

III Всероссийская научная конференция с международным участием
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»
Москва, 26 - 25 октября 2023 г.

Электромагнитные триггерные эффекты в системе "ионосфера-атмосфера-литосфера" и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений

Новиков В.А.¹, Сорокин В.М.²
novikov@ihed.ras.ru, sova@izmiran.ru

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова



Электромагнитная инициированная сейсмичность

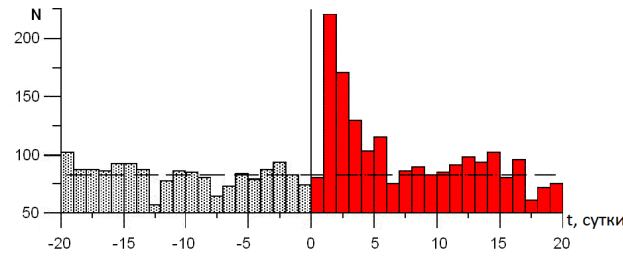
Полевые наблюдения

МГД – Гарм

(Тарасов, 1995)

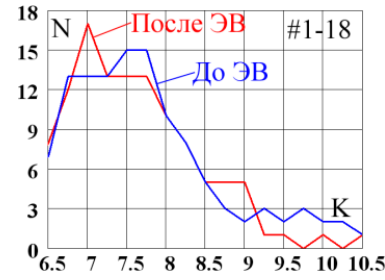
МГД – БГП

(Тарасов и др., 2001)



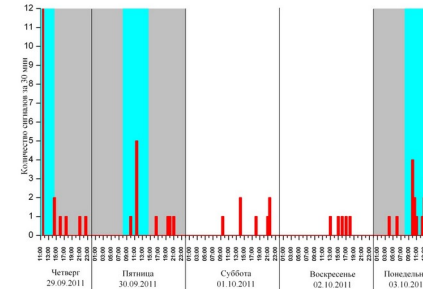
ЭРГУ – БГП

(Сычев, 2009)



ЭРГУ – ГАЭ

(Закупин и др., 2011)

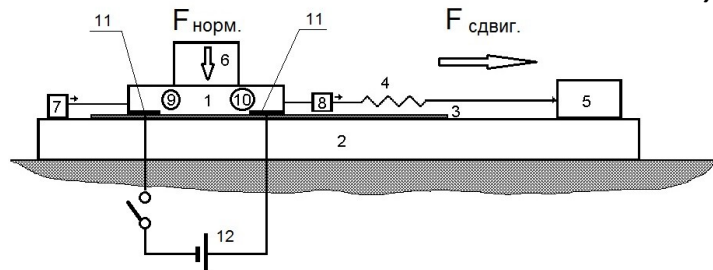


ЭРГУ – МС

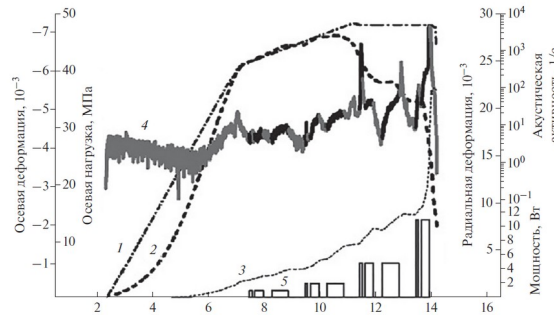
(Брагин и др., 2012)

Лабораторные эксперименты

(Соболев, Пономарев, 2001)

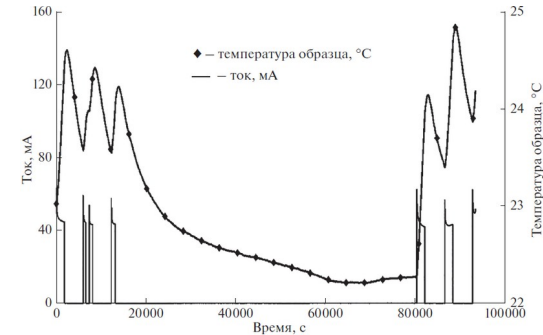


(Богомолов и др., 2002-2010)

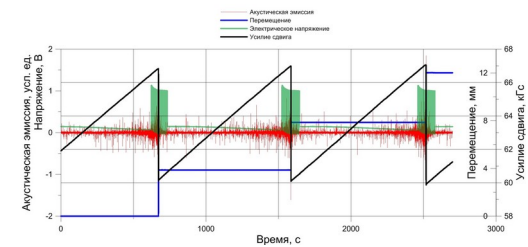


(Лапшин и др., 2016)

(Мубассарова и др., 2014)



(Зейгарник и др., 2018)



(Novikov et al, 2017)

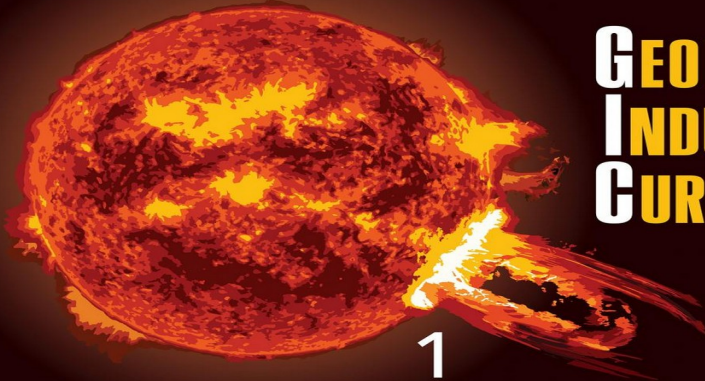
Зейгарник и др. Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (обзор), Физика Земли, 2022

Геомагнитно-индуцированные токи в элементах инфраструктуры и проводящих разломах земной коры

National Aeronautics and Space Administration

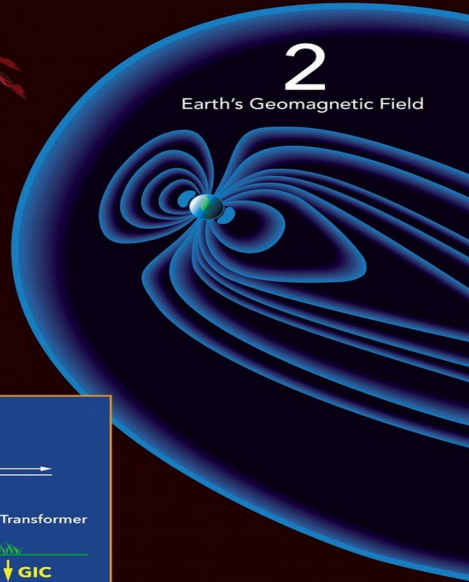


GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS

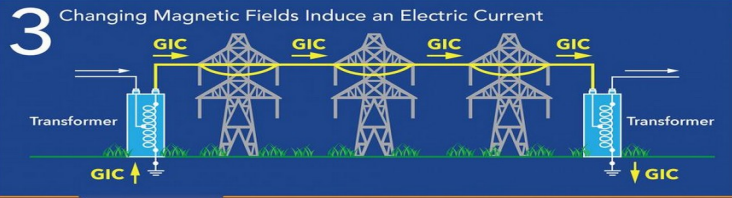


1
Coronal Mass Ejection (CME)

Geomagnetically Induced Currents (GICs) can result from geomagnetic storms—a type of space weather event in which Earth's magnetic field is rattled by incoming magnetic solar material. Most GICs are triggered by coronal mass ejections (1), or CMEs, which interact with the magnetic field around Earth (2) and cause it to rattle. The quick-changing magnetic fields create GICs through a process called electromagnetic induction (3). GICs can flow through railroad tracks, underground pipelines, and power grids. In extreme cases, they can cause blackouts.



2
Earth's Geomagnetic Field

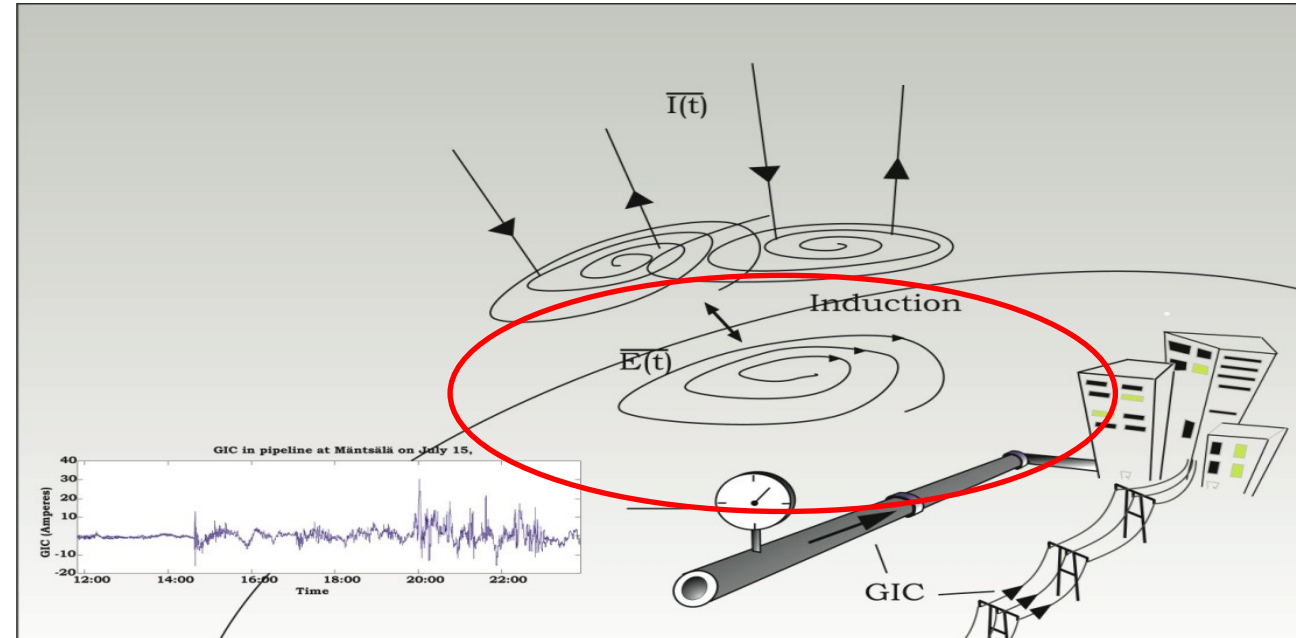
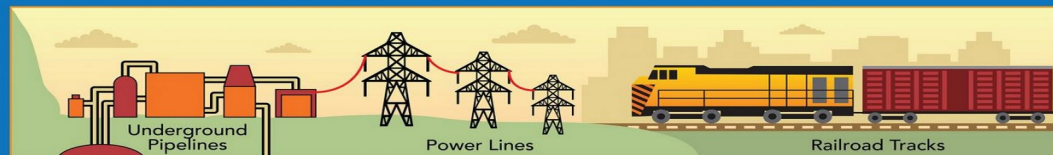


3 Changing Magnetic Fields Induce an Electric Current

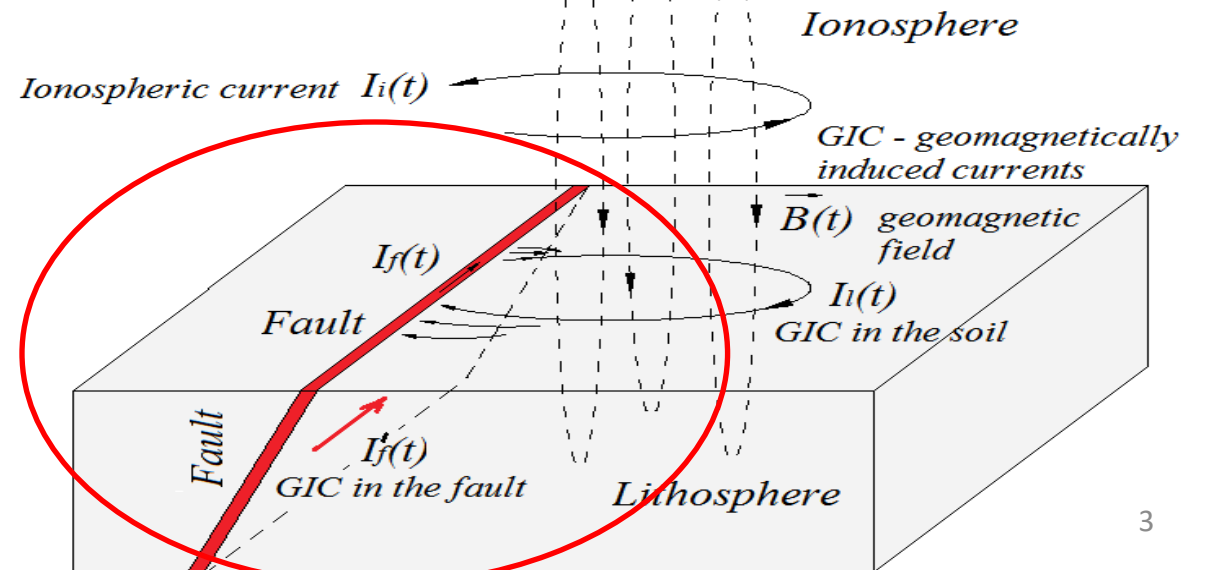
WHAT IS THE IMPACT?

Though widespread permanent damage to power systems is unlikely, extreme storms can cause blackouts over extended areas. That's why NASA and other federal agencies work with the power and insurance industries to develop plans and standards for dealing with GICs.

GICs CAN RUN THROUGH ANY LONG METAL STRUCTURE

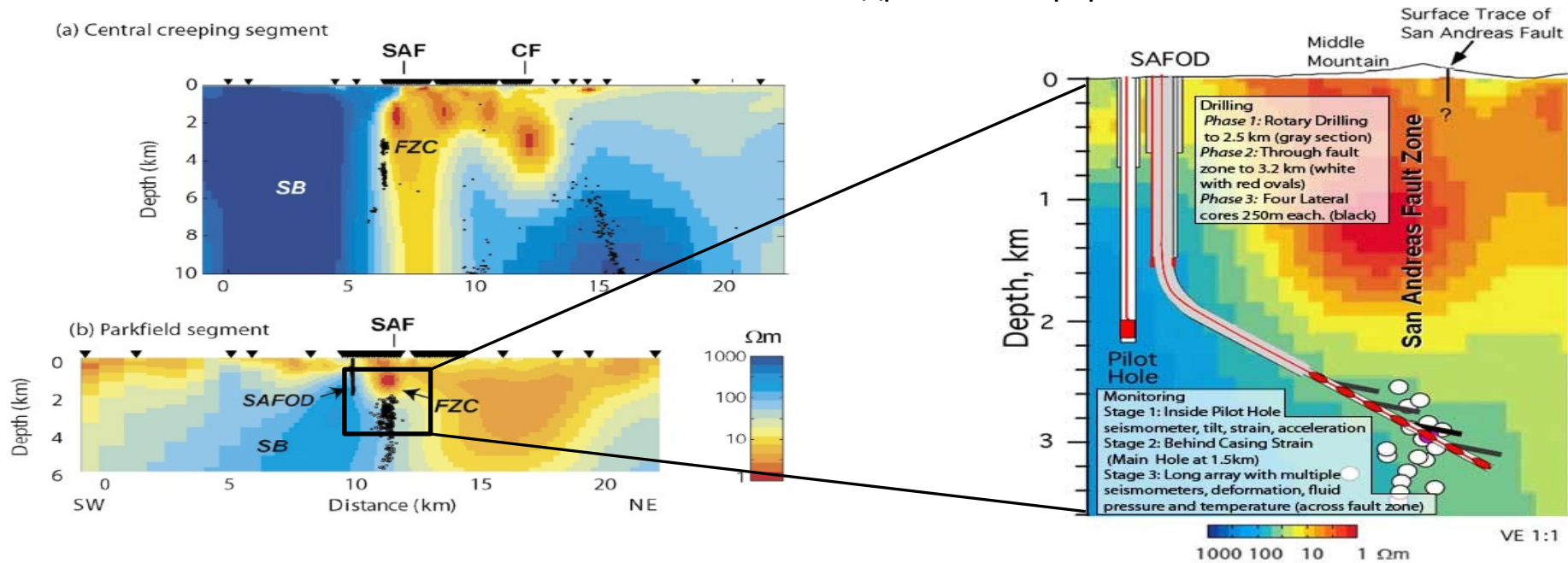


Generation of geomagnetically induced currents in lithosphere and conductive fault

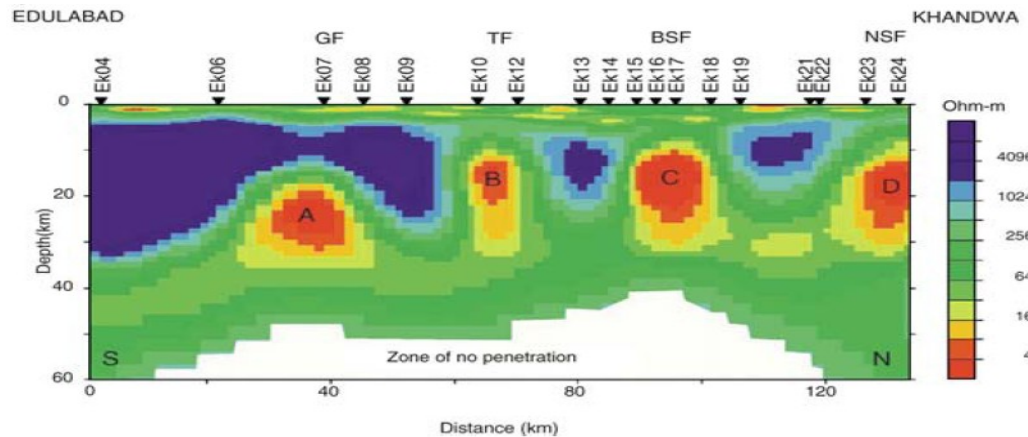


Удельные электрические сопротивления разломов

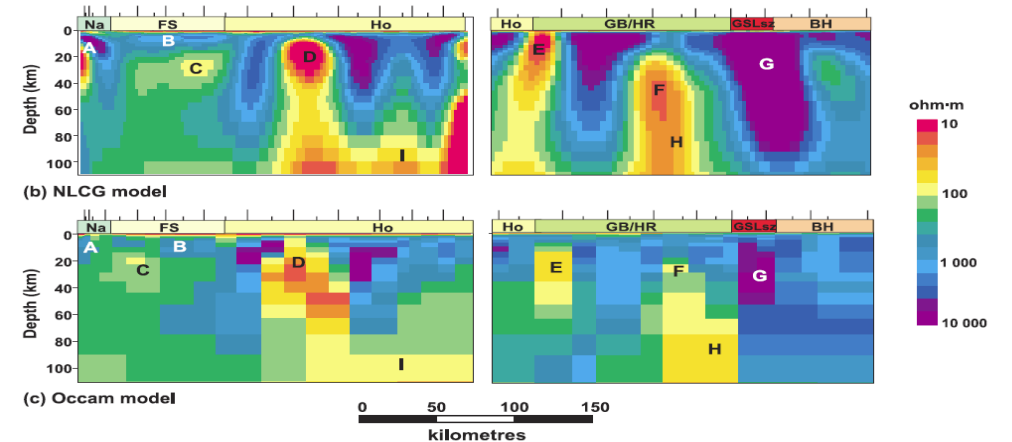
Разлом Сан-Андреас, Калифорния



2-D electrical resistivity depth section along Edulabad–Khandwa south–north profile. GF: Gavligarh fault, TF: Tapti fault, BSF: Barawani–Sukta fault, NSF: Narmada south fault



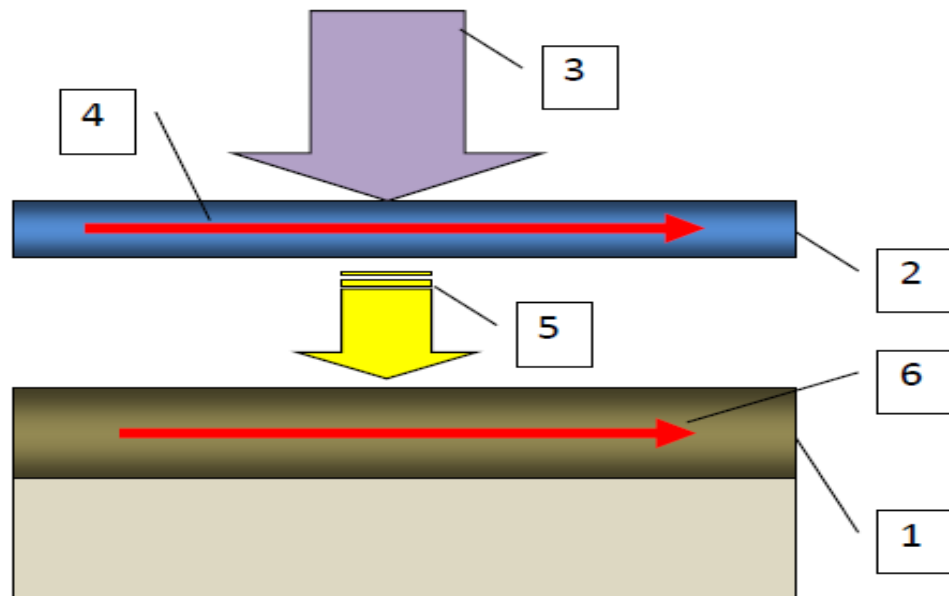
The Great Slave Lake (GSL) shear zone, Canada



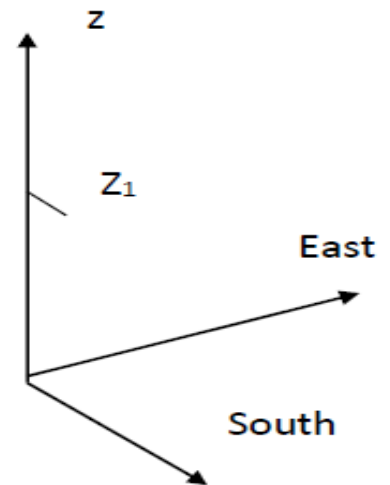
Теоретическая модель (Sorokin et al, 2019, Earthquake Science; 2023, Atmosphere)

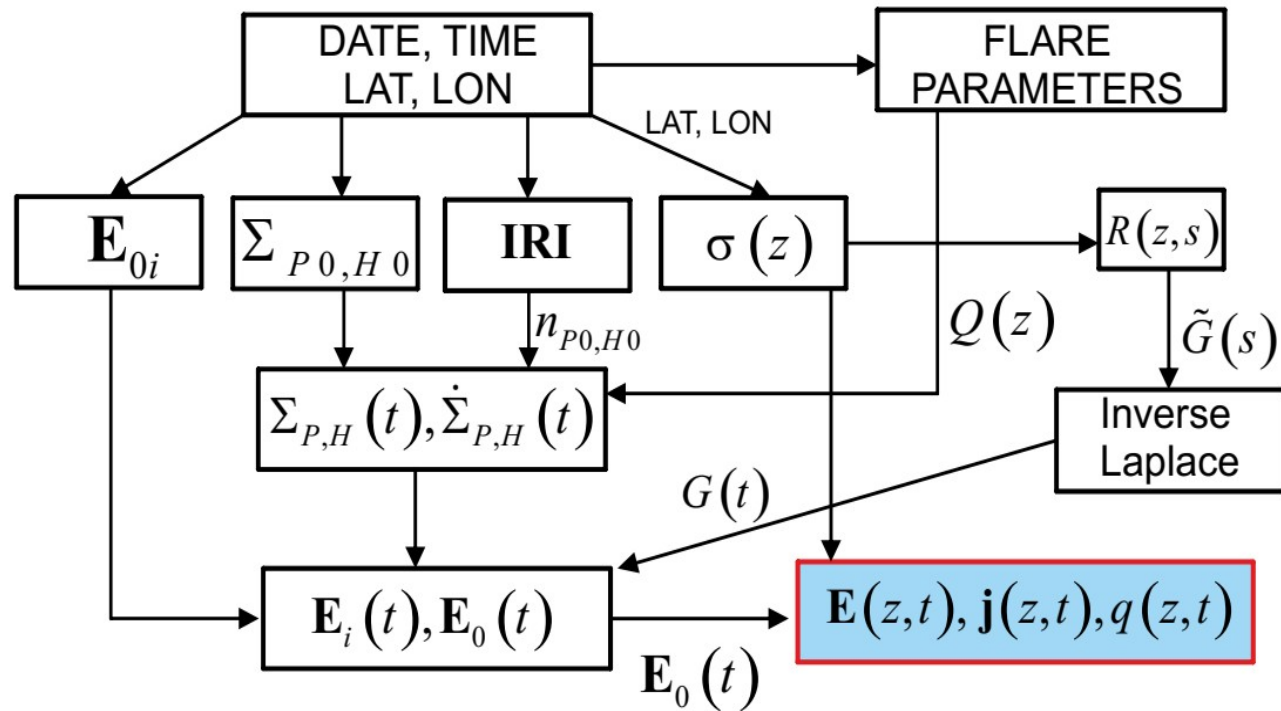
Рассмотрен механизм, в котором резонатор Земля – ионосфера формирует колебания геомагнитного поля с периодами (1 – 100) с в процессе ионизации ионосферы излучением солнечной вспышки с коротким фронтом нарастания ее амплитуды, а также проникновения поля и тока в литосферу с конечной проводимостью и ее нагрев.

Горизонтальный масштаб области проводимости, возмущенной солнечной вспышкой, порядка земного радиуса, а вертикальный масштаб - порядка толщины ионосферы. За характерный период изменения поля ионосферные токи и поля диффундируют в горизонтальном направлении на расстояние много меньше горизонтального масштаба.



1. Conducting layer of the ground.
2. Conducting layer of the ionosphere
3. X-rays of the solar flares.
4. Electric field in the ionosphere.
5. Geomagnetic pulsations.



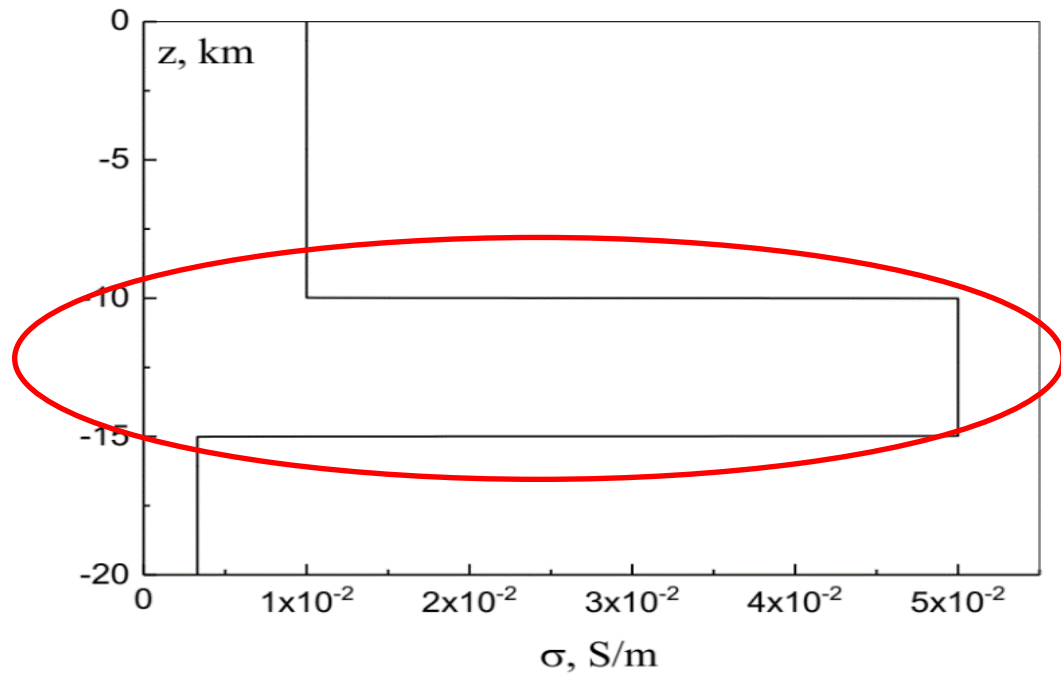


Расчёт выполнен на разработанном программном комплексе, состоящем из нескольких связанных в единое целое частей:

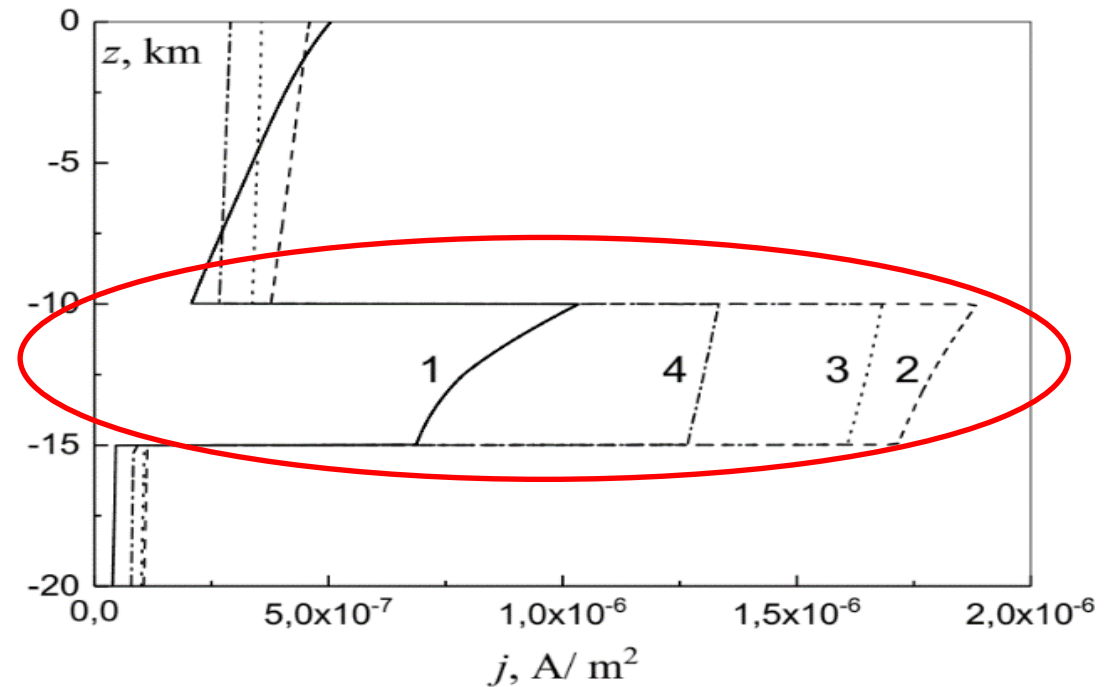
1. Программная библиотека IGRF (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>);
2. Программная библиотека IRI (<http://irimodel.org/IRI-2016/>);
3. Программа написанная на языке C++ по блок-схеме, представленной на рис.9;
4. Внешний программный модуль, написанный в системе Вольфрам Математика (<https://www.wolfram.com/mathematica/>).

Программа начинает свою работу при получении следующих исходных данных: даты, времени и мощности солнечной вспышки. Исходя из этого программа вычисляет подсолнечную точку, и фоновые параметры ионосферы на высотах 100 и 140 км, проводимости Педерсена и Холла, а также строит модель электрического поля планеты по Вolland [Volland, 1973, 1975, 1978]. По модели IGRF (Международное опорное геомагнитное поле), которое представляет собой серию математических моделей основного поля Земли и его годовой скорости изменения (вековой ход) вычисляются основные параметры магнитного поля на указанный момент времени. Далее, по модели IRI (Международная эталонная ионосфера) вычисляются плотность электронов, температура электронов, температура ионов, ионный состав (O^+ , N^+ , He^+ , N^+ , NO^+ , O^{+2} , кластерные ионы), экваториальный вертикальный дрейф ионов, вертикальное содержание электронов в ионосфере, вероятность F1, вероятность распространения F, границы полярных сияний, влияние ионосферных бурь на пиковые плотности F и E. Затем по профилю проводимости Земли в подсолнечной области вычисляются поверхностные токи проводимости, и на основании этих расчётов строится профиль токов по глубине.

Численные оценки генерации всплеска теллурических токов в литосфере вследствие солнечных вспышек



Проводимость земной коры

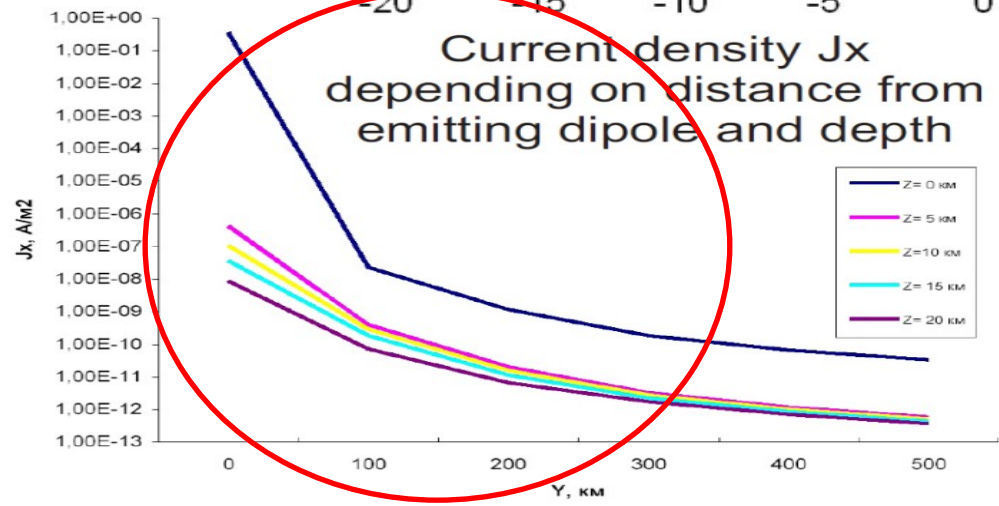
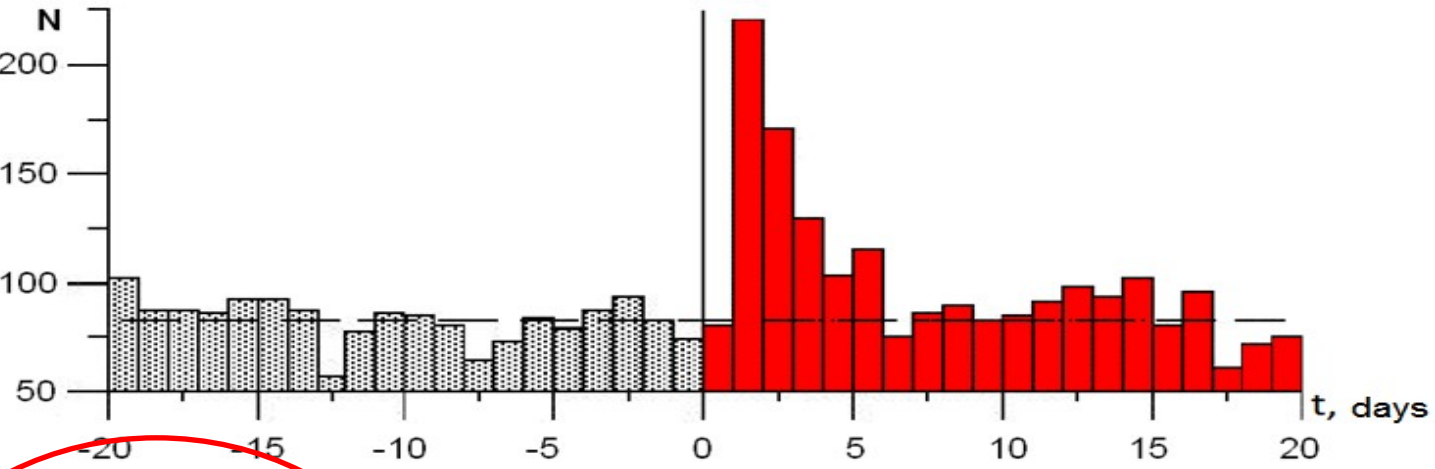
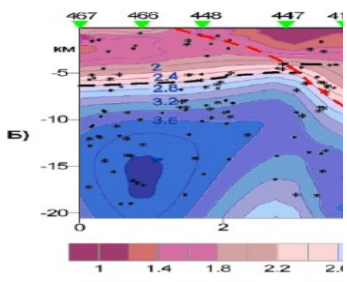
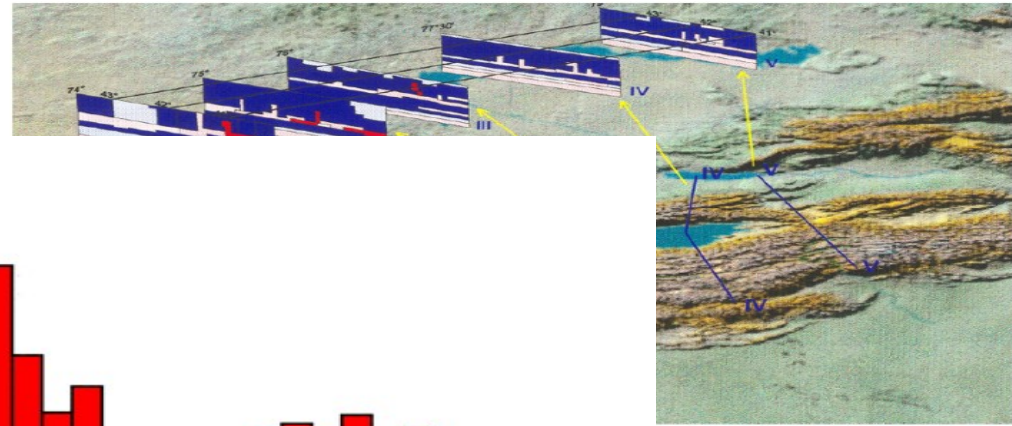
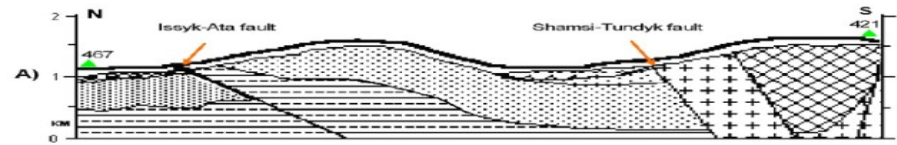


Плотность тока, генерируемого солнечной вспышкой в земной коре для различных времен (1 – 5 с, 2 – 10 с, 3 – 15 с; 4 – 20 с)

Результаты численного анализа (*Sorokin et al, 2022, Atmosphere*)

- Солнечные вспышки генерируют теллурические токи сопоставимые с токами от искусственных импульсных источников.
- Характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы и в зависимости от их соотношения может наблюдаться осциллирующий или апериодический режимы магнитных возмущений.
- Амплитуда пульсаций может достигать $\sim 10^2$ нТл.
- Амплитуда горизонтальной компоненты электрического поля на поверхности Земли может достигать 0,01 мВ/м.
- Плотность электрического тока в литосфере достигает 10^{-6} А/м².
- Плотность мощности выделения тепла этим током достигает 10^{-7} Вт/м³.
- Ток концентрируется в слоях с повышенной электрической проводимостью.
- Если в проводящем слое проводимость выше в пять раз, то плотность тока возрастает на порядок по сравнению с его значением на меньшей глубине.
- Амплитуда тока в литосфере значительно больше для вспышек с быстрым фронтом нарастания излучения по сравнению с более медленными процессами ионизации ионосферы.

Плотности тока, генерируемые в земной коре искусственным источником и солнечными вспышками

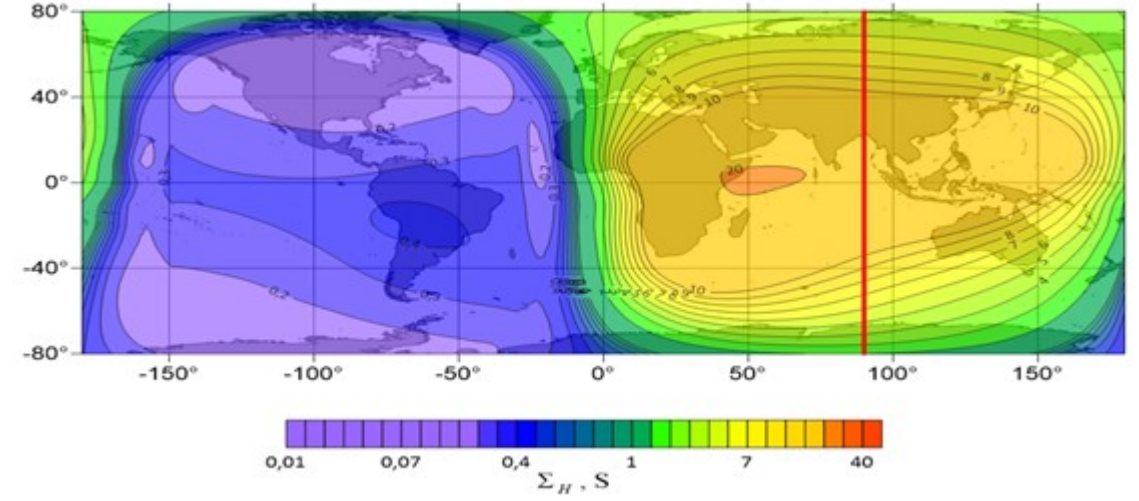
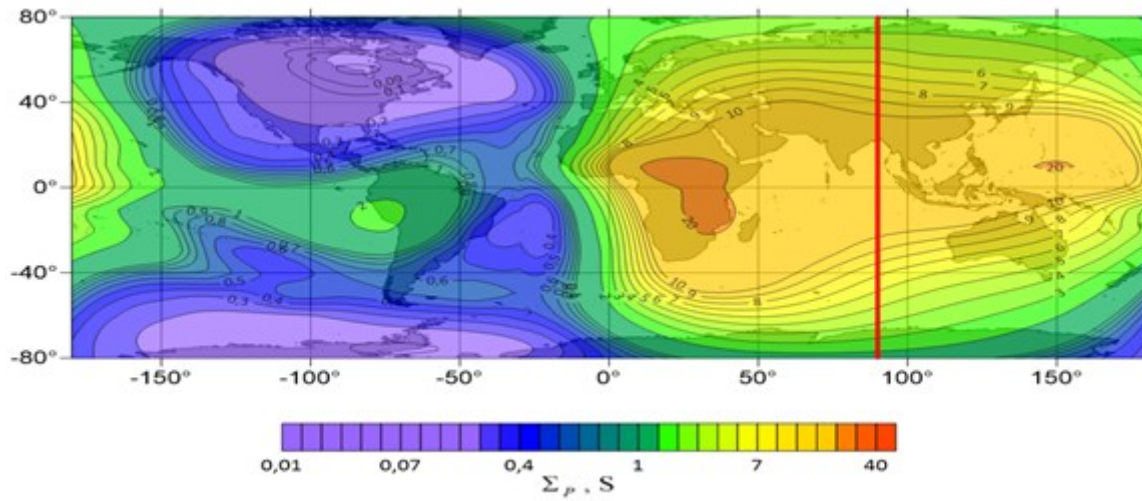


МГД-генератор:
 $10^{-7...-8} \text{ A/m}^2$

Солнечная вспышка:
 10^{-6} A/m^2

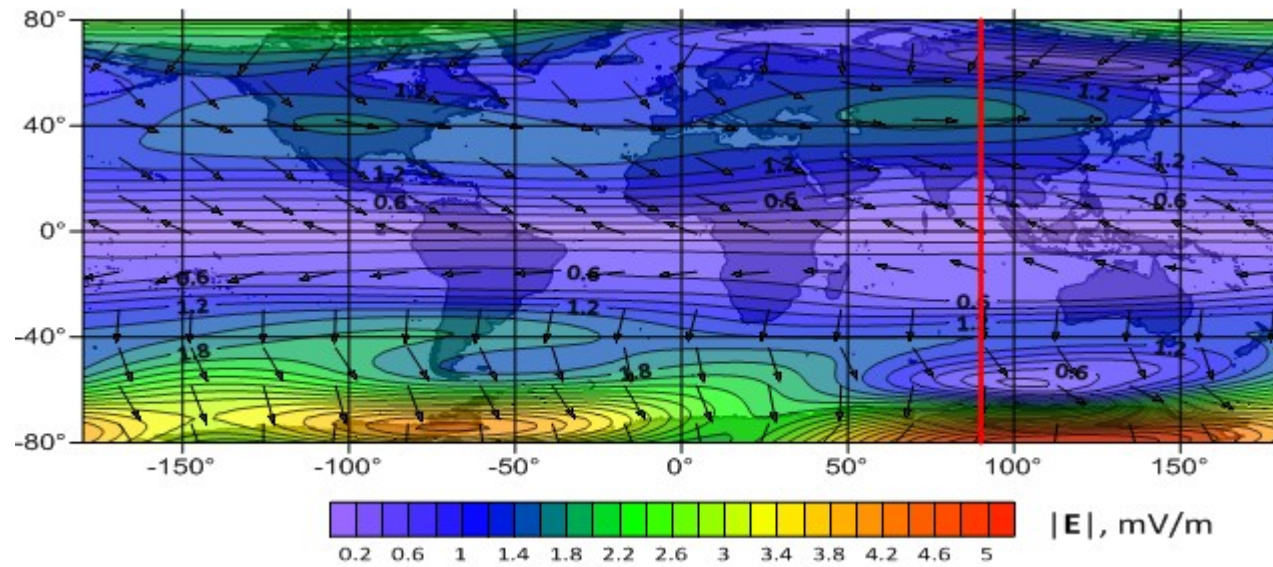
Results of calculations

Background integral conductivities of ionosphere



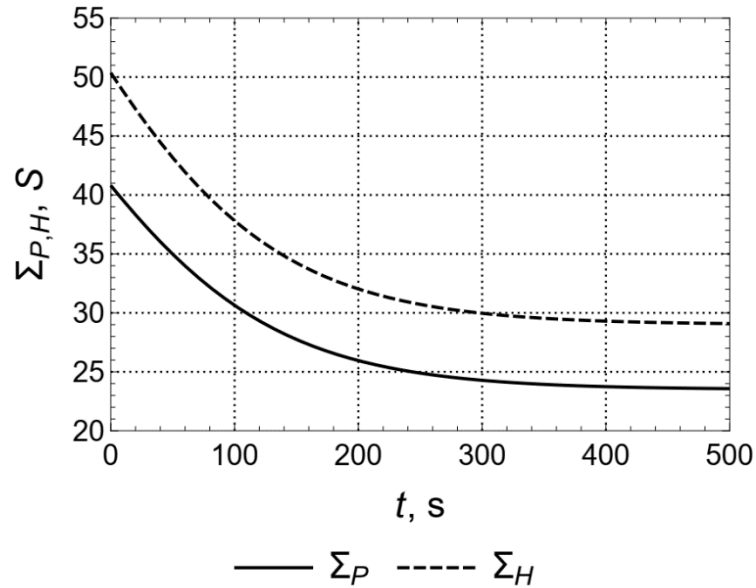
Background Pedersen conductivity

Background Hall conductivity

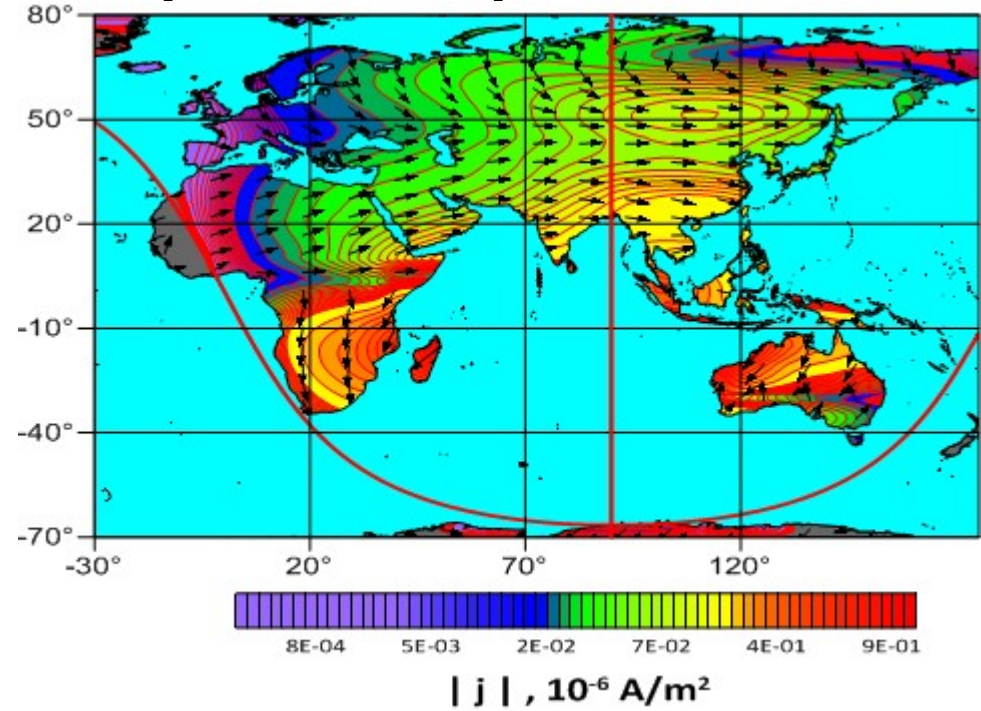


Spatial distribution of electric field in ionosphere

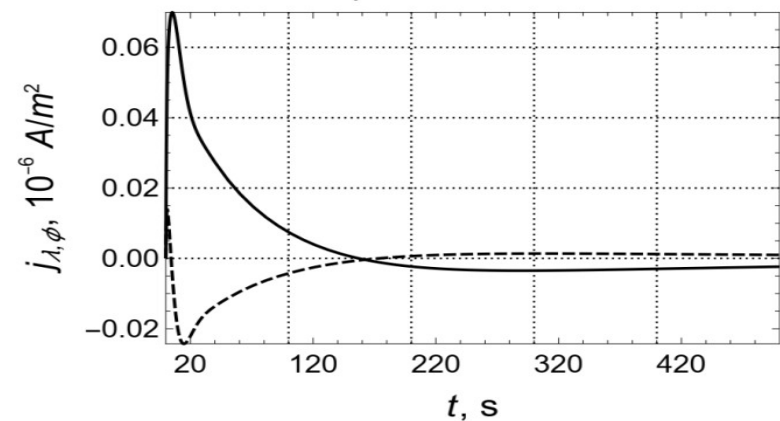
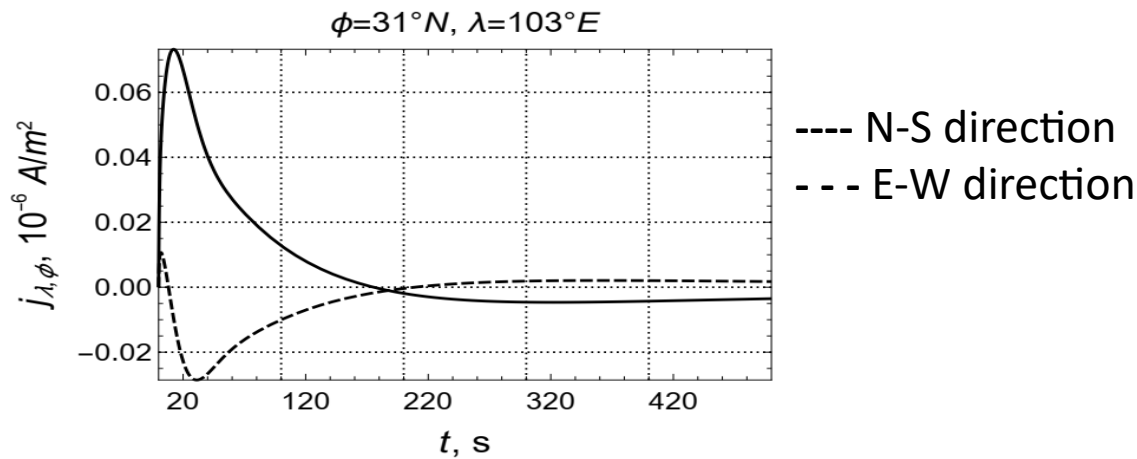
Results of calculations (continued)



Time dependence of perturbations of integral conductivities for under-Sun point (23.5° N; 90° E) for solar flare of X2.7 class (05.05.2015)

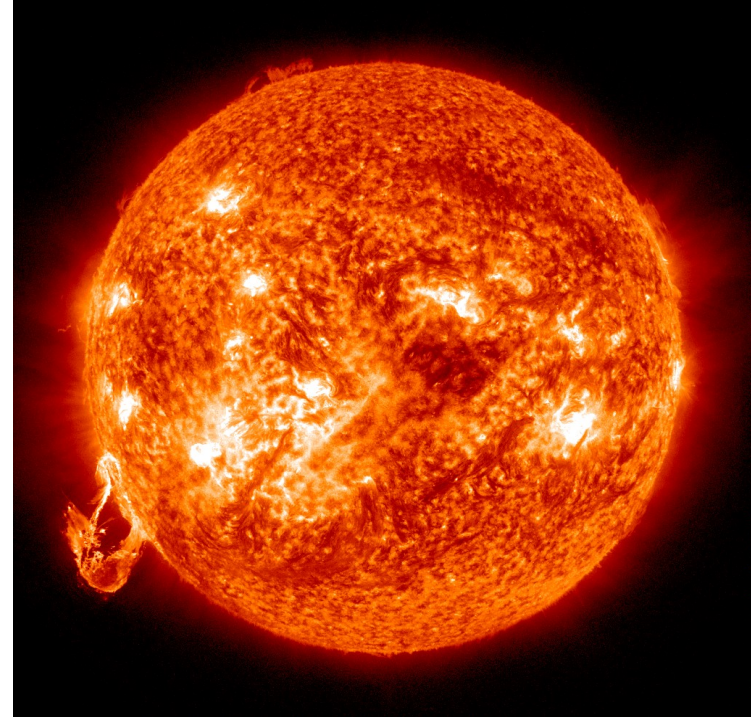
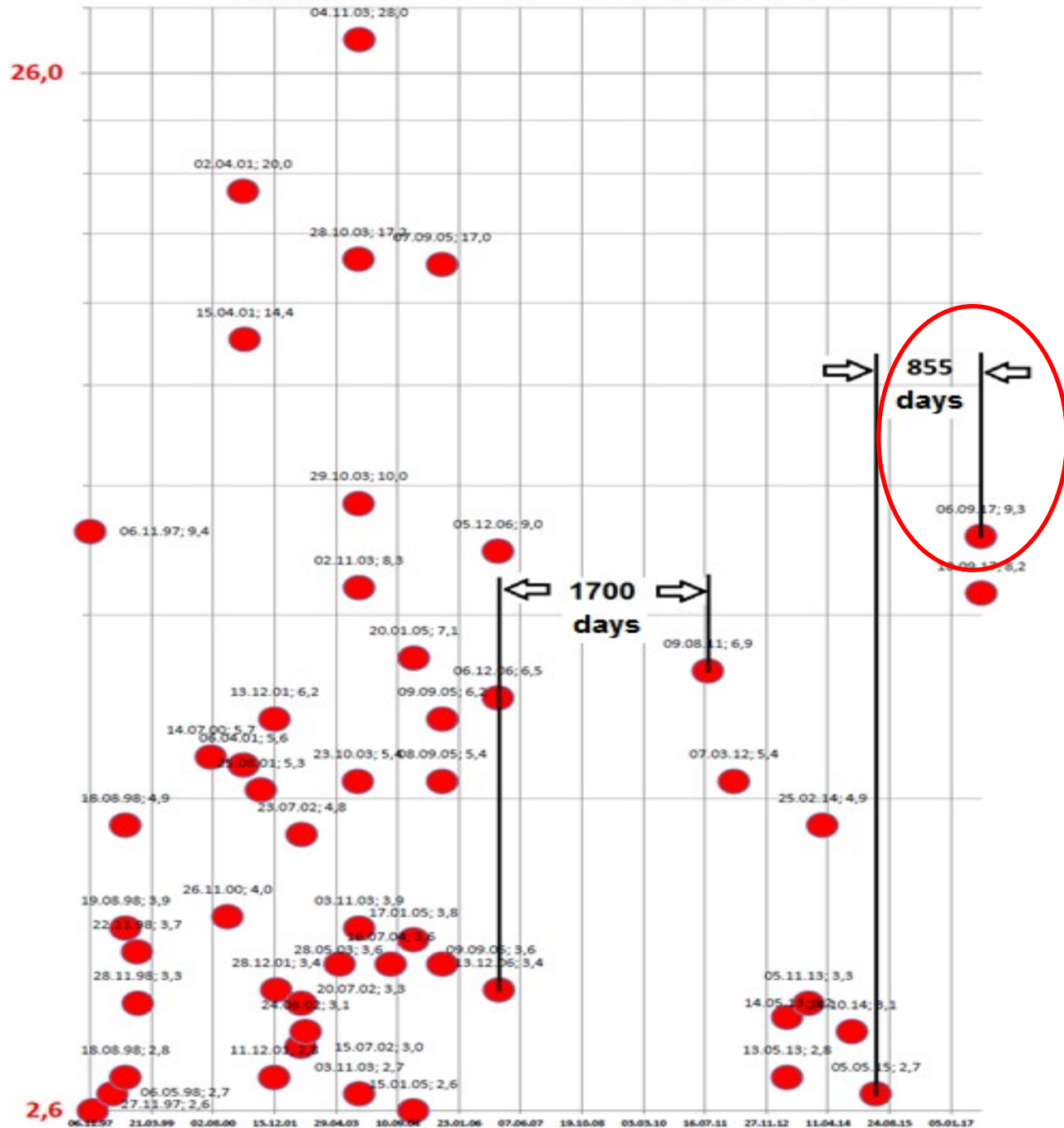


Spatial distribution of maximal current density and current vector directions
 $\phi=50^\circ$ N, $\lambda=90^\circ$ E



Time dependencies of electric current density for different locations.

Solar flares of X class



Solar flare index	Intensity of peak X-radiation, W/m ²
A	< 10 ⁻⁷
B	1.0×10 ⁻⁷ to 10 ⁻⁶
C	от 1,0×10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁵
M	от 1,0×10 ⁻⁵ to 10 ⁻⁴
X	> 10⁻⁴

Field observations for the model validation

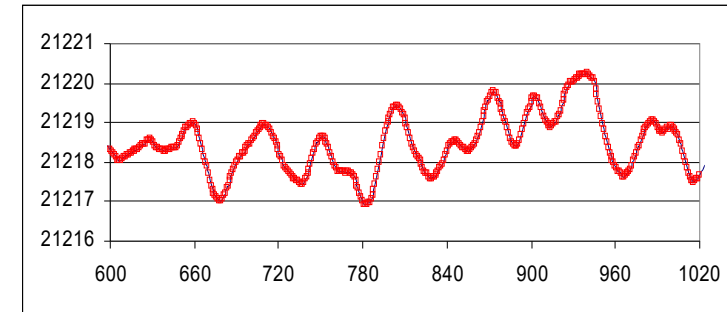
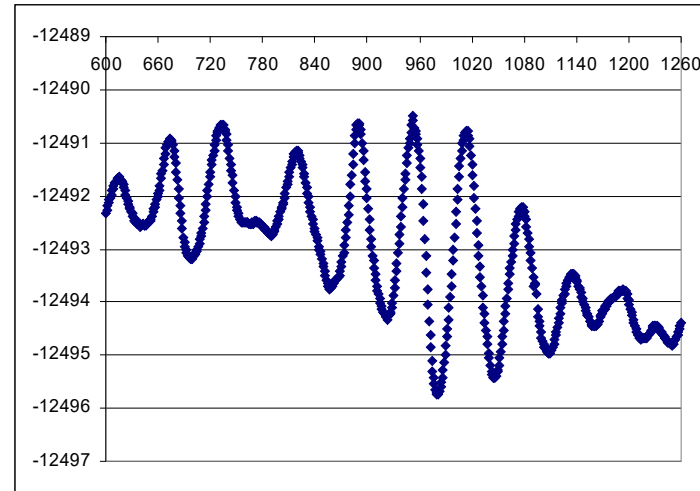
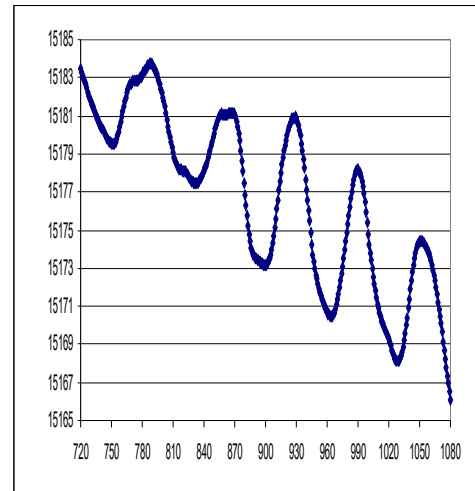
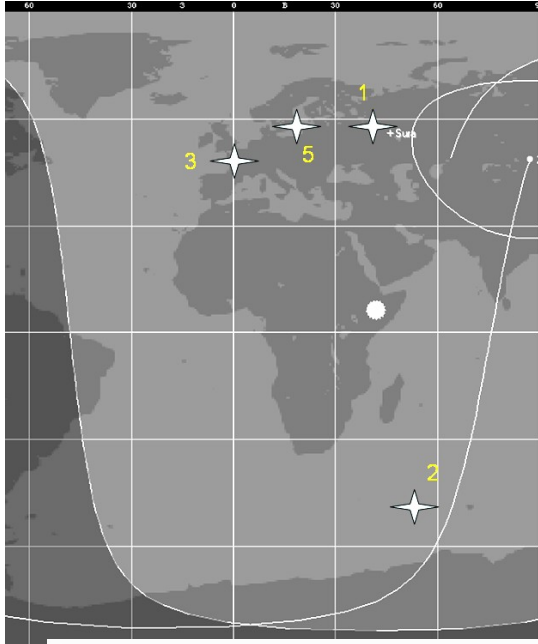
X2.2 solar flare 06.09.2017

Examples of geomagnetic field pulsations after solar flare of X2.2 class

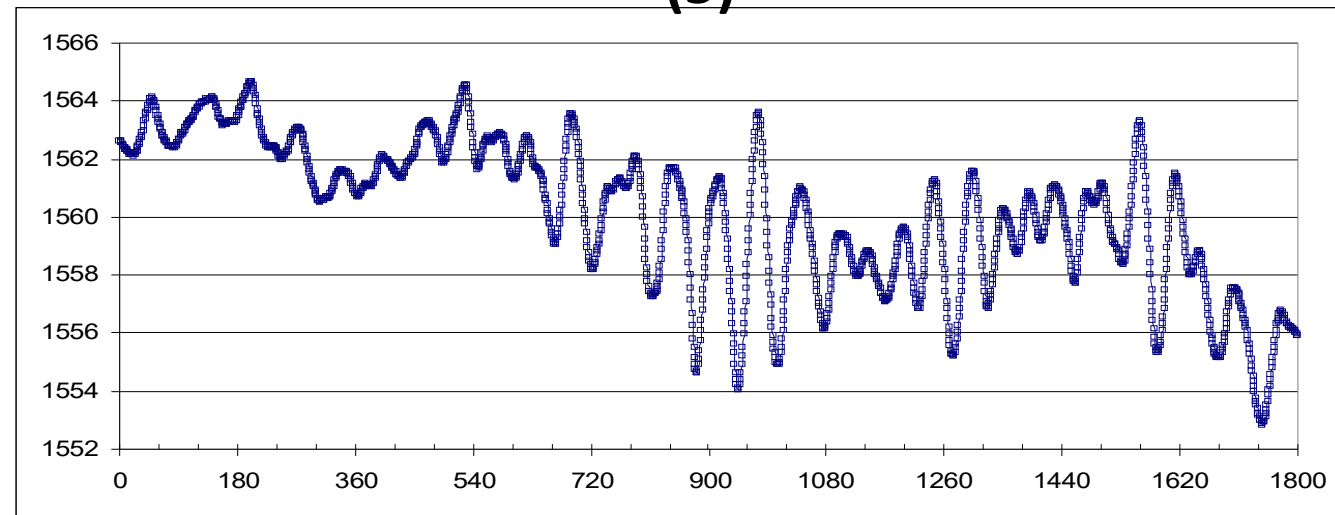
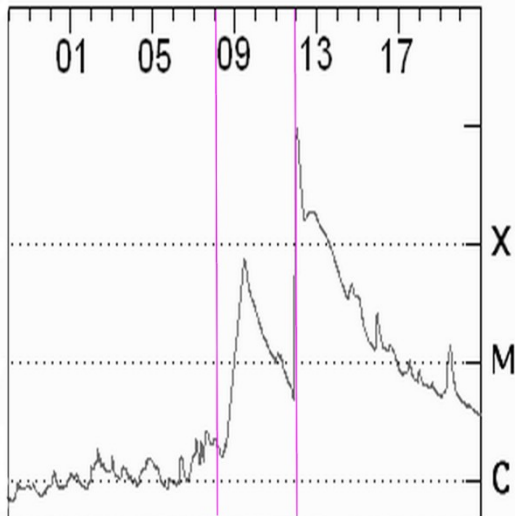
(1)

(2)

(3)

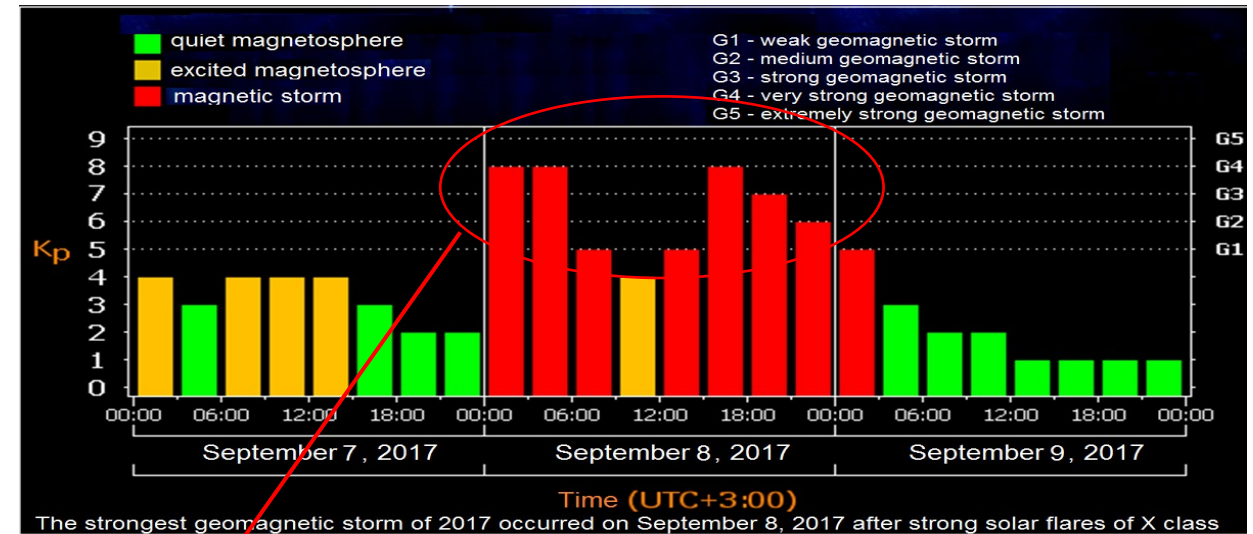
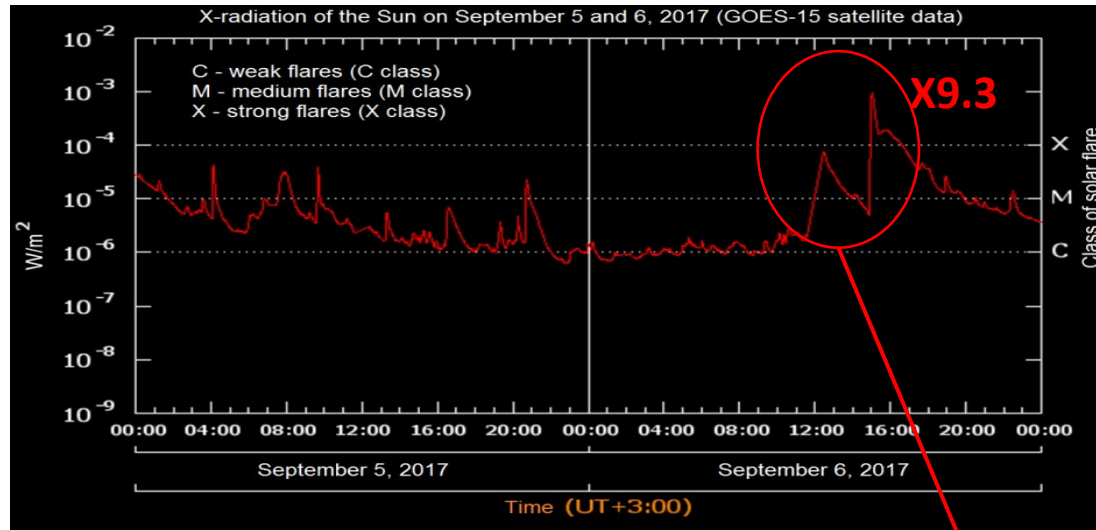


(5)

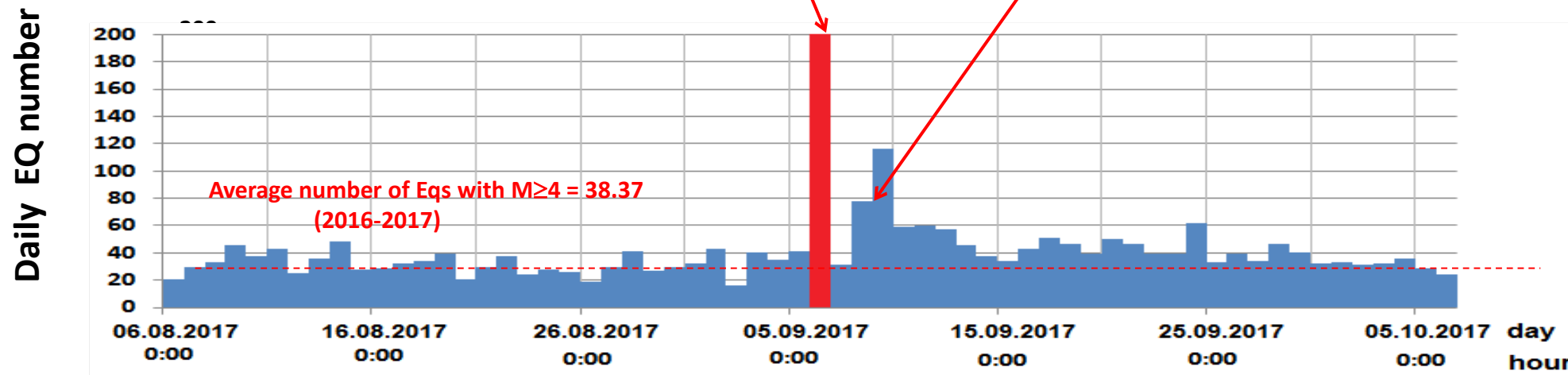


Solar flares and geomagnetic activity on September 5-9, 2017

Data from <https://tesis.lebedev.ru/info/20171229.html>



Global seismicity before and after solar flare of X9.3 class, September 6, 2017 (11:53 UTC)



[Novikov et al., 2020]

USGS catalog (2016-2017) for EQs $M \geq 4$

$N_a/N_b =$

a) **1.967**

b) 1.678

c) 1.610

d) 1.371

N_b – daily EQ number before SF

N_a – daily EQ number after SF

a, b, c, d – time window of 5, 10, 20 and 30 days

Mexican earthquakes in September, 2017 after strong X2.2 and X9.1 solar flares on September 6, 2017



UTC time 2017-09-08 04:49:19

ISC event [611600536](#)

USGS-ANSS [ComCat](#)

Local date 7 September 2017

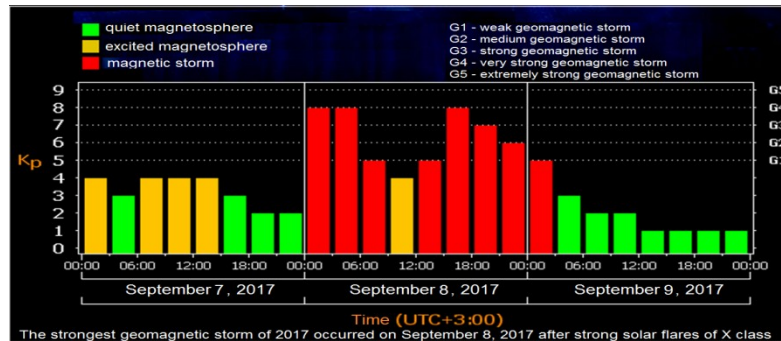
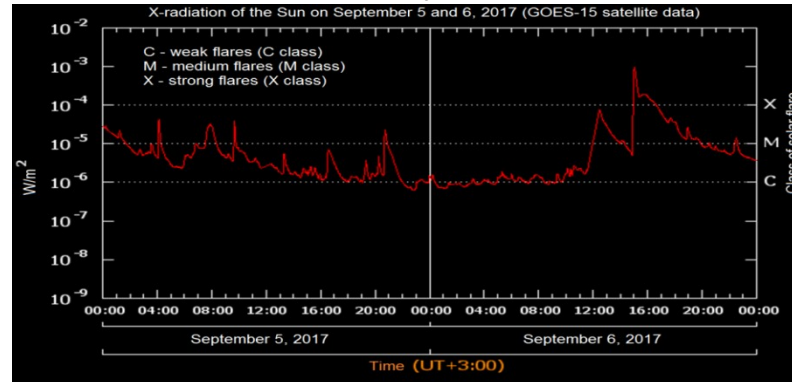
Local time 23:49:21 [CDT](#)

Magnitude 8.2 M_w ^[1]

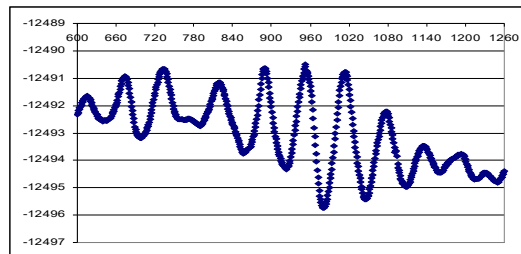
Depth 47.4 km (29.5 mi)

Epicenter [15.022°N 93.899°W](#)

Solar (5-6.09.2017) and geomagnetic (6-8.09.2017) activities



Geomagnetic pulsations generated by first solar flare X2.2 class, September 6, 2017



- Show map of Puebla (state)
- Show map of Mexico
- Show all

UTC time 2017-09-19 18:14:40

ISC event [611079453](#)

USGS-ANSS [ComCat](#)

Local date 19 September 2017

Local time 13:14:39 [CDT](#)

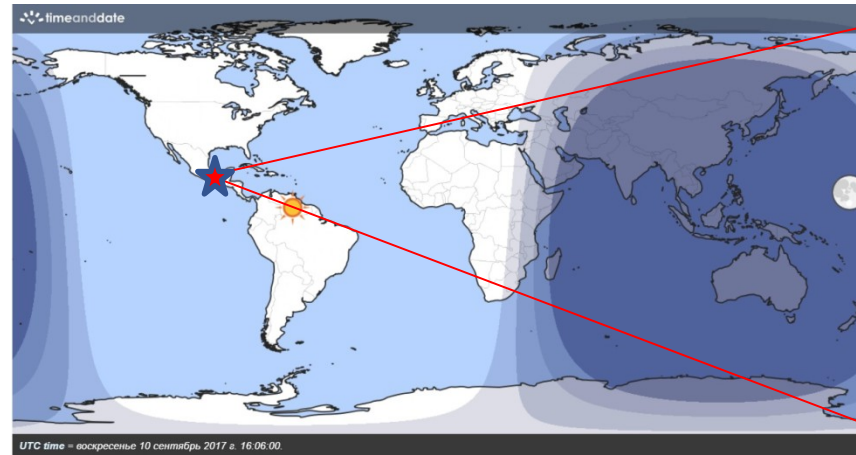
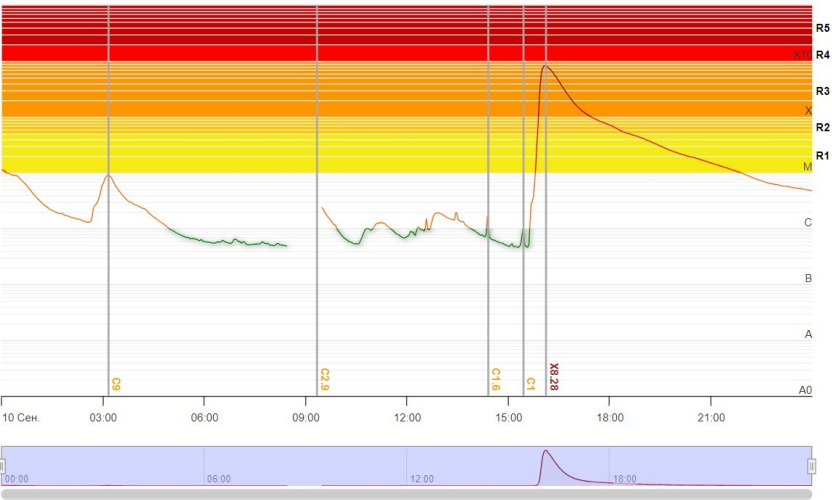
Duration Strong shaking for about 20 seconds

Magnitude 7.1 (M_w)

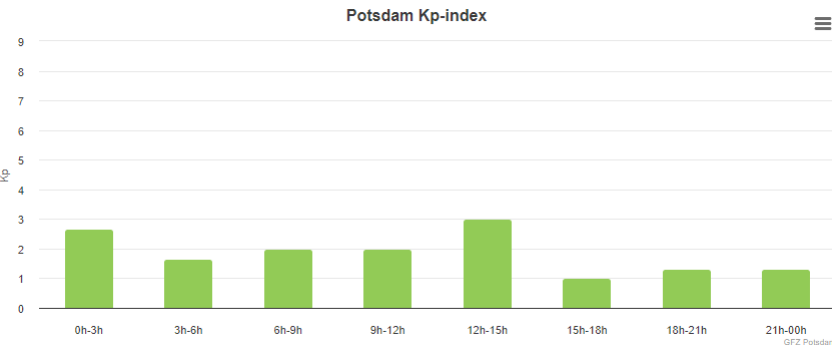
Depth 51.0 km (32 mi)

Epicenter [18.584°N 98.399°W](#)

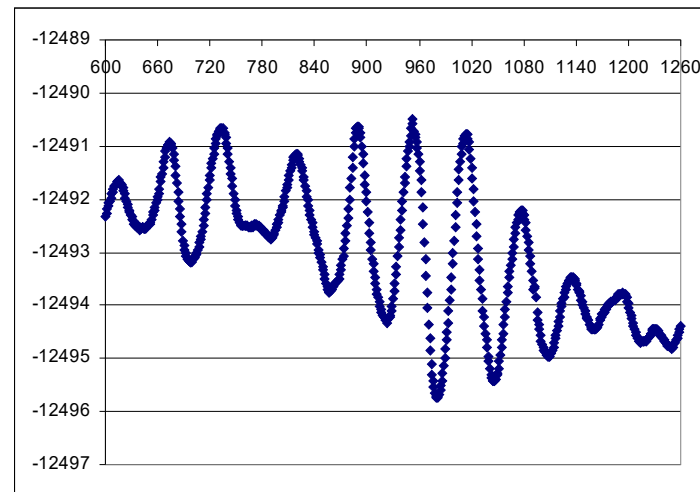
Mexican earthquake M7.1 on September 19, 2017 after strong X8.28 solar flare on September 10, 2017



Geomagnetic activity, Kp max=3, September 18, 2017



An example of geomagnetic pulsations generated by first solar flare X2.2 class, September 6, 2017, recorded on the ground

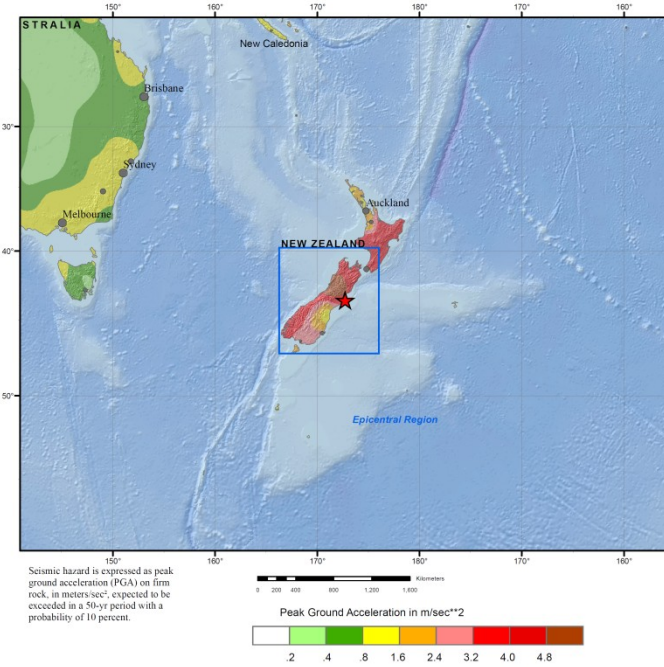


- Show map of Puebla (state)
- Show map of Mexico
- Show all

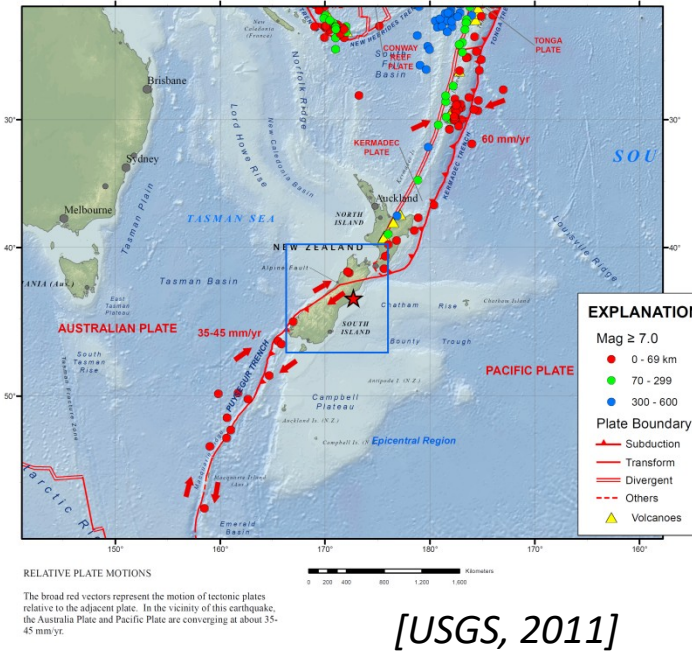
UTC time	2017-09-19 18:14:40
ISC event	611079453
USGS-ANSS	ComCat
Local date	19 September 2017
Local time	13:14:39 CDT
Duration	Strong shaking for about 20 seconds
Magnitude	7.1 (M_w)
Depth	51.0 km (32 mi)
Epicenter	18.584°N 98.399°W

The case study of New Zealand Christchurch earthquake Mw=6.2, 21.02.2011 (23:51 UTC)

Seismic Hazard



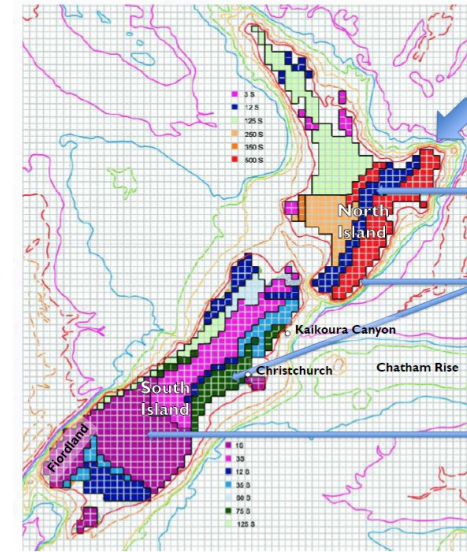
Tectonic Setting



[USGS, 2011]

[Divett et al., 2017]

Fig. 6 New Zealand conductance



Iso-conductance regions mainly follows the main alpine fault zone (NE to SW).

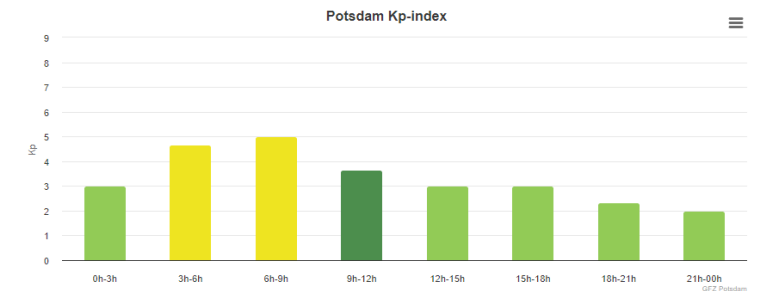
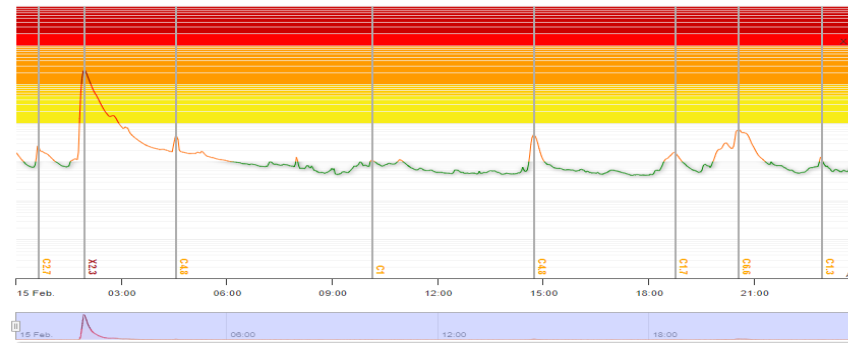
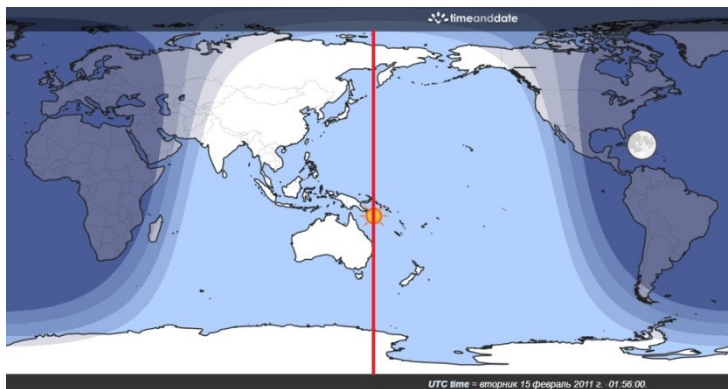
Highly conductive volcanic rock in the Central Plateau and surrounding volcanic region.

Highly conductive sediments on the east coast of the North Island and the Canterbury Plains.

Greatest uncertainty in south of the South Island where data is sparse and conductance inferred. Planned magnetotelluric field work will further refine the conductance model here.

The current density vector 10^{-7} A/m² coincides with the strike direction of the Port Hills fault, which provides the maximum value of telluric currents in the fault that may have a triggering potential. [Sorokin et al, 2023; Novikov et al. 2023]

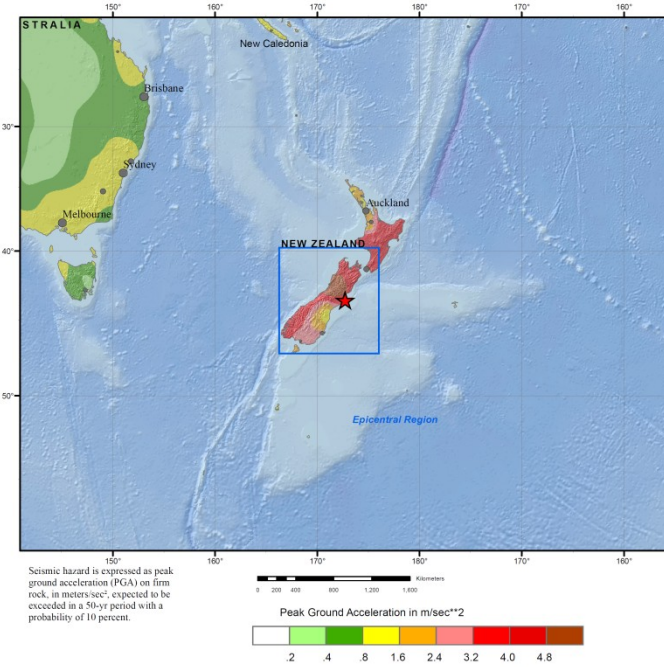
Solar flare of X2.3 class, February 15, 2011 followed by geomagnetic storm, Kp=5, February 18, 2011



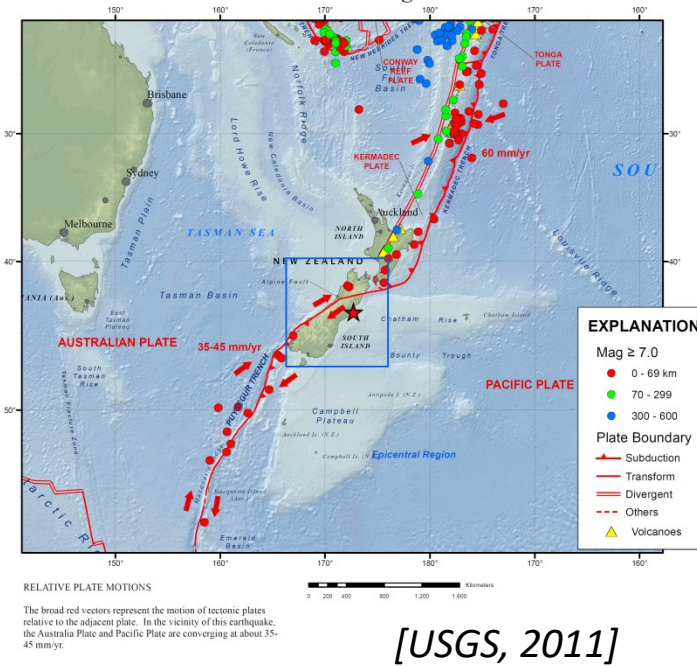
An earthquake with magnitude Mw=6.2 occurred on this fault 22.02.2011 with a delay of 6 days after the strong solar flare, similar to the response of seismicity to artificial electromagnetic impacts [Zeigarnik et al., 2022].

The case study of New Zealand Christchurch earthquake Mw=6.0, 13.06.2011

Seismic Hazard

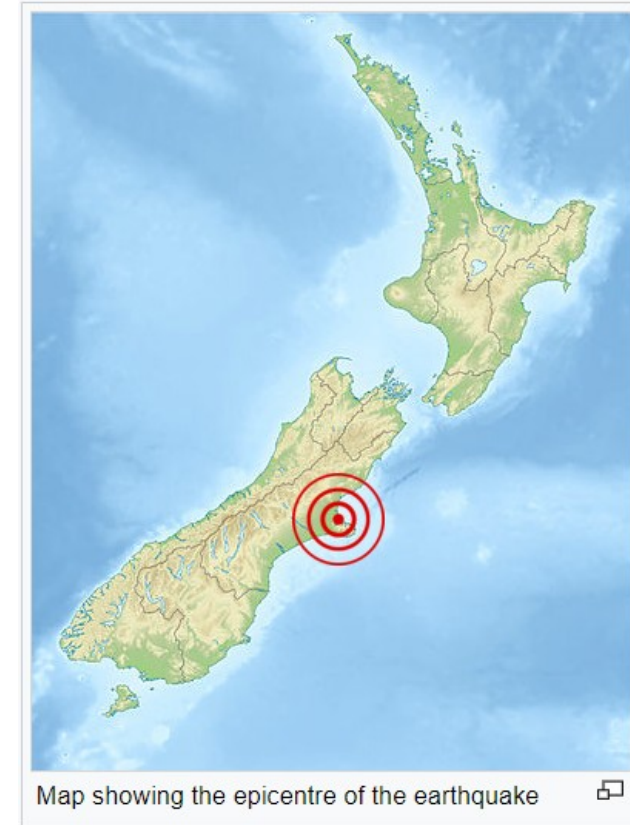


Tectonic Setting

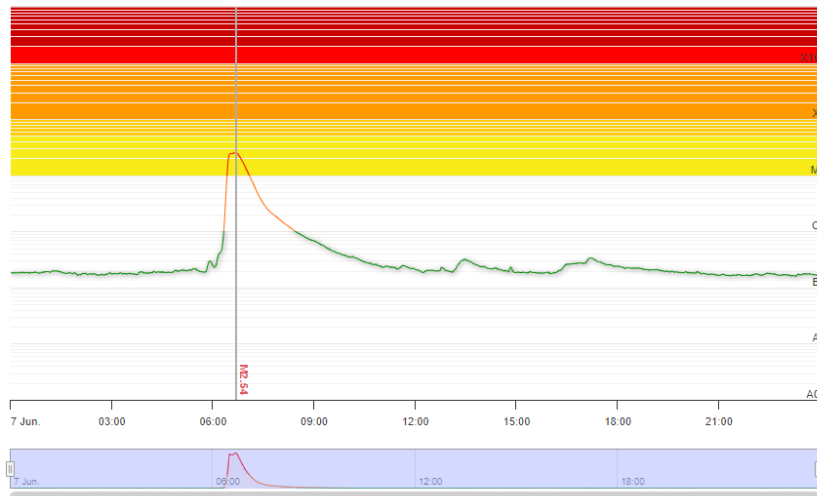


[USGS, 2011]

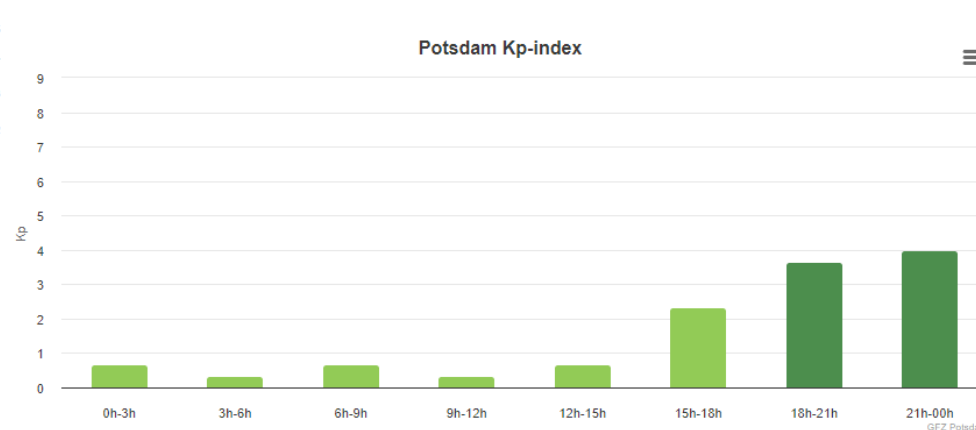
An earthquake with magnitude Mw=6.0 occurred 13.06.2011 with a delay of 6 days after the strong solar flare on June 7, 2011 of M2.54 class, similar to the Christchurch EQ, Mw=6.2, 22.02.2011



Solar flare of M2.54 class, June 7, 2011

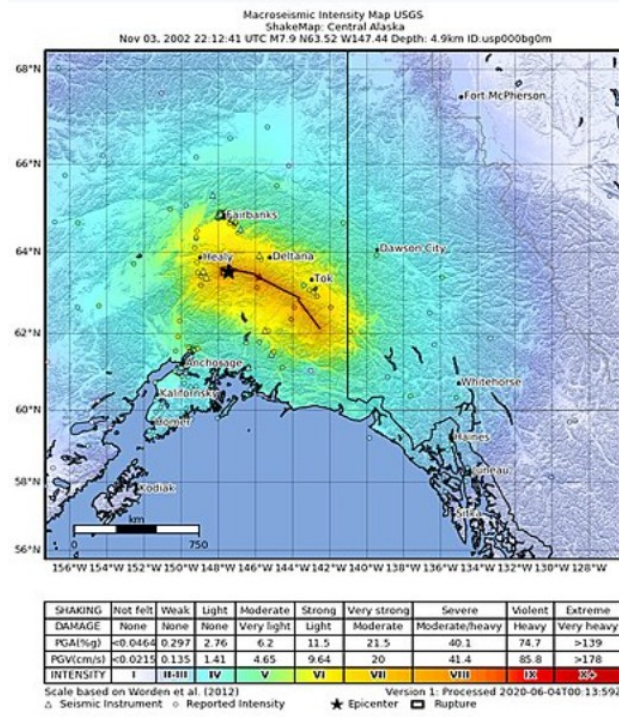


Geomagnetic activity, Kp max=4, June 7-8, 2011

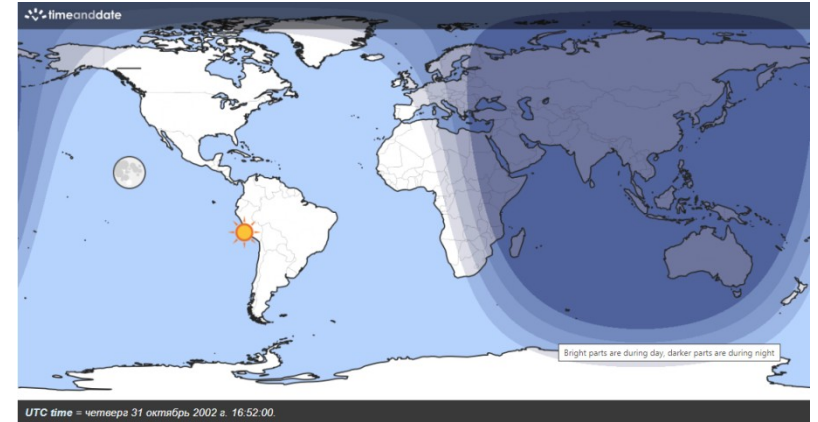


UTC time	2011-06-13 02:20:50
ISC event	16591901
USGS-ANSS	ComCat
Local date	13 June 2011
Local time	14:20
Magnitude	6.0 M_w ^[1]
Depth	7 km (4 mi) ^[1]
Epicentre	43.57°S 172.74°E

The case study of Denali earthquake Mw=7.9, 03.11.2002, Alaska, US



An earthquake with magnitude Mw=7.9 occurred 03.11.2011 with a delay of 4 days after the strong solar flare on October 31, 2002 of X1.25 class



UTC time 2002-11-03 22:12:41

ISC event 6123395

USGS-ANSS ComCat

Local date November 3, 2002

Local time 13:12

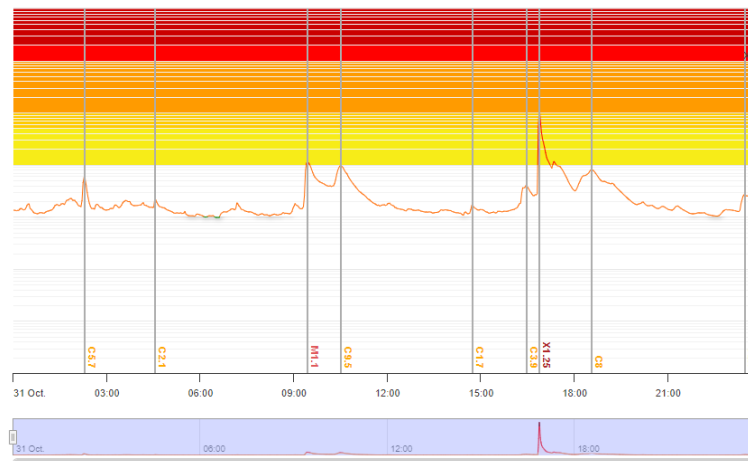
Magnitude 7.9 $M_W^{[1]}$

Depth 4.2 km (3 mi)^[2]

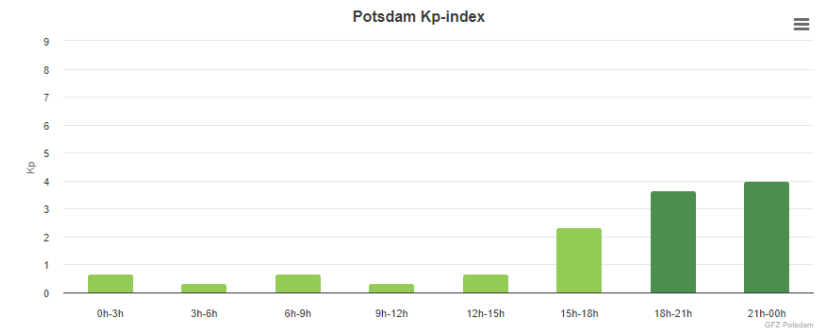
Epicenter 63.51°N 147.6°W ^[1]

Fault Denali Fault, Totschunda Fault

Solar flare of X1.25 class, October 31, 2002

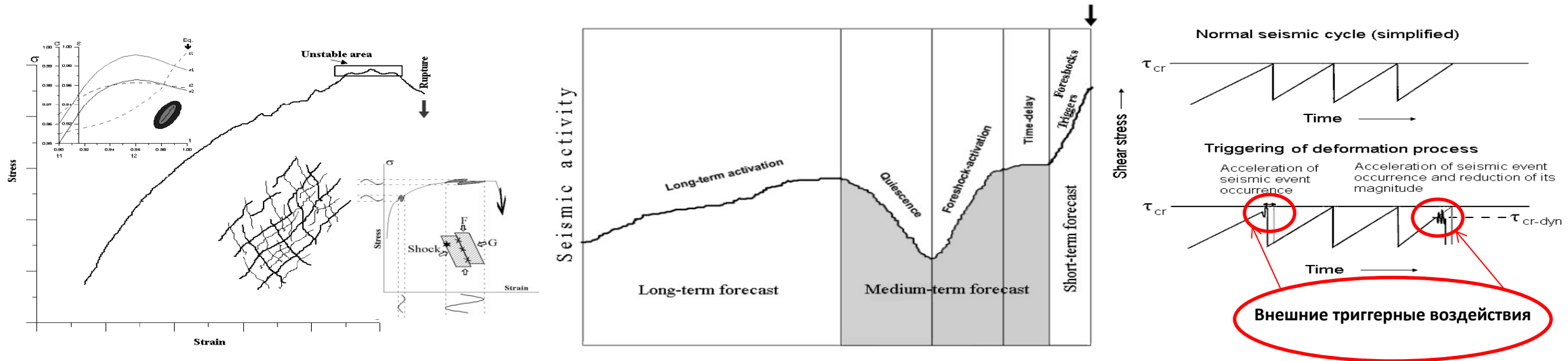


Geomagnetic activity, Kp =5, November 02, 2002



Концепция краткосрочного прогноза землетрясений на основе триггерных воздействий

Предложена концепция прогноза землетрясений на основе триггерных воздействий на зону подготовки землетрясения [Соболев Г.А. (2010), NHESS].



Предлагается проводить работы по прогнозу землетрясений следующим образом:

- определение объема неустойчивой области (системы локальных неустойчивых областей различного масштаба);
- мониторинг различных триггерных факторов и оценка возможной степени их воздействия на определенные неустойчивые области;
- оценка вероятности места, времени и магнитуды готовящегося землетрясения.

Возможное использование полученных результатов для корректного статистического анализа воздействия солнечных вспышек на сейсмичность Земли

На основе полученных численных результатов, подтверждаемых полевыми наблюдениями, по нашему мнению корректный статистический анализ солнечно-земных связей должен проводиться следующим образом:

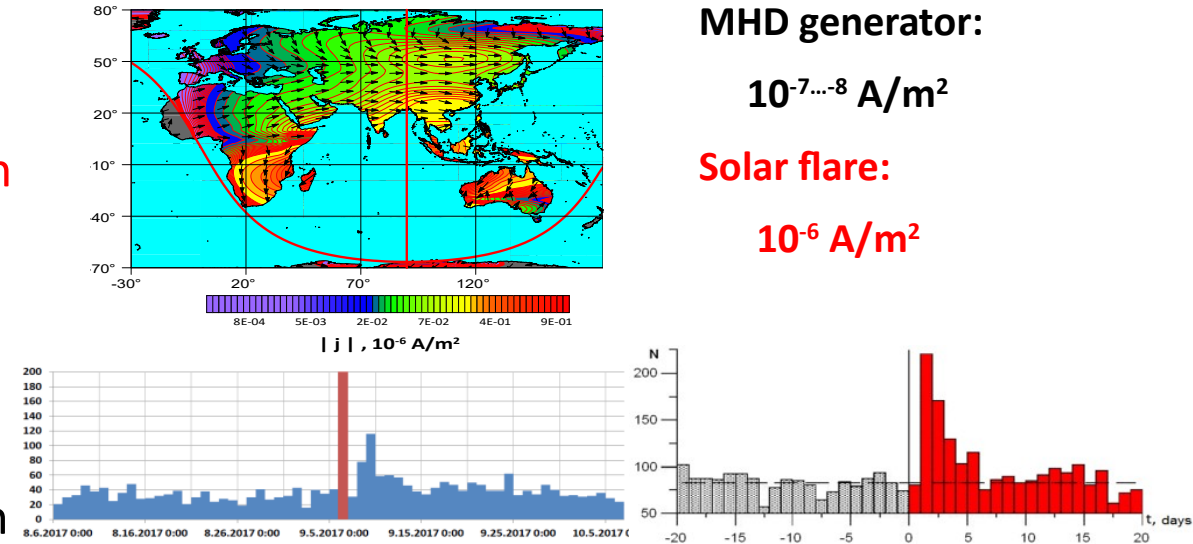
- a) Определение неустойчивой области (секции разлома земной коры), где ожидаются сильные землетрясения на основе существующих методов определения сейсмически опасных регионов [например, Завьялов, 2006; Sobolev, 2011; Dzeboev et al., 2021; Gorshkov et al., 2003; Gorshkov and Soloviev, 2021; Ruzic, Levina, 2022];
- b) Выбор разломов земной коры в регионах, определенных на шаге (a), которые являются наиболее чувствительными к электромагнитному воздействию с точки зрения их ориентации, близкой к направлению расчетного вектора плотности тока, а также их электропроводности;
- c) Выбор из региональных сейсмических каталогов тех землетрясений, которые произошли на разломах, определенных на шаге (b);
- d) Далее корреляционный анализ времени возникновения землетрясения и вариаций параметров космической погоды для определения времени задержки инициирования землетрясений и пороговых значений параметров космической погоды, которые обеспечивают триггерный эффект в очаге землетрясения.

Заключение и направления будущих исследований

- Полученные численные результаты демонстрируют тот факт, что солнечные вспышки могут вызывать сильные импульсные вариации плотности теллурического тока в сейсмогенных проводящих разломах, сопоставимых с плотностью тока, генерируемого в земной коре искусственными источниками, приводящих к инициированию слабых землетрясений и пространственно-временному перераспределению региональной сейсмичности.
- Следовательно, инициирование землетрясений возможно не только искусственными источниками тока, но также и ионосферными возмущениями, обусловленными солнечными вспышками и последующими геомагнитными бурями.
- Созданная физическая модель и компьютерный код для расчета теллурических токов обеспечивают возможность численного моделирования электромагнитного воздействия различных явлений космической погоды на земную кору, обеспечивающих генерацию электрических токов в проводящих объектах литосферы типа разломов земной коры.
- Представленные результаты могут быть использованы как физическое обоснование нового подхода к решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений на основе электромагнитных триггерных эффектов.

To take home

- **Space weather phenomena** like strong solar flares and geomagnetic storms **can generate telluric current density in the conductive layers similar to artificial power sources which provide earthquake triggering**
- Behavior of seismic activity after solar flare and geomagnetic storm is similar to increase in a number of local earthquakes after injection of DC pulses into the Earth crust.
- **Detailed and fine geoelectrical structures** of the faults where strong earthquakes are anticipated **are required**.
- **Before earthquake alert after strong perturbation of space weather** we need to select the areas favorable for electromagnetic earthquake triggering from point of view of the fault maturity to the dynamic rupture, its electric conductivity and orientation for induction of extreme geomagnetically induced currents which can provide effect of EQ triggering

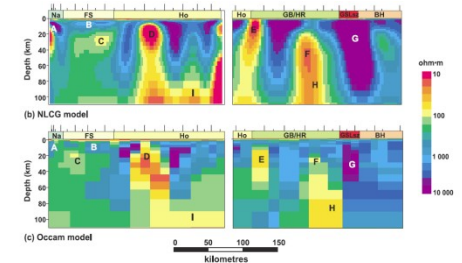


MHD generator:

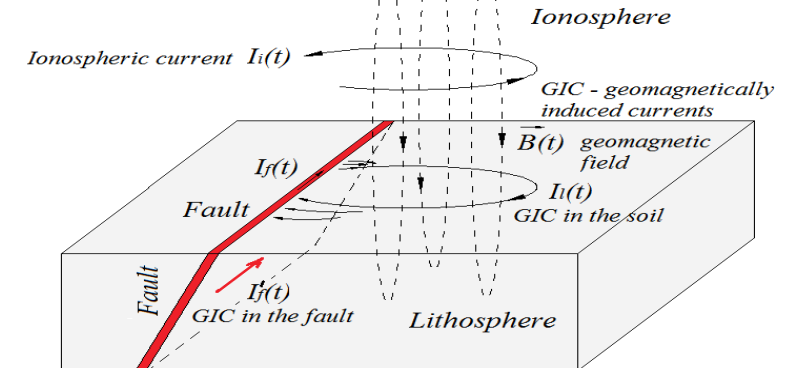
$$10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ A/m}^2$$

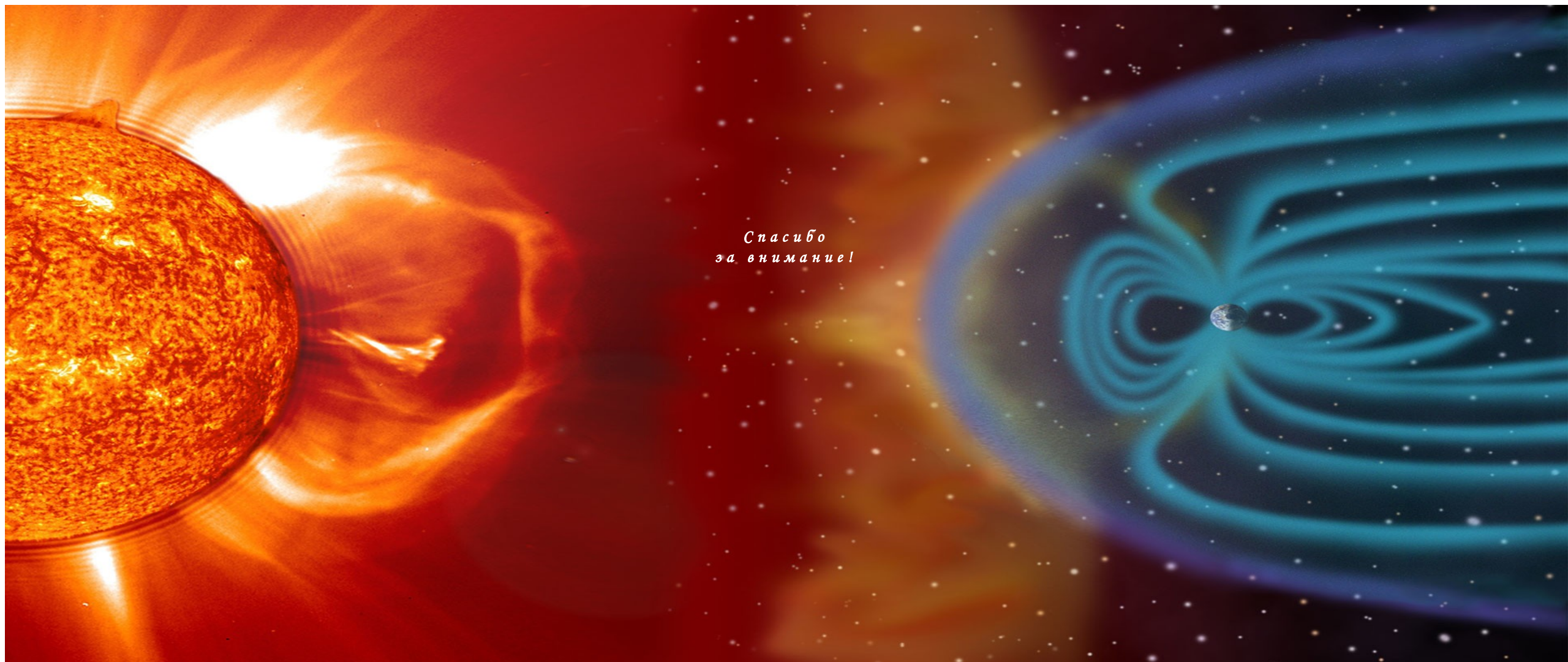
Solar flare:

$$10^{-6} \text{ A/m}^2$$



Generation of geomagnetically induced currents in lithosphere and conductive fault





*Спасибо
за внимание!*