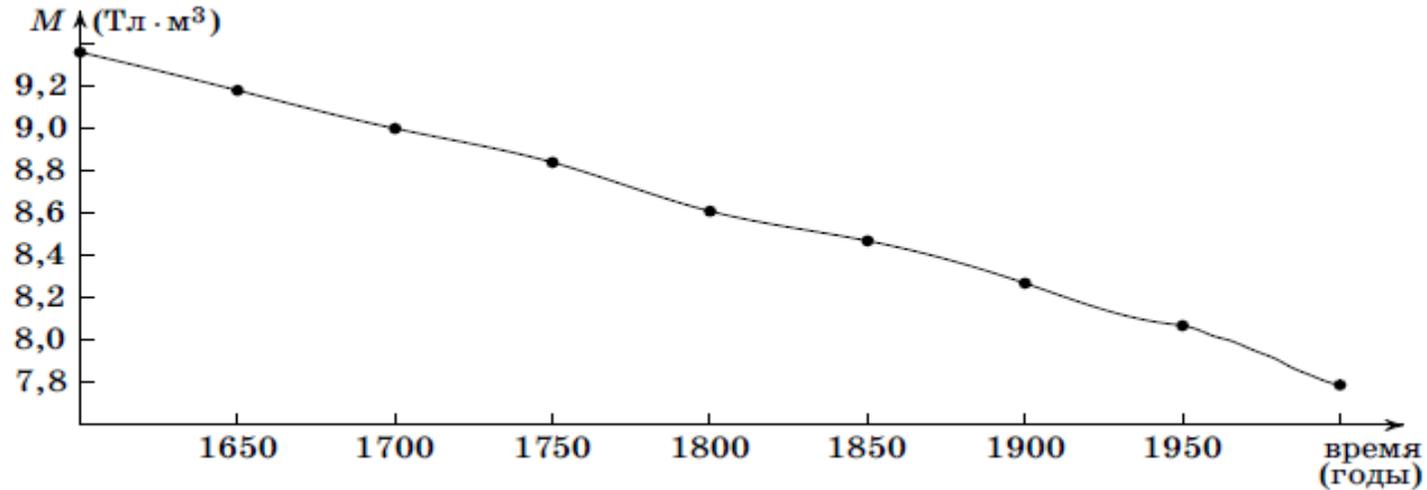
at Earth's surface

Изменение интенсивности магнитного поля

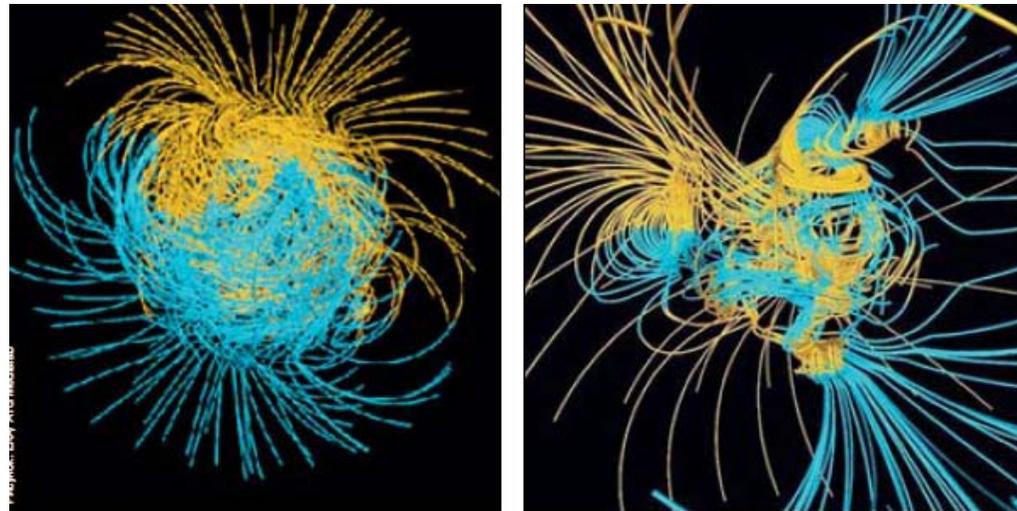
За период 6 месяцев (декабрь 2013 - июнь 2014)



Тенденция ослабления главного поля



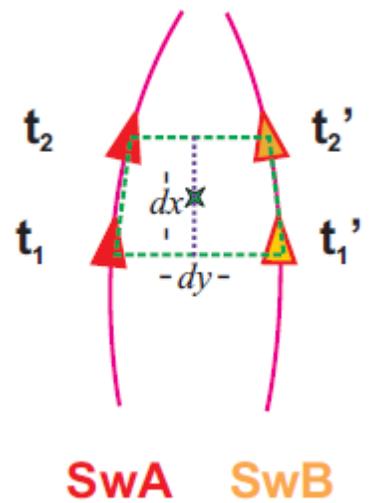
**Переполюсовк
а**



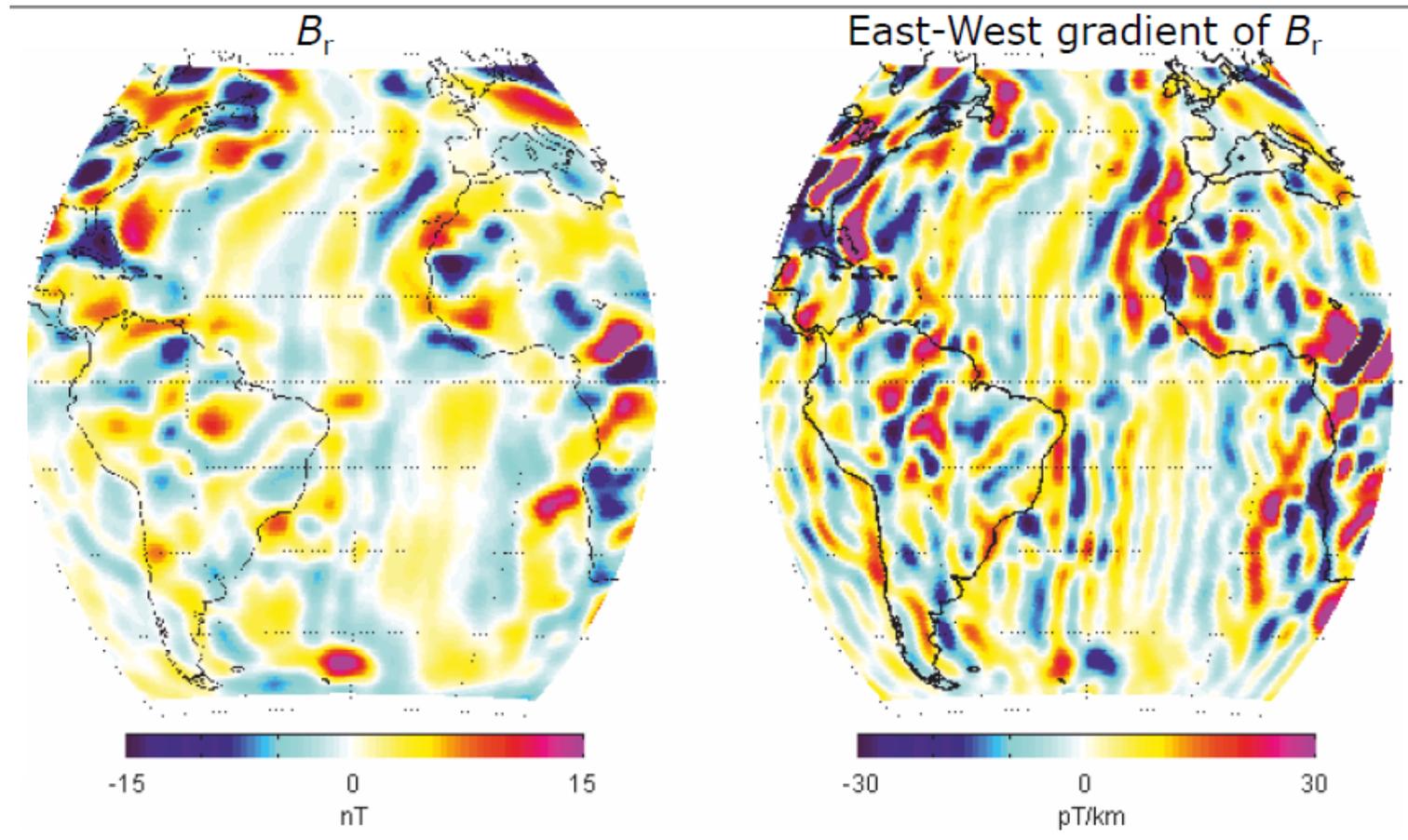
Модельное представление главного магнитного поля в его современном состоянии и в процессе переполюсовки, когда дипольное поле превращается в мультипольное

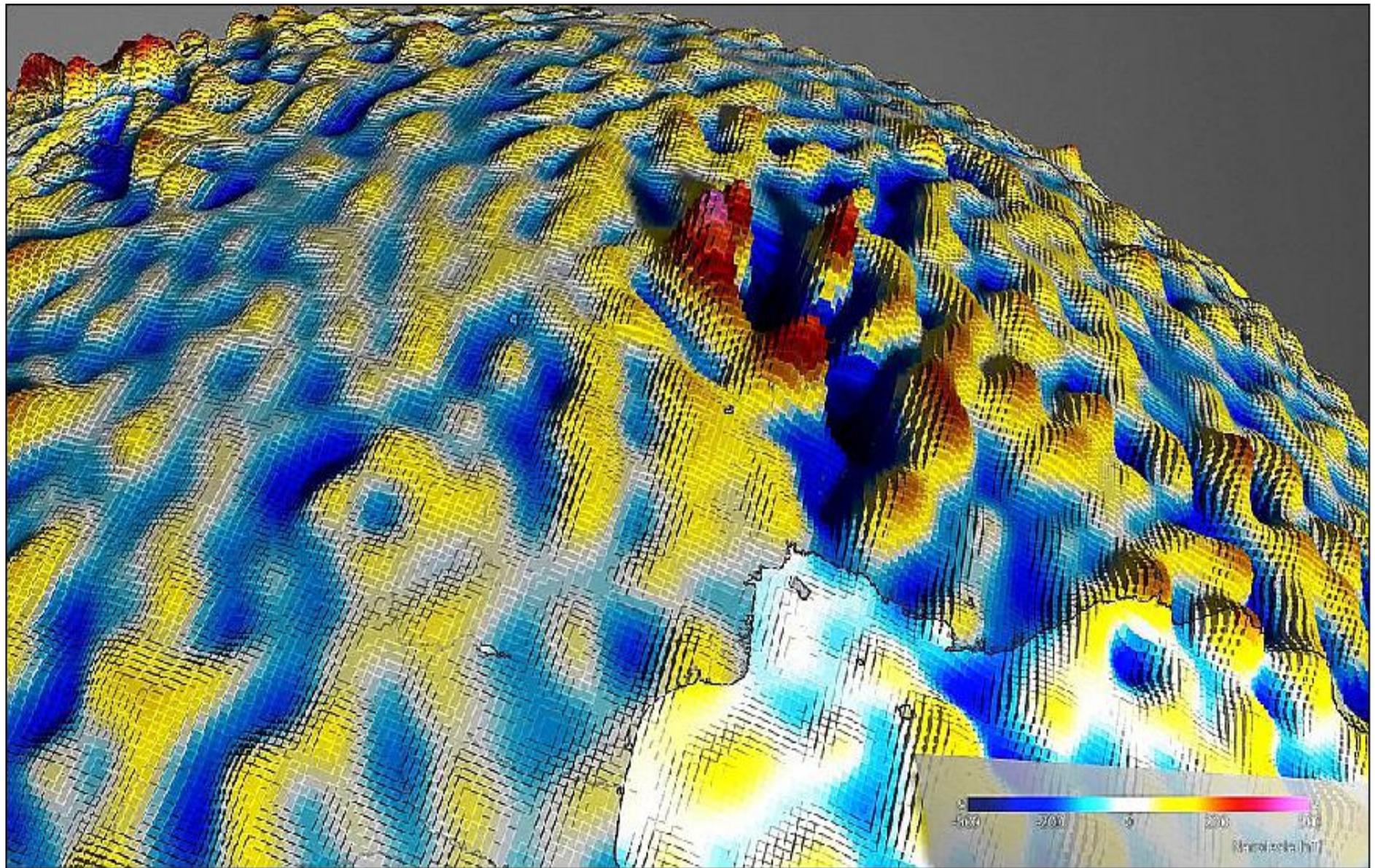
Карты глобального распределения литосферного поля

Два спутника позволяют измерить долготный градиент магнитного поля.



Градиент более точно описывает мелкомасштабные неоднородности





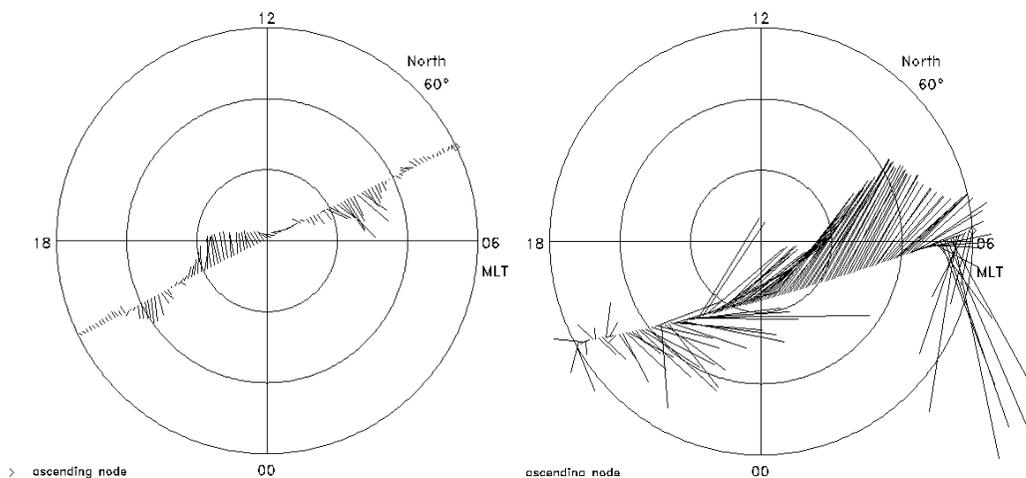
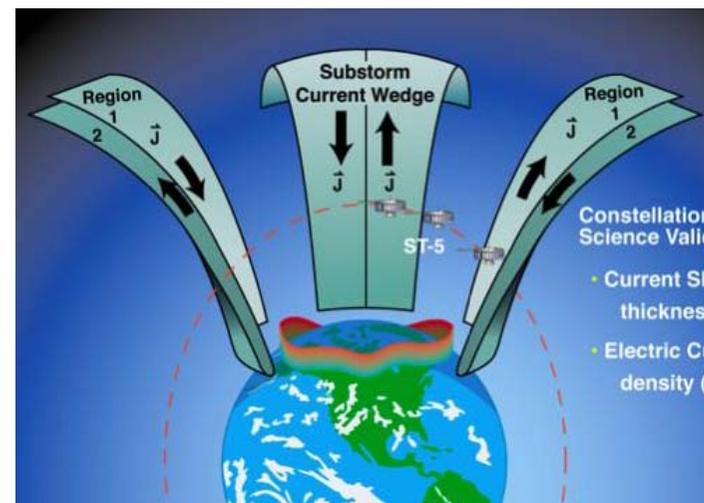
Электродинамика магнитосферы-ионосферы

Структура «продольных» токов, текущих вдоль силовых линий геомагнитного поля между пограничными слоями магнитосферы и ионосферы.

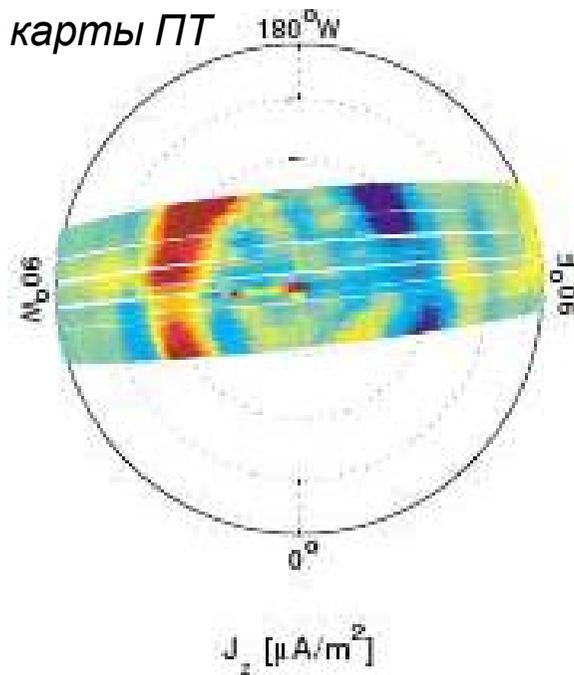
Вдоль траектории пролета спутника над полярной областью измеряются магнитные вариации

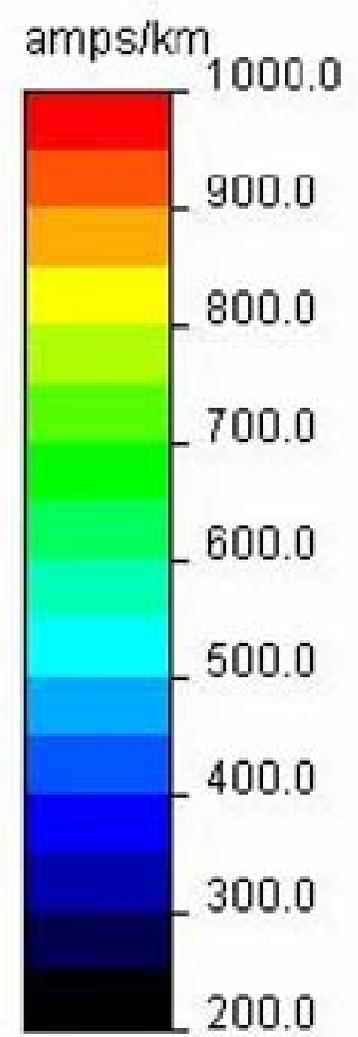
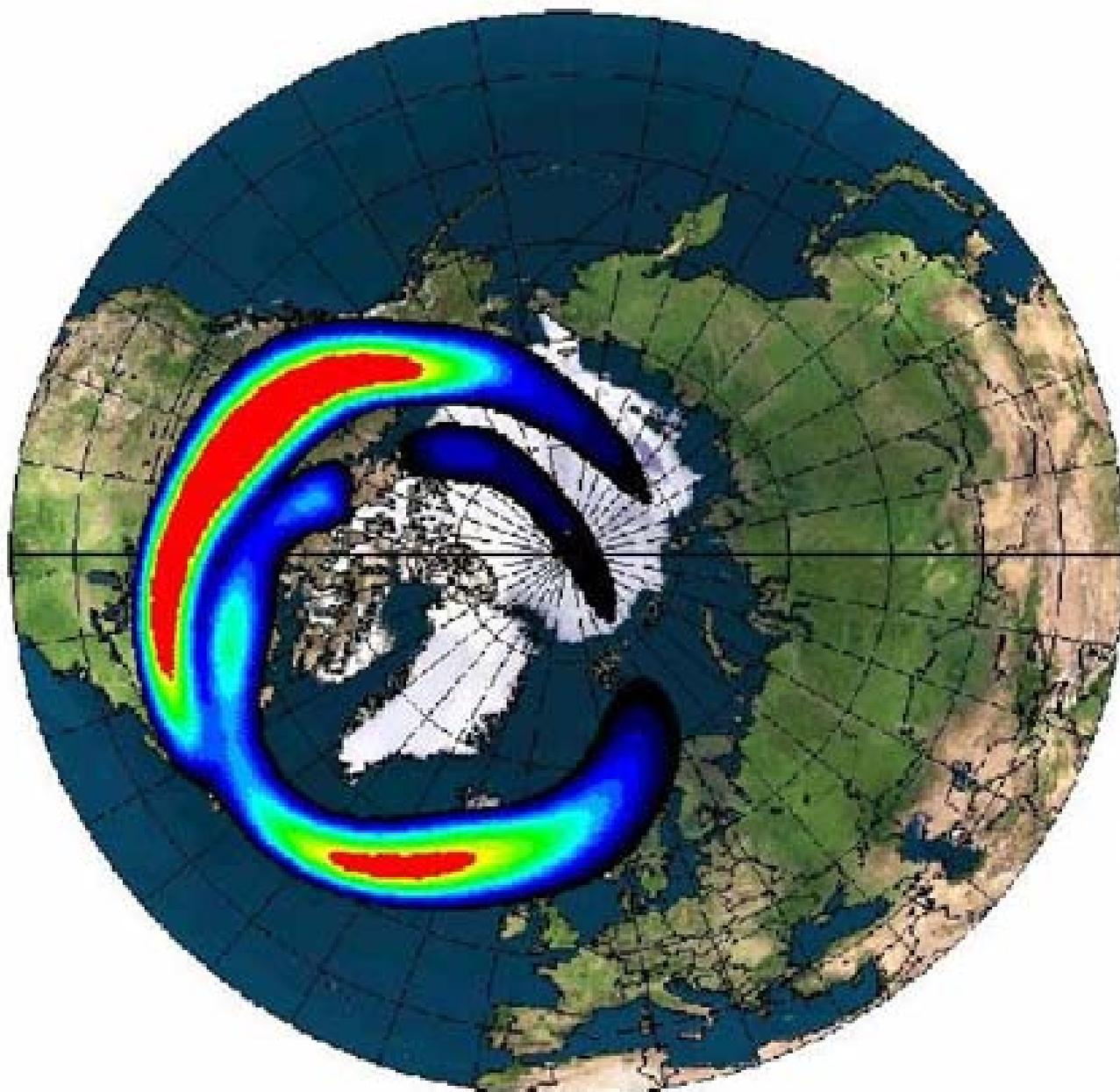
$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB_y}{dx} - \frac{dB_x}{dy} \right)$$



2D карты ПТ





Магнитный сигнал океанских течений

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla \times \mathbf{V}_{\text{оcean}} - \mathbf{u} \times \mathbf{B}_{\text{main}}$$

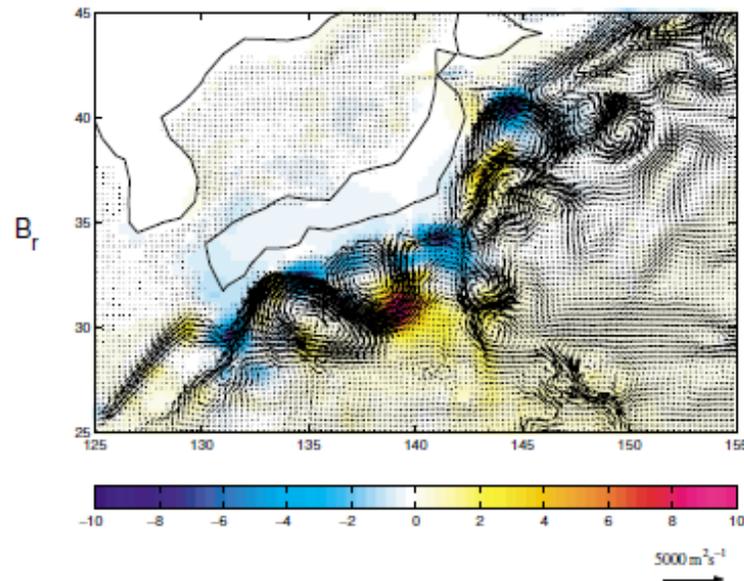
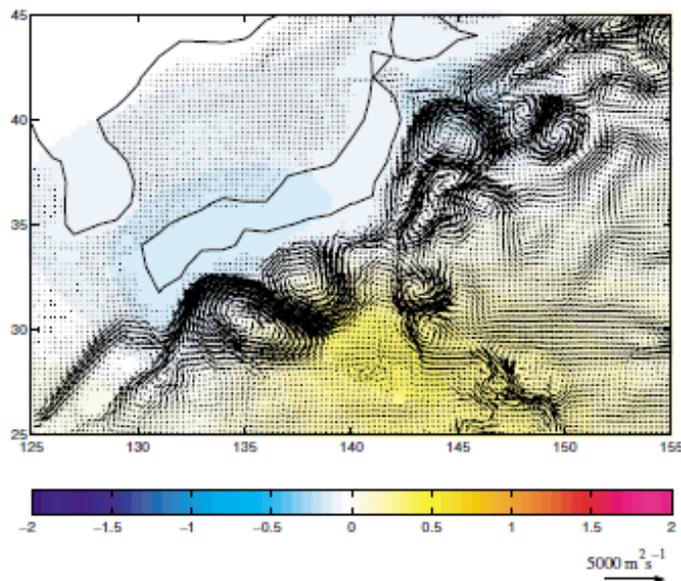
$$\partial_t \mathbf{B}_{\text{оcean}} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

Движения океана генерируют магнитный сигнал, обусловленный **бароклиной** компонентой. Спутниковая альтиметрия позволяет определить **баротропную** компоненту.

Интенсивность сигнала:
 единицы
 нТл на высоте орбиты спутника;
 Приливы ± 10 нТл;
 Течения дают нестационарный сигнал
 (в отличие от литосферного)

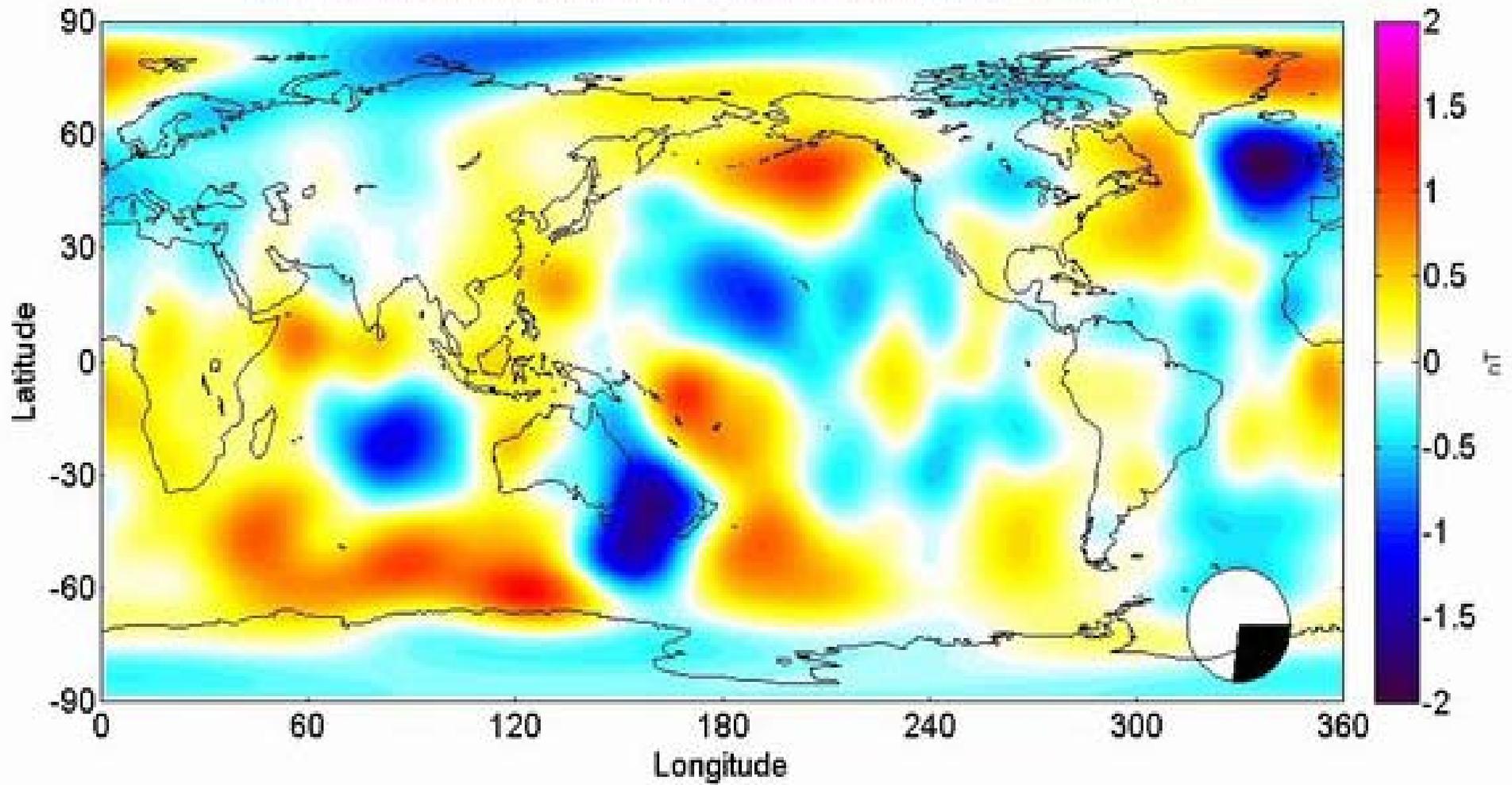
Интенсивность сигнала зависит от проводимости воды: соленость, мобильности ионов (температура, давление).
Температура играет основную роль. Холодная вода
проводимость ~ 2.5 С/м, теплая ~ 6 С/м.

Поле течения *Курисио*

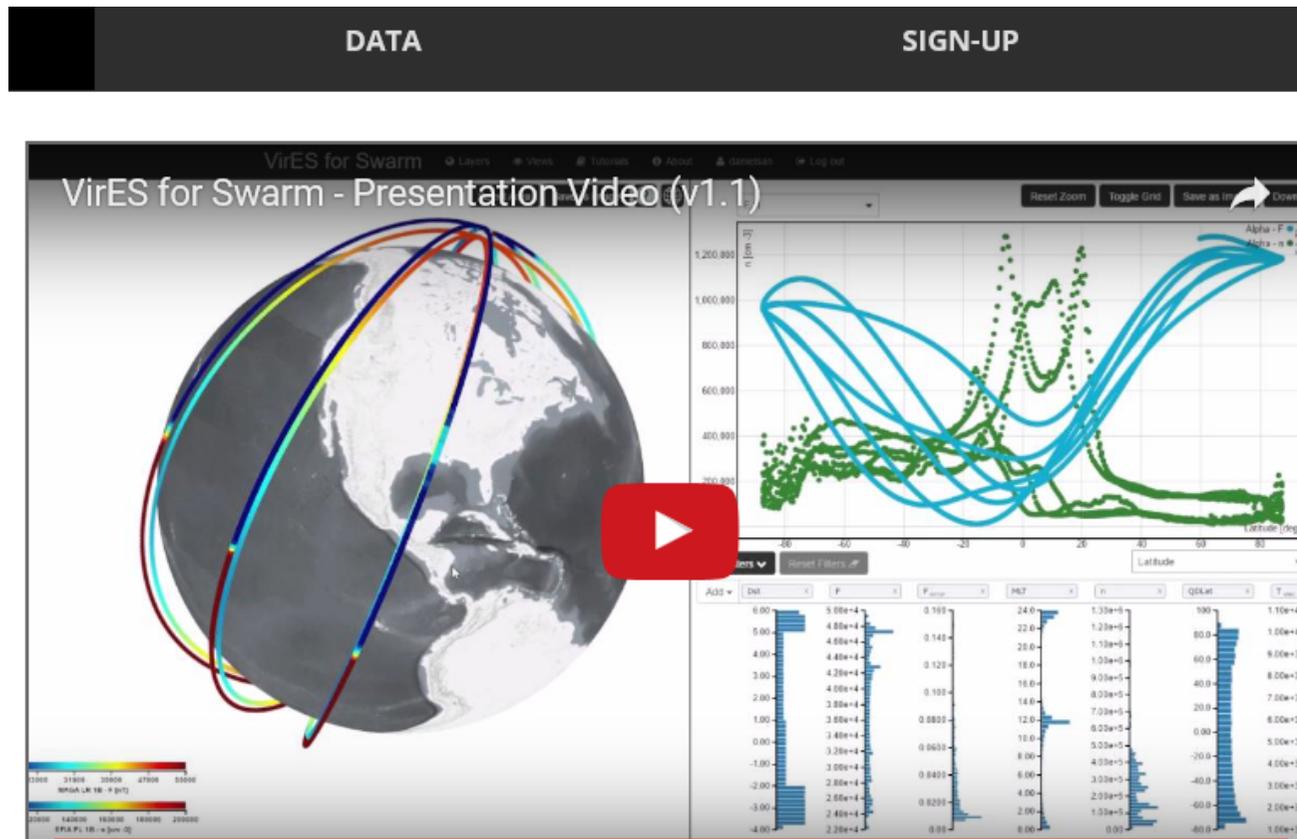


Цвет: радиальная компонента B_r , индуцированная океанским течением на высоте Swarth (460 км) и на уровне моря.
 Стрелки: скорость течения

E_r component at 430 km altitude due to M_2 tide (2yr SWARM data). Period: 12h 25m.



Интерфейс для визуализации, интерактивного анализа, отбора, фильтрации и скачивания данных Swarm [VirEs](#)



- Координаты
- Интенсивность и компоненты магнитного поля
- Электронная концентрация
- Продольные токи
- Экваториальное электрическое поле