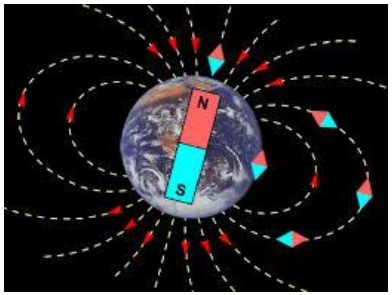


Магнитное поле Земли: источники, история, модели.

В. Г. Петров, ИЗМИРАН
Т. Н. Бондарь, ИЗМИРАН
vpetrov@izmiran.ru

Роль магнитного поля Земли

- **Возраст Земли - 4.5 млр. лет, геомагнитное поле прослеживается по крайней мере до 3 миллиардов лет назад.**
- **Магнитное поле влияет на**
  1) **химические и биологические процессы**
     - **Защита биосферы от энергичных частиц**
     - **протекание некоторых химических процессов**
     - **Клеточные процессы**
     - **Состояние человеческого организма**
     - **Миграционные процессы в животном мире**
  2) **Технические системы – GIC, спутники, связь**

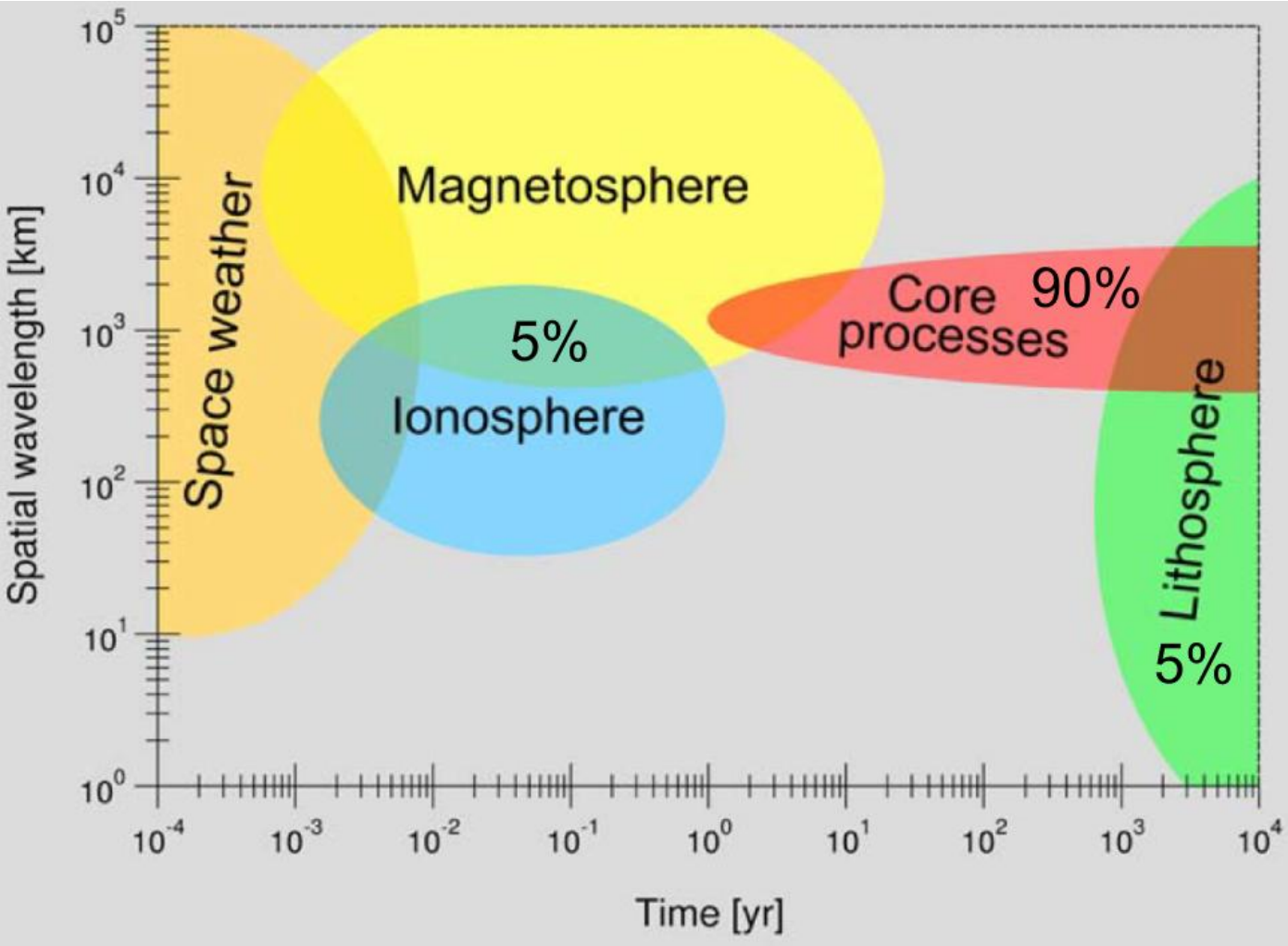
- **Магнитное поле применяется для:**
  - **1) исследования внутреннего строения Земли**
  - **2) исследования динамики континентов**
  - **3) морской, воздушной и наземной и подземной навигации**
  - **4) поиска полезных ископаемых – магниторазведка**
  - **5) исследования околоземного космического пространства**
  - **6) диагностики состояния космической погоды**
  - **7) как предвестники землетрясений ?**

- **К настоящему времени наука о земном магнетизме разделилась на две части. Одна изучает возникновение, основные черты и изменение магнитного поля, генерируемого процессами, происходящими внутри тела Земли, другая — относительно быстрые, но небольшие вариации поля, вызванные внешними причинами — процессами, происходящими в верхней атмосфере Земли и ее магнитосфере.**

- **Величина магнитного поля ~ 30000 -60000 нТл, годовое изменение ~ 10 нТл, вариации ~1000 нТл., необходима точность абсолютных измерений ~10^{-5} %.**
- **Вариации внешнего магнитного поля имеют величину ~1000 нТл, необходимая точность 0.1 нТл или ~ 10^{-2} %**

- **Началом науки о геомагнетизме принято считать установление факта, что ось магнитной стрелки компаса не совпадает с направлением географического меридиана (Колумб). В 1600 г. Гильберт предположил, что геомагнитное поле возникает вследствие того, что земной шар намагничен. Основы современного представления о магнитном поле Земли заложены в классических работах Симонова (1794–1855) и Гаусса (1777–1855).**
- **Основанием теории Гаусса является предположение о том, что магнитное поле Земли вызывается источниками, которые находятся внутри земного шара, поэтому *на поверхности Земли и вне ее поле имеет потенциальный характер,* т.е. магнитное поле Земли можно характеризовать скалярной величиной – магнитным потенциалом , зависящим от широты и долготы точки земной поверхности.**
-

Структура магнитного поля



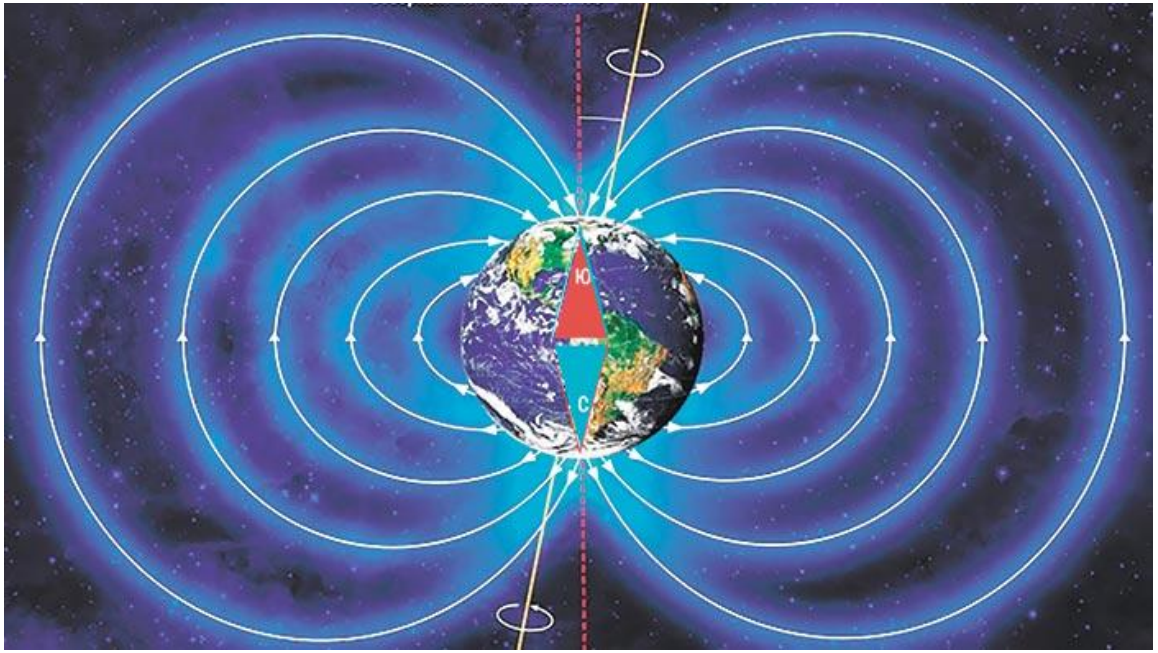
- Главное +Аномальное + Внешнее (ионосферное + магнитосферное) магнитное поле.

[Mioara MANDEA]

Схема дипольного магнитного поля Земли

Ось вращения Земли **R = 6371 км**

Магнитный момент Земли
$M_З$ = 7.7 10^{22} А*м^2 = 7.7 10^{25} ед. СГС



Ось магнитного диполя наклонена под углом 9,5 градусов к оси вращения Земли.

$$T = (M/r^3)[1+3\cos^2\Theta]^{1/2}$$
$$H = (M/r^3)\sin\Theta$$
$$Z = (2M/r^3)\cos\Theta$$
$$\Theta = (90-\phi)$$

ф – магнитная широта

— географические координаты северного геомагнитного полюса, равны, соответственно, 11.30° и -70.60°

Существенно лучшее описание дает диполь , смещенный на примерно 550 км в направлении точки с координатами 20° N 150° E и это смещение все время возрастает.

Вектор индукции магнитного поля вблизи Земли может быть представлен градиентом некоторой скалярной функции **V.** Для среды, в которой отсутствует электрическая проводимость, значение U должно удовлетворять уравнению Лапласа: $\nabla^2 V=0$

$$V(r,\theta,\phi,t) = a\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1}$$

$$\times\left[g_n^m(t)\cos(m\phi) + h_n^m(t)\sin(m\phi)\,P_n^m(\cos\theta)\right]$$

$$g_n^m(t) = g_n^m(T_0) + \dot{g}_n^m(T_0).(t - T_0)$$

$$X = \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial\theta}, \quad Y = -\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial V}{\partial\phi}, \quad Z = \frac{\partial V}{\partial r}$$

Минимизируя разность измеренных значений поля и вычисленных по моделям $\Sigma(Xi-Xm)^2$ находят набор гармонических коэффициентов g и h

Существующие модели магнитного поля

- IGRF 1900.0 - 2020.0 – усредненная модель нескольких независимых разработчиков, вкл. ИЗМИРАН https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf12.f, http://serv.izmiran.ru/cgi-bin/igrf-12a.py
- Степень N=13, 195 коэф, вековой ход N=8, 80 коэф.
- ГОСТ 25645.126-85 поле внутриземных источников h=100-40000 км

WMM N=12, стандарт для DoD, NATO, IHO

POMME-10 N=133 h=0-2000 км,

параметры Est/Ist (~Dst), IMF, F10.7
http://geomag.org/models/Pomme10/POMME10_2016-04-16.tar.gz -

EMM-2017 N=720 гармоник, SWARM+EMAG

Комерческие:

BGGM N=50

HDGM, HDGM-RT N=720

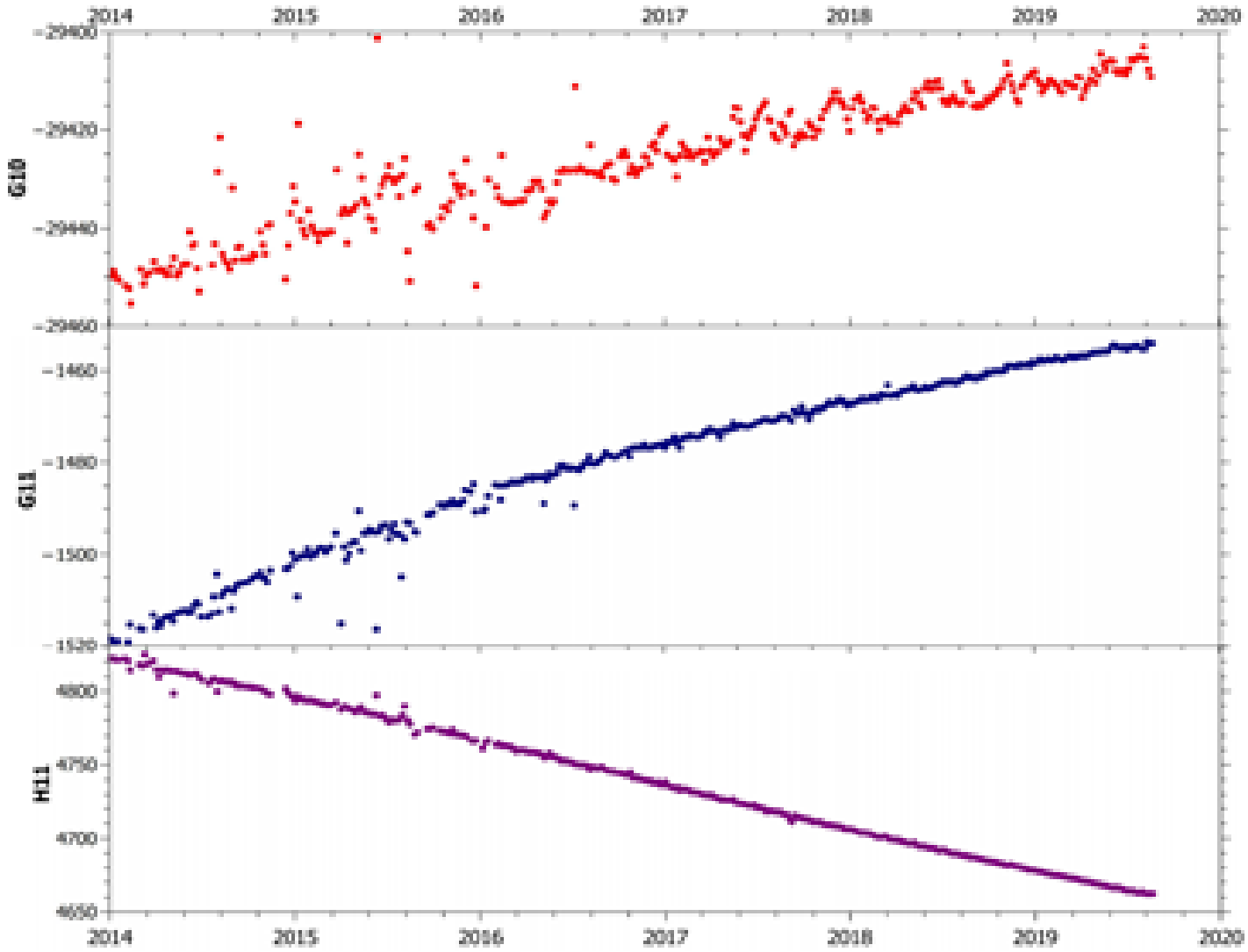
Точность 2015 г. среднеквадратичное отклонение D по сети Intermagnet
IGRF, WMM - 1.05^{O} EMM – 1.01^{O}

1 Неравномерность покрытия – обычно вес ~ cos(широты), мы использовали разбивку на сетку равной площади по широте 6°, по долготе от 6 до 120° и медианный фильтр. Покрытие > 95%. Иногда выбрасывают высокие и низкие широты.

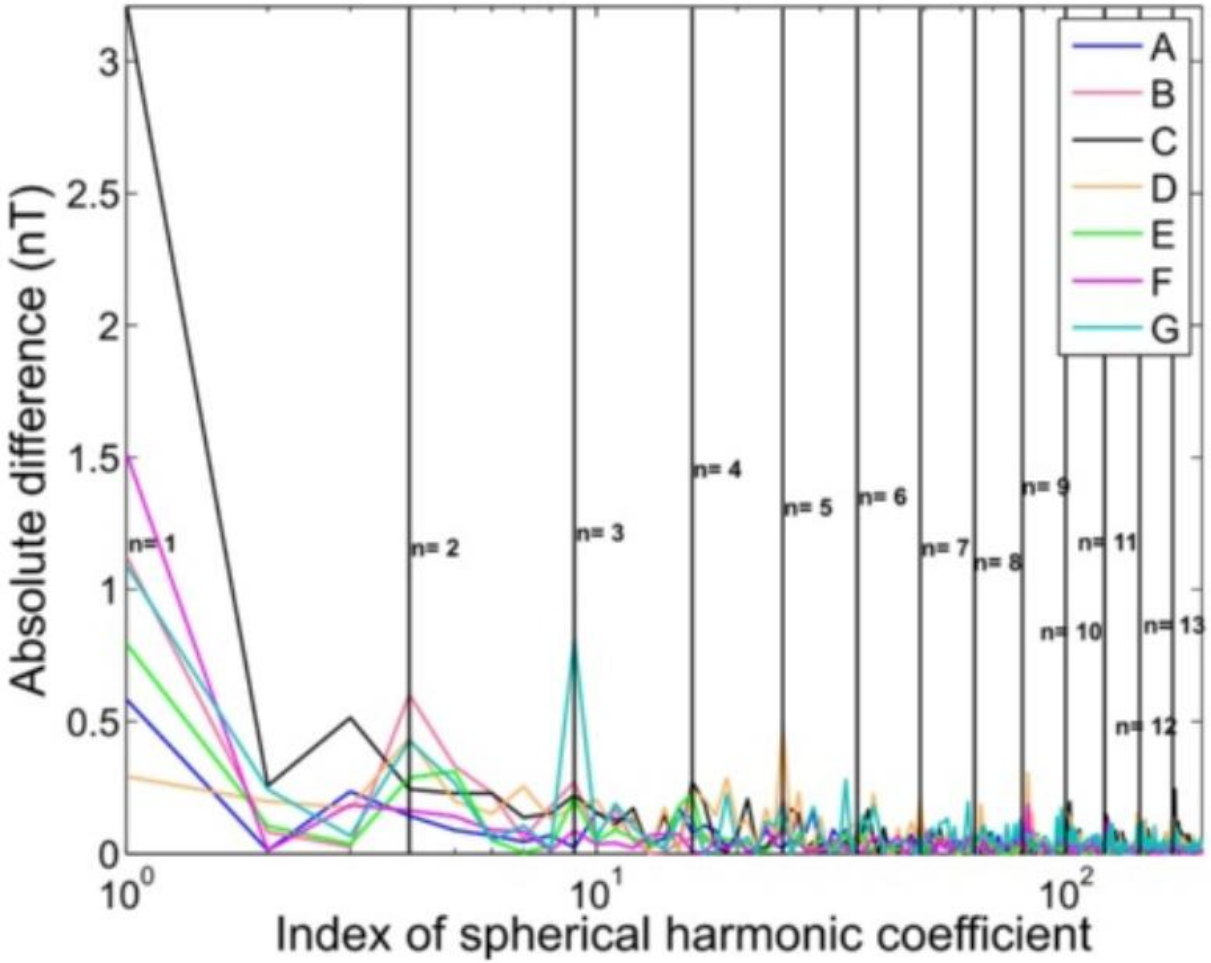
Изменчивость – выборка по коротким интервалам от 1 дня, мы использовали 10. Можно ввести производные в условия минимизации, тогда интервал можно выбрать больше, но и неизвестных тоже больше (195+80).

Спокойные условия: q-дни, индексы Kp<, AE<, Dst<, F10.2, ночные часы. Мы Kp 1+, AE<100, Dst<50, dDst<20, освещенная сторона использовалась

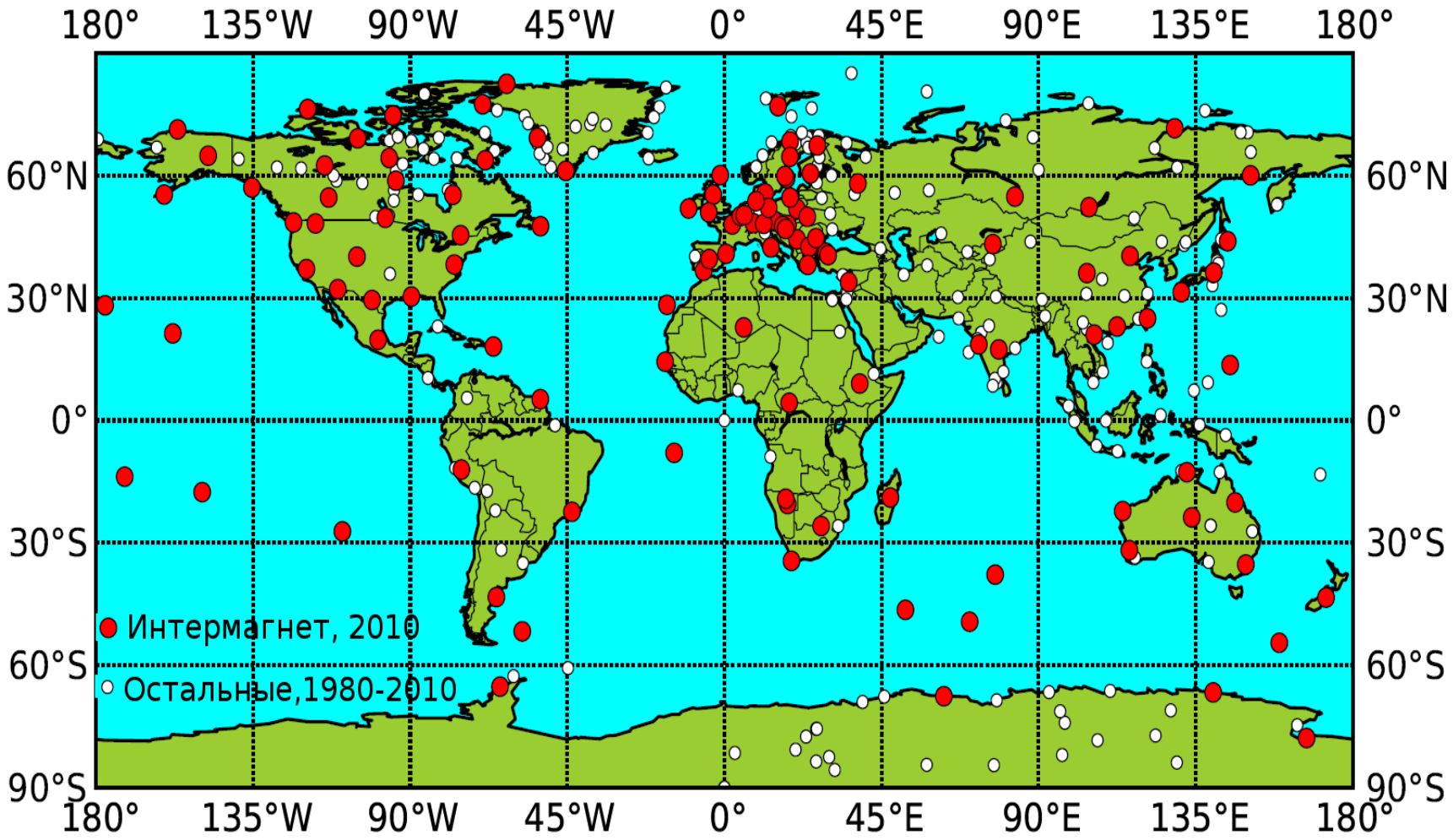
Данные обсерваторий и пунктов векового хода.



Изменение гармонических коэффициентов модели магнитного поля G10, G11, H11 за период январь 2014 – август 2019 по данным спутников SWARM.



Абсолютное значение отклонений коэффициентов моделей от среднего по всем моделям



Проект Intermagnet, с 1991 г.

до 110 обсерваторий, до 50 почти в реальном времени

Модели внешнего магнитного поля

Mead-Fairfield 1975, учитывает наклон диполя

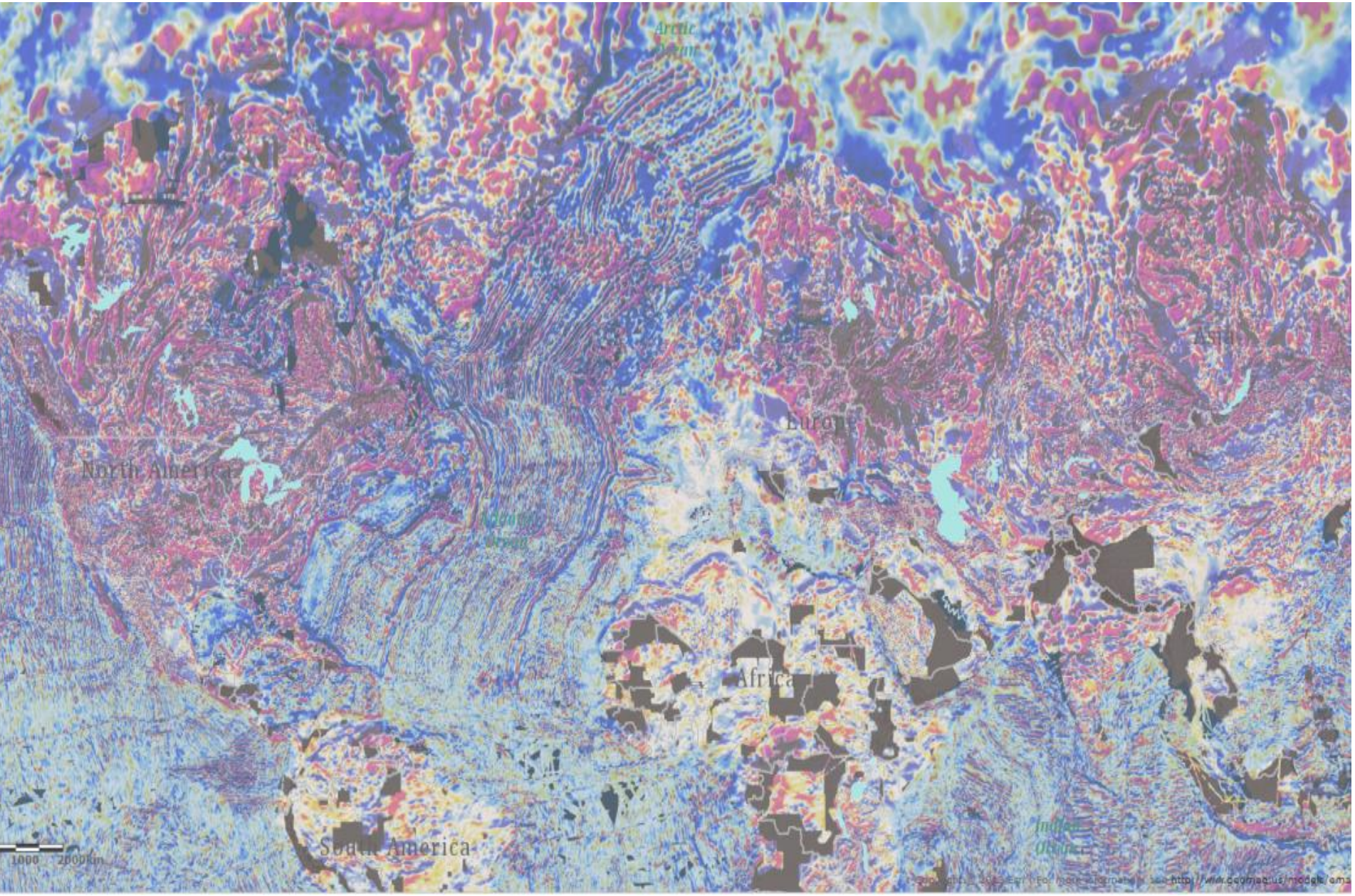
$$\vec{B} = \vec{B}_{\mathrm{int}} + \vec{B}_{\mathrm{CF}} + \vec{B}_{\mathrm{t}} + \vec{B}_{\mathrm{r}} + \vec{B}_{\mathrm{fac}}$$

Tsyganenko 1987, 89, 96, 01, 04

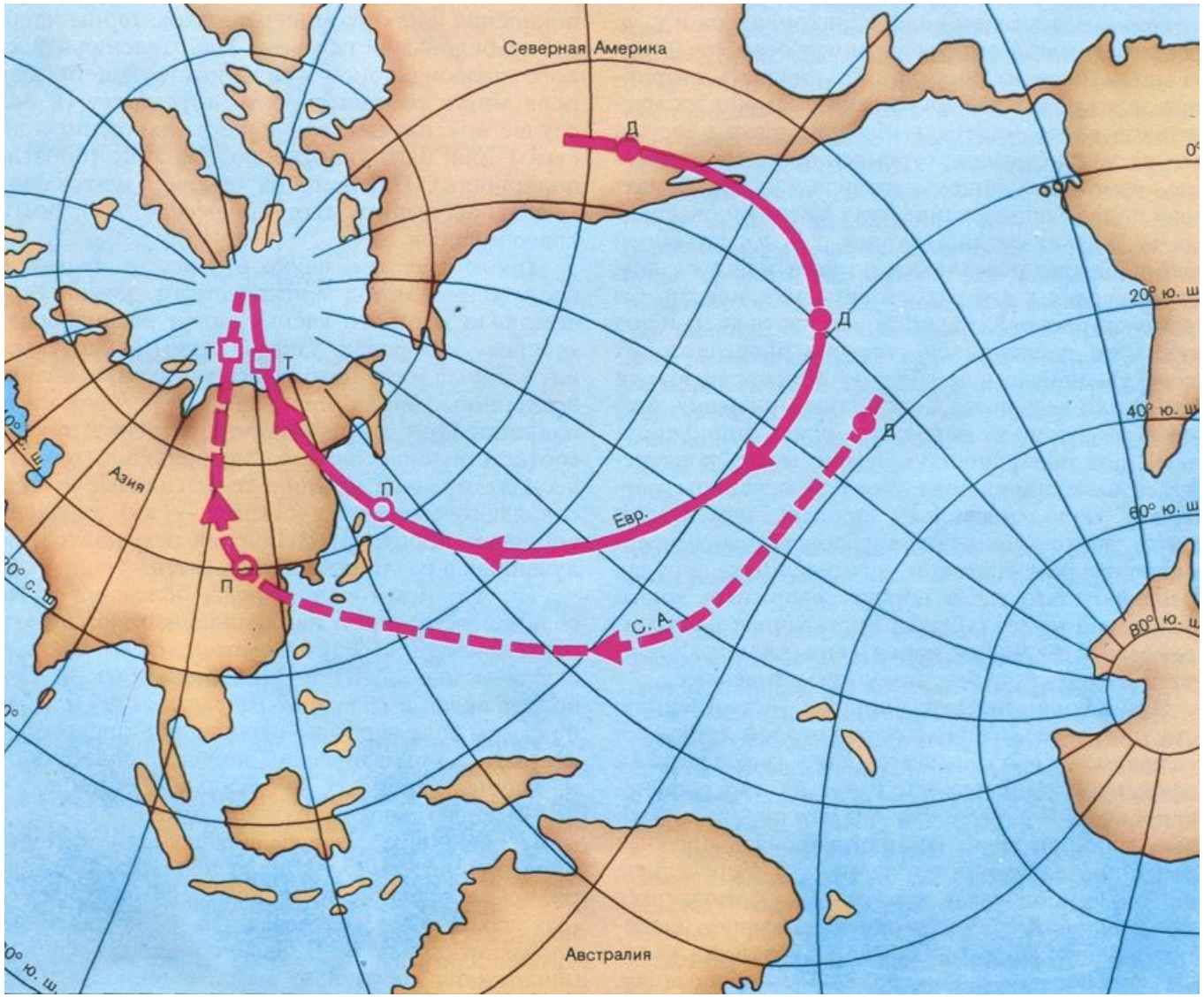
Эмпирическая модель по большому набору спутниковых измерений, моделирует кольцевой ток, ток хвоста, магнитопаузу, продольные токи. Параметры Кр, Dst, солнечный ветер.

Параболическая модель Алексеева 1987,2000

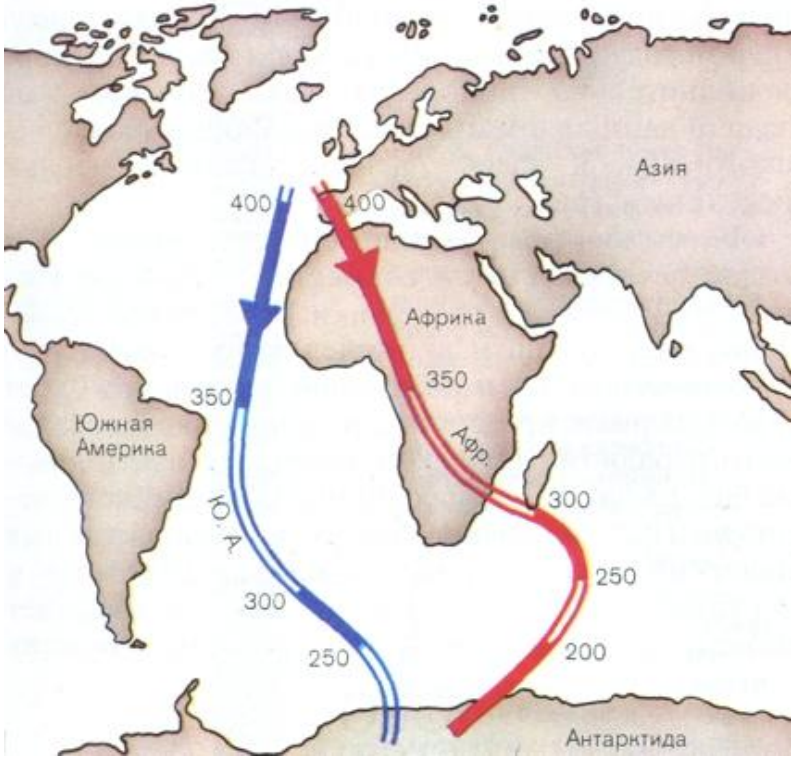
Полуэмпирическая модель. Магнитопауза моделируется параболой. Скалярный потенциал от источников раскладывается по функциям Бесселя.

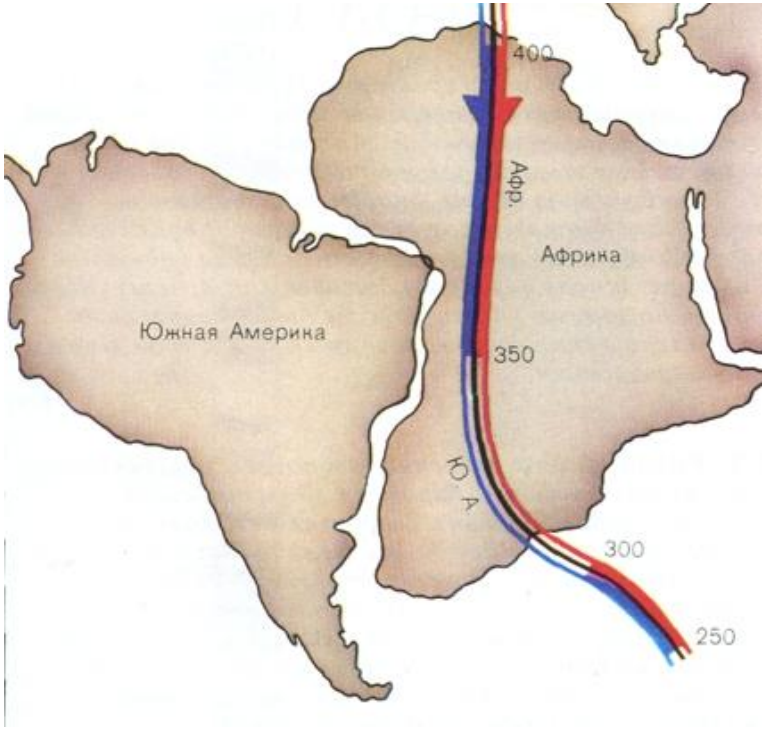


Карта аномального магнитного поля Земли, - синий цвет, + красный



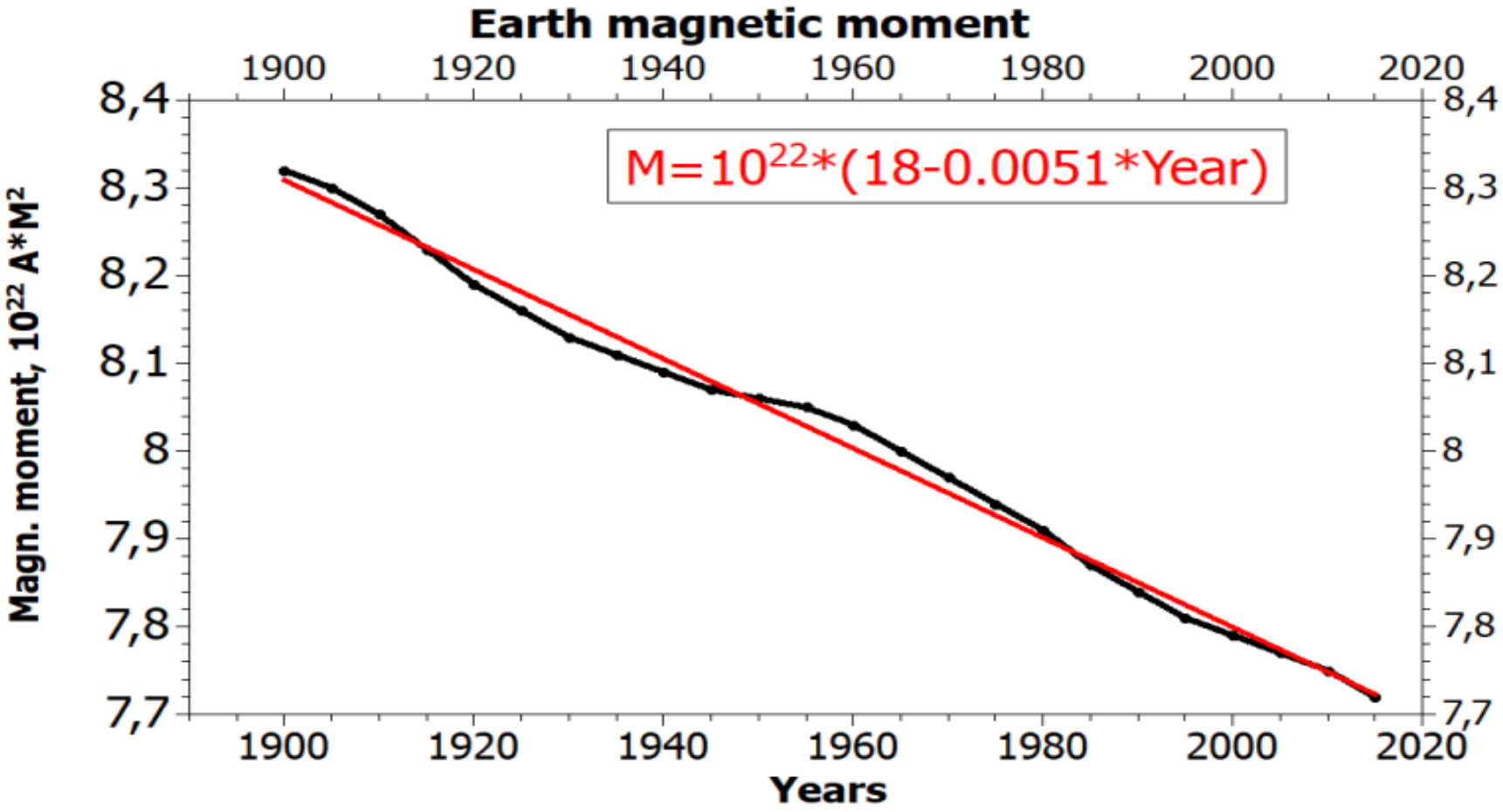
Кривые кажущегося движения полюса за последние 600 млн. лет по европейским (Евр.) и североамериканским (С. Л.) данным



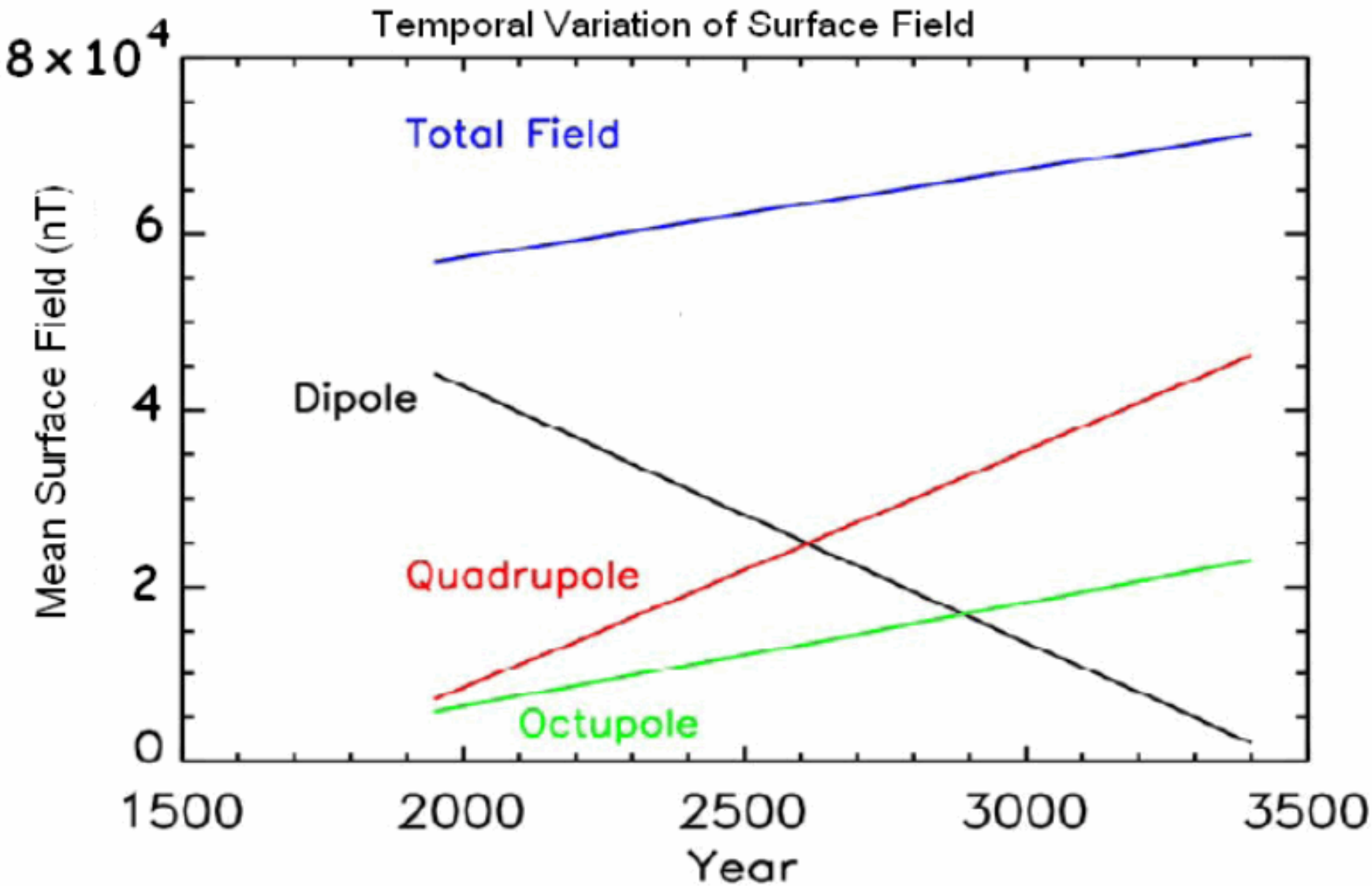


Кривые кажущегося движения полюса по африканским (Афр.) и южноамериканским (Ю. А.) данным

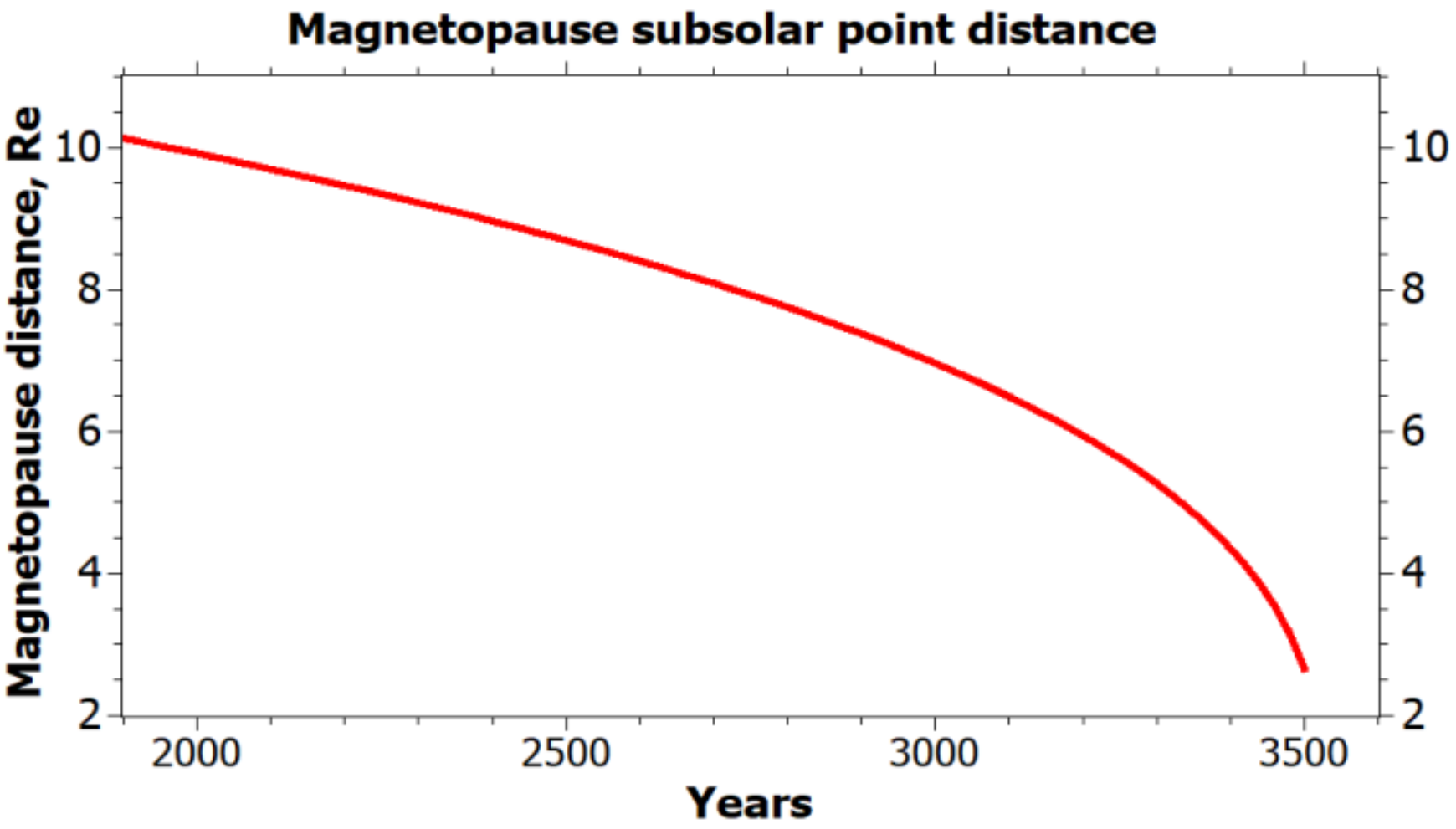
Совпадение кривых кажущегося движения полюса на интервале времени 400--250 млн. лет назад при сдвиге африканского и южноамериканского континентов



Линейное уменьшение наблюдается, по крайней мере, с 1850 г. (модель GUFM) , а косвенные данные показывают, что уменьшение длится уже около 2.5 тысячи лет. Момент станет нулевым примерно в 3500 г.

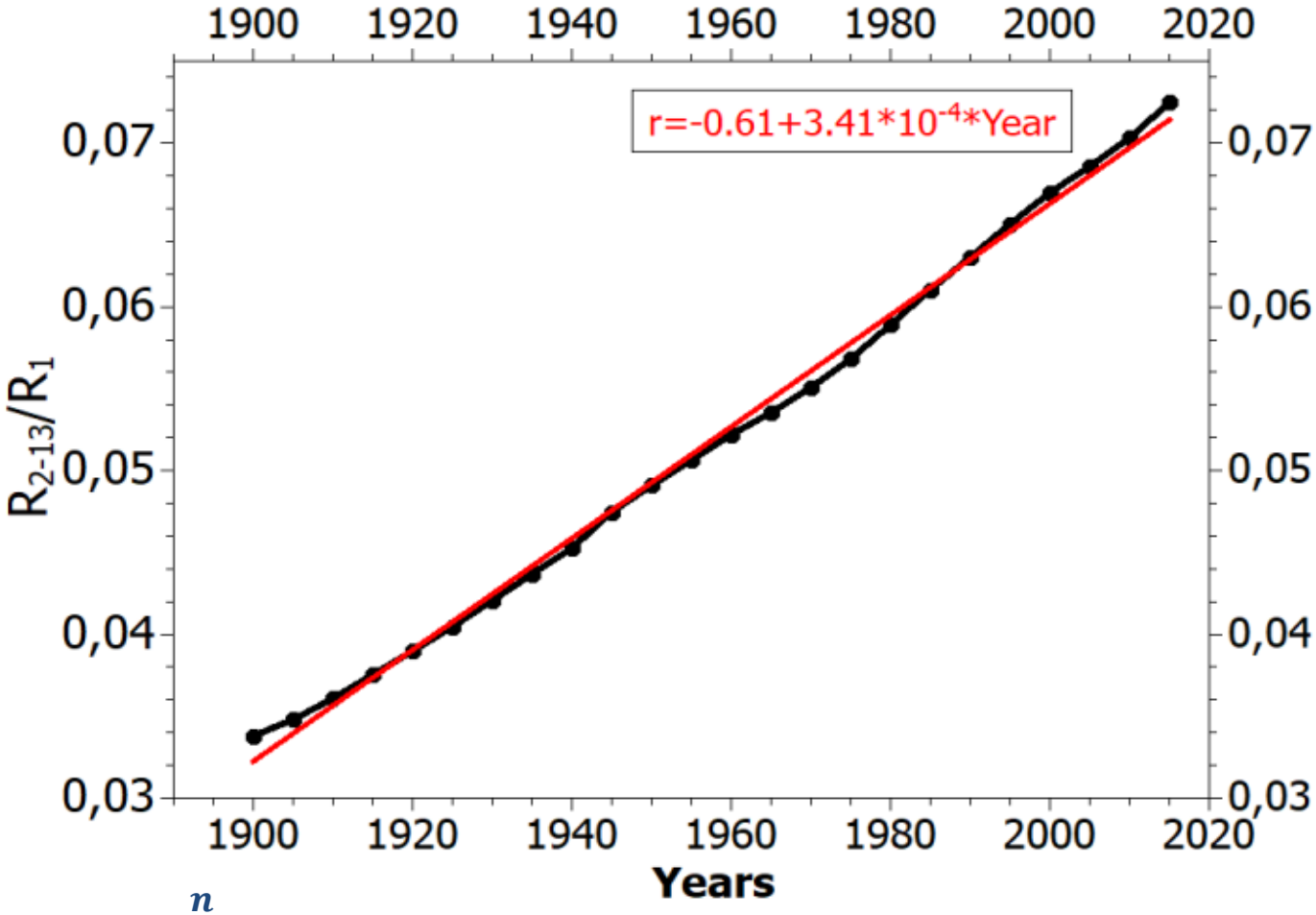

Temporal Variation of Surface Field
8 x 10^4
6
4
2
0
Mean Surface Field (nT)
Total Field
Dipole
Quadrupole
Octupole
1500
2000
2500
3000
3500
Year

[Glatzmaier]



Через 1200-1300 лет геостационарная орбита окажется в солнечном ветре

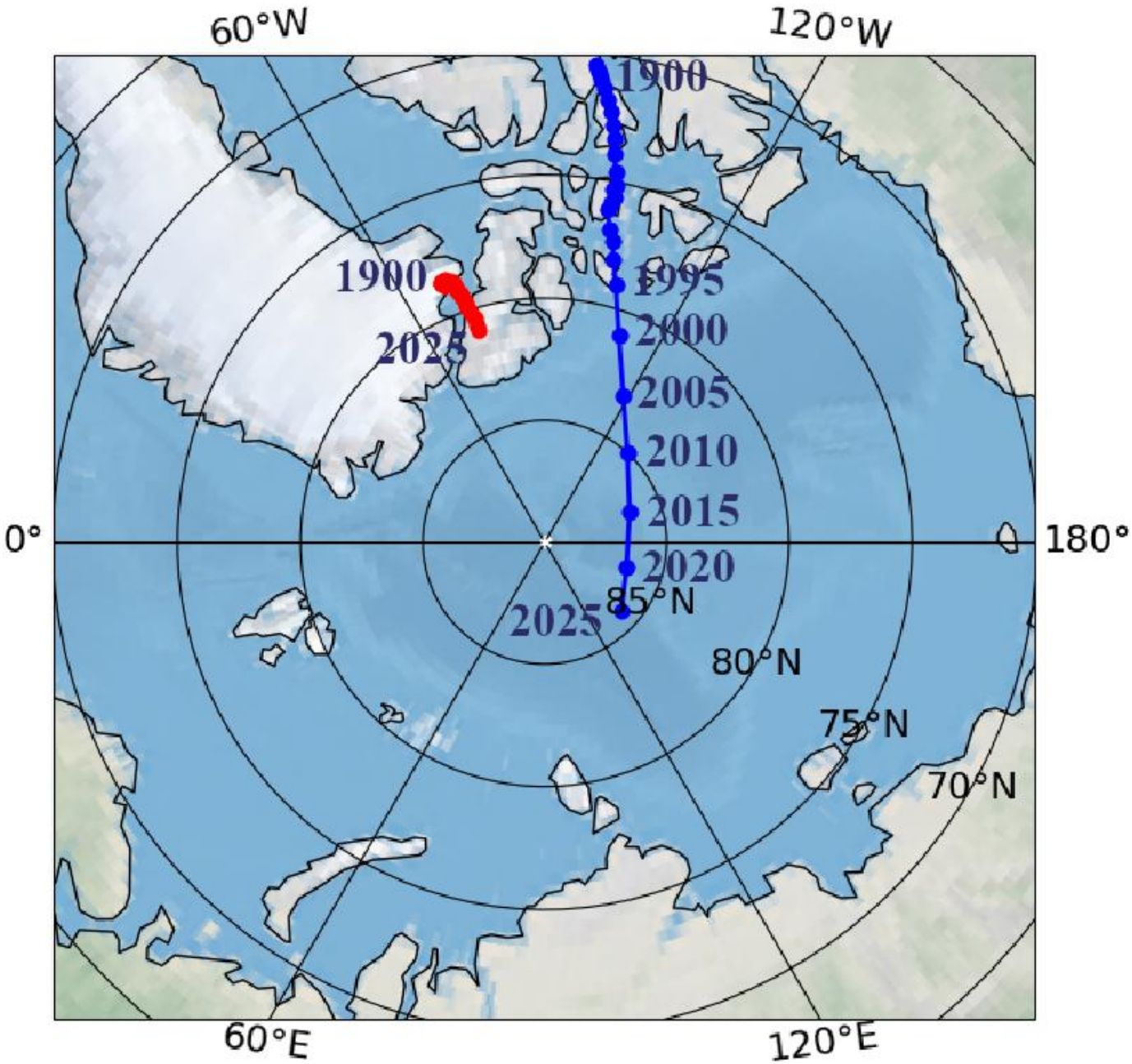
Отношение суммарной мощности мультипольных членов модели IGRF к дипольному члену



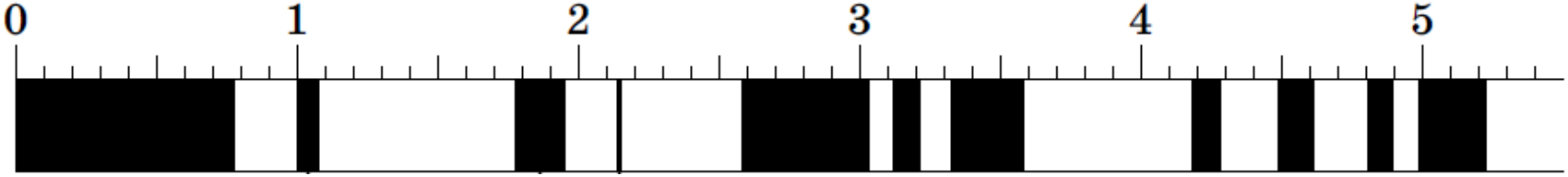
$$R_n = (n+1)\sum_{m=0}^{n}\left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2\right]$$

Энергетический спектр магнитного поля

Смещения магнитного и геомагнитного полюсов



- Эволюция магнитного поля Земли



- Инверсии дипольного момента Земли, млн лет назад

За последние 80 млн лет средний интервал между сменами полярности примерно 450 тыс. лет

Экскурсы – кратковременное уменьшение поля.

События озера Моно, 34 т. лет назад

Событие Лашамп, 41 т. лет назад, длилось 440 лет, интенсивность магнитного поля при этом снизилась на 75 %.

Норвежско-Гренландский 70 т. лет назад

Процесс переполюсовки длится от 2 до 12 тыс. лет

- **О возможных последствиях смены геомагнитных полюсов идет широкая дискуссия. Оптимисты ссылаются на тот факт, что в геологической истории Земли произошли сотни инверсий, однако не удалось установить связь массовых вымираний и природных катастроф с этими событиями. Биосфера обладает значительными способностями к адаптации, а процесс инверсии может длиться довольно долго.**
- **Пессимисты не исключает того, что инверсия может произойти при жизни ближайших поколений и окажется катастрофой для человеческой цивилизации. В частности, несколько лет назад канадский научно-популярный журнал "Discovery magazine" составил список из двадцати наибольших опасностей, где инверсия значится под шестым номером.**
- **Показано, что в период инверсии поток высокоэнергичных частиц может возрасти не более, чем в три раза, а уровень радиации опасность не превысит предельно допустимой дозы./ Царева О.О, Зеленый Л.М. и др/**

- **Так, первые человекообразные обезьяны появились на разных континентах около 12-25 млн. лет назад, человек изготовлявший орудия труда – 3–2 млн. лет назад, а современный человек – 100–250 тыс. лет назад. Событие Лашамп, 41 т. лет назад, длилось 440 лет**.
- **Возможно, инверсия магнитного поля Земли окажет большее влияние на технические системы, но у человечества еще есть время подготовиться.**
- **6 тыс. лет назад магнитный момент составлял 0.4 современного, 2.5 тыс. лет назад – 2.5 современного значения**

Спасибо за внимание!