

Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений ($M \geq 7$) Северной Калифорнии на динамические и электромагнитные воздействия как возможный индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры

Новиков В.А.^{1, 2}, Лазарева Е.А.³

¹Объединенный институт высоких температур РАН,

² Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского

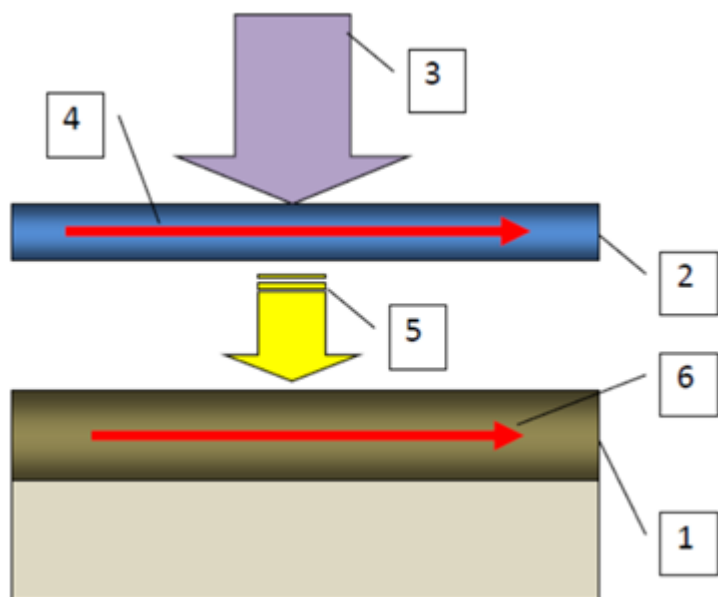
³ Научная станция РАН в Бишкеке

Исследования поддержаны грантом РФФ №24-27-00205

Теоретическая модель генерации теллурических токов рентгеновским излучением солнечных вспышек

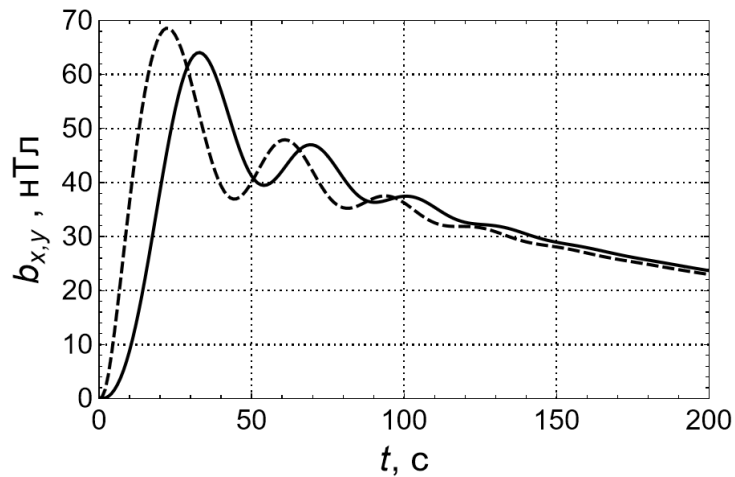
(Sorokin et al., *Earthquake Science*, 2019; *Вестник ОИВТ РАН*, 2019; *Atmosphere*, 2023; *Динамические процессы в геосферах*, 2023)

Рассмотрен механизм формирования колебаний геомагнитного поля в системе «Земля – ионосфера» с периодами (1 – 100) с в процессе ионизации ионосферы рентгеновским излучением солнечной вспышки с коротким фронтом нарастания ее амплитуды, а также генерации теллурических токов в литосфере с конечной проводимостью.

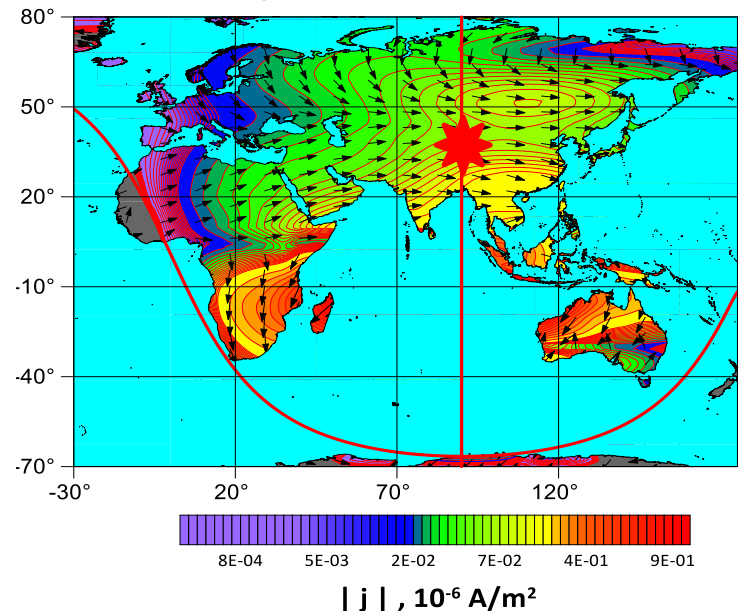


- 1 – проводящий слой земной коры
- 2 – проводящий слой ионосферы
- 3 – рентгеновское излучение солнечной вспышки
- 4 – электрическое поле в ионосфере
- 5 – геомагнитные пульсации
- 6 – теллурические токи в земной коре

Результаты численного эксперимента (продолжение)

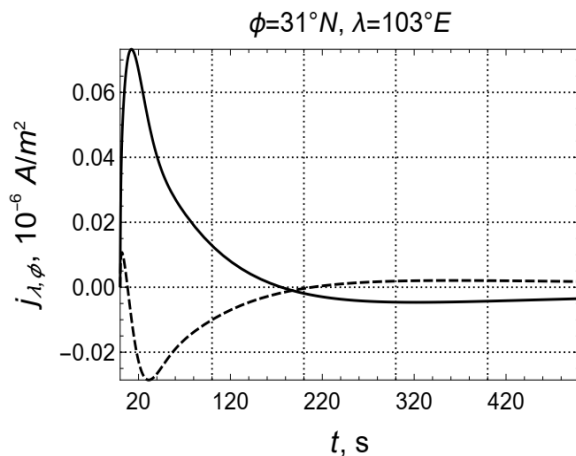


Зависимость от времени компонент возмущения магнитного поля на поверхности Земли b_x (----) и b_y (___) для проводимости $\sigma_g = 3 \text{ См/м}$

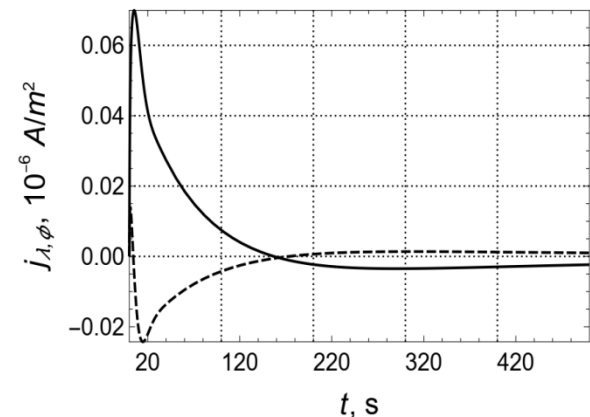


Пространственное распределение максимальной плотности тока и направлений

вектора тока
 $\phi=50^\circ\text{N}, \lambda=90^\circ\text{E}$



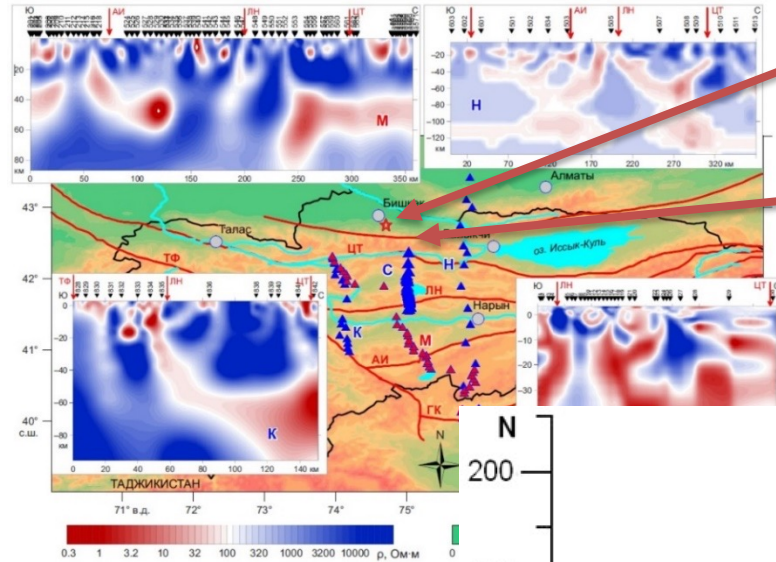
---- направление С-Ю
- - - направление В-З



Временные зависимости плотности электрического тока для различных координат

Плотность тока, генерируемая в земной коре искусственным источником

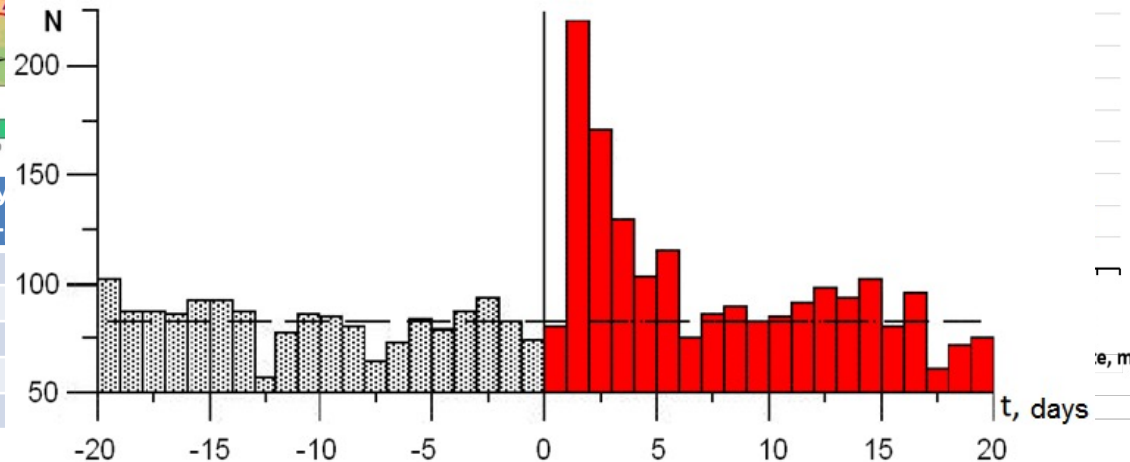
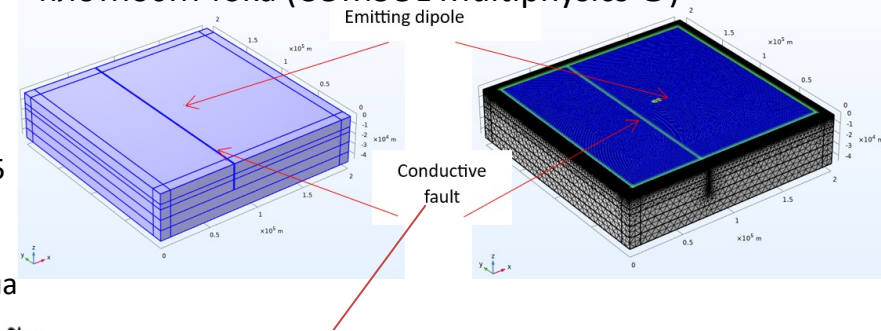
Результаты МТЗ для серии региональных профилей Северного и Центрального Тянь-Шаня [Rybin et al, 2016]



Излучающий
диполь (★)

Проводящий
разлом (на
расстоянии ~25
км от
излучающего
диполя: ширина
~ 1,5 км.

Геометрическая модель слоистой структуры с вертикальным проводящим включением (разлом земной коры) для расчета распределения плотности тока (COMSOL Multiphysics ©)



Расчетная
плотность тока в
разломе на
расстоянии 25-30
км от диполя и
на глубине 10-15
км равна $1 \cdot 10^{-6}$ -
 $1 \cdot 10^{-7}$ А/м²

МГД-генератор:

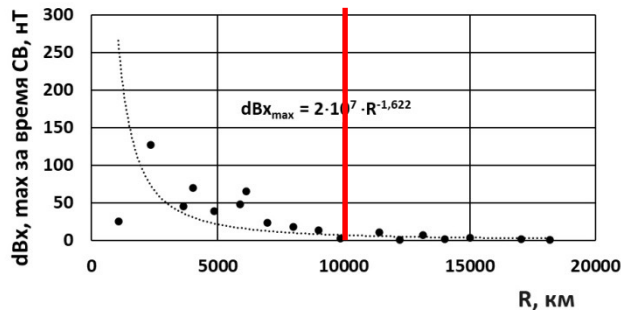
$10^{-6...-8} \text{ A/m}^2$

Солнечная вспышка:

$10^{-6} \dots -7 \text{ A/m}^2$

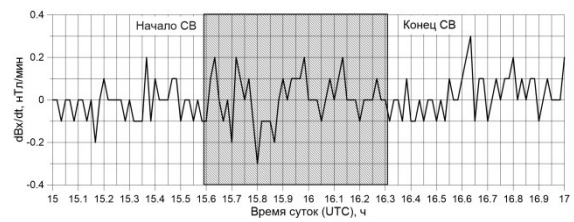
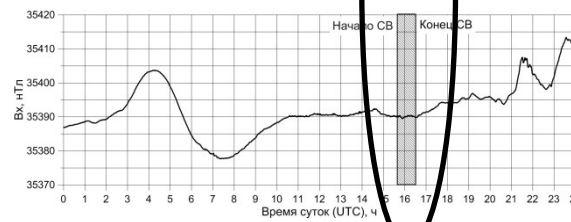
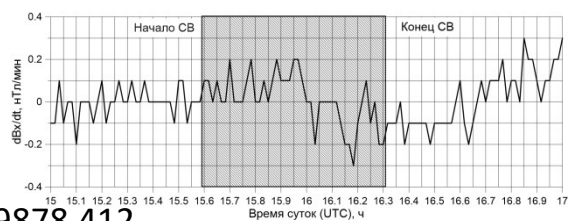
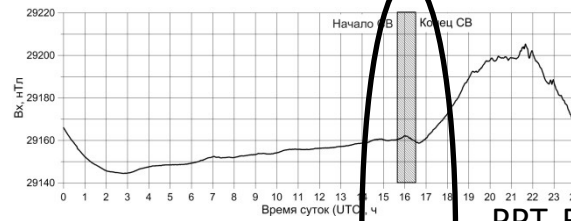
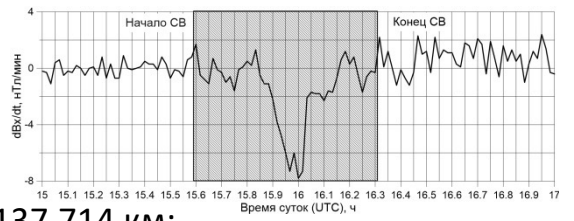
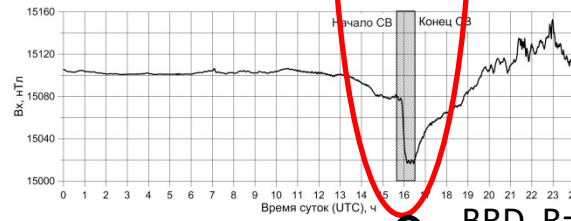
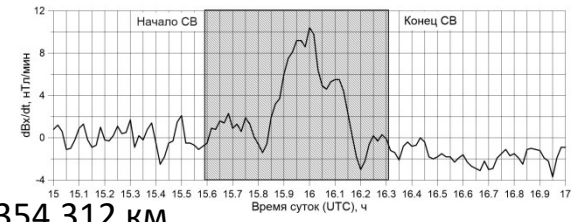
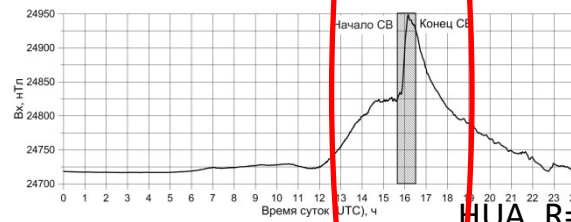
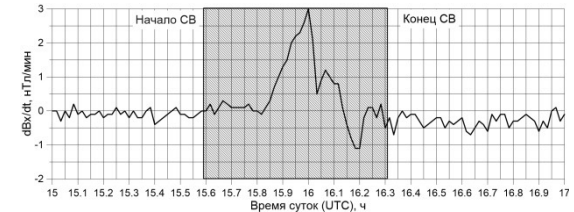
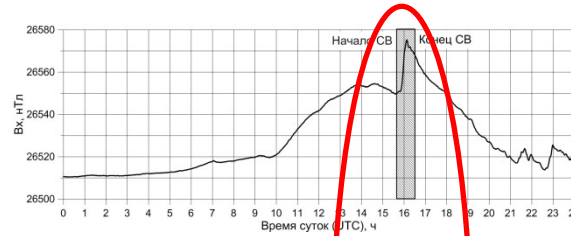
Вариации геомагнитного поля во время СВ класса X11.88 (56 мин), 10.09.2017

Код IAGA	Широта, град	Долгота, град	Расстояние R до ПСТ, км	ΔB_x , max за время СВ, нТ	$ \Delta B_x/t $, max за время СВ, нТ/мин
KOU	5,21	307,27	1059,90	25,6	3,0
HUA	-12,05	284,67	2354,31	127,2	10,4
VSS	-22,40	316,35	3629,72	44,9	5,0
FRD	38,21	282,63	4028,68	69,90	8,8
STJ	47,60	307,32	4859,13	39,10	5,6
TUC	32,17	249,27	5883,31	48,2	5,0
BRD	49,87	260,03	6137,71	65,3	7,8
KEP	-54,28	323,51	6979,41	23,7	3,9
LER	60,14	358,82	7995,21	17,50	2,3
HLP	54,60	18,81	9010,05	13,70	1,9
PPT	-17,57	210,43	9878,41	2,90	0,2
SBA	-77,85	166,76	11403,16	10,8	4,9
API	-13,82	-171,78	12234,93	0,9	0,2
CSY	-66,28	110,53	13142,71	7,0	2,4
MMB	43,91	144,19	13997,42	1,7	0,3
BMT	40,30	116,20	15010,81	3,4	0,4
GNG	-31,36	115,72	17041,82	1,7	0,4
KDU	-12,69	132,47	18166,44	0,9	0,2



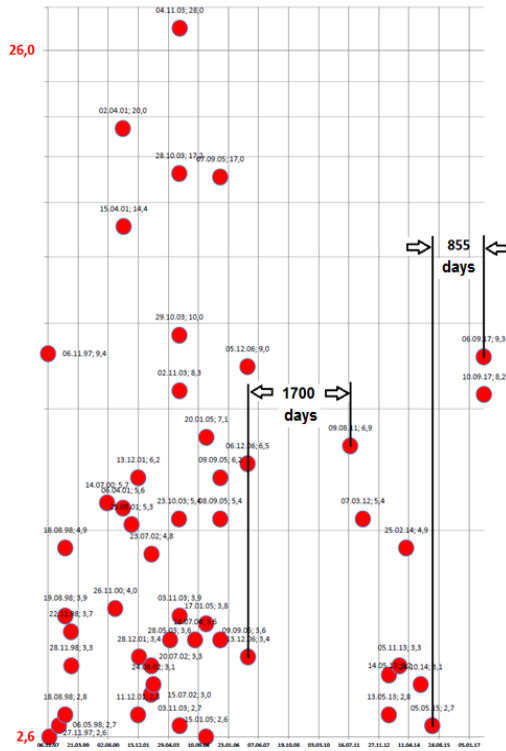
Вариации B_x (24 часа)

и dB_x/dt (15:00-17:00 UTC)



Анализ влияния СВ класса X (макс. интенсивность излучения > 10^{-4} Вт/м²) на ЗТ

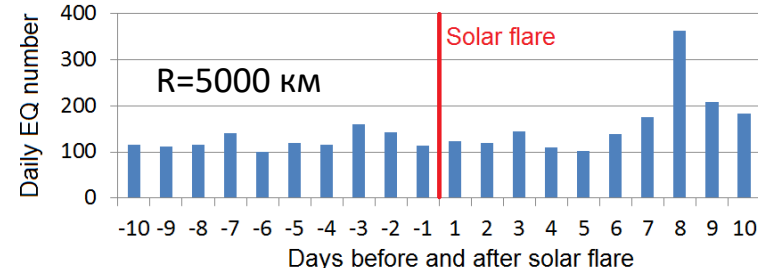
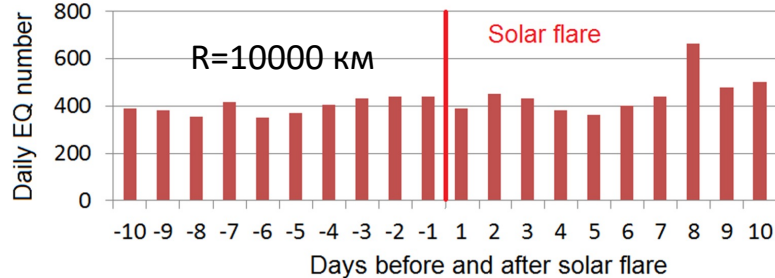
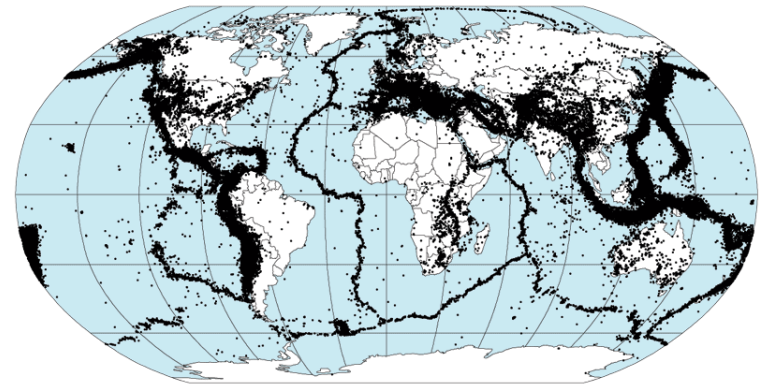
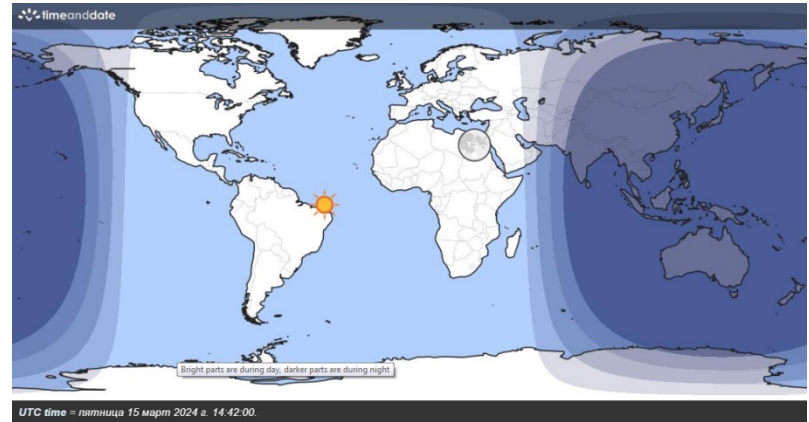
Solar flares of X class



Каталог 50
сильнейших СВ
класса X

(1997-2023):
 $28 > X > 2.74$

<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/top-50-solar-flares.html>



Каталог USGS ($M \geq 4.5$):

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Группа СВ класса X:	$\Sigma_{R=5000}$		$\Sigma_{R=10000}$		$\Sigma_{\text{non-lit}}$	
	a	b	a	b	a	b
1) $28 \geq X \geq 2.74$	1667	1209	4507	3977	4157	4163
$\Delta ZT, \%$	37,88		13,33		-0,1	
2) $10.0 \geq X \geq 5.0$	456	767	1330	1546	1640	1590
$\Delta ZT, \%$	68,2		16,24		-3,05	
3) $5.0 > X > 2.74$	640	794	2068	2365	1891	1796
$\Delta ZT, \%$	24,06		14,36		-5,02	

Эффективность воздействия электрического тока на инициирование ЗТ (лабораторный эксперимент)

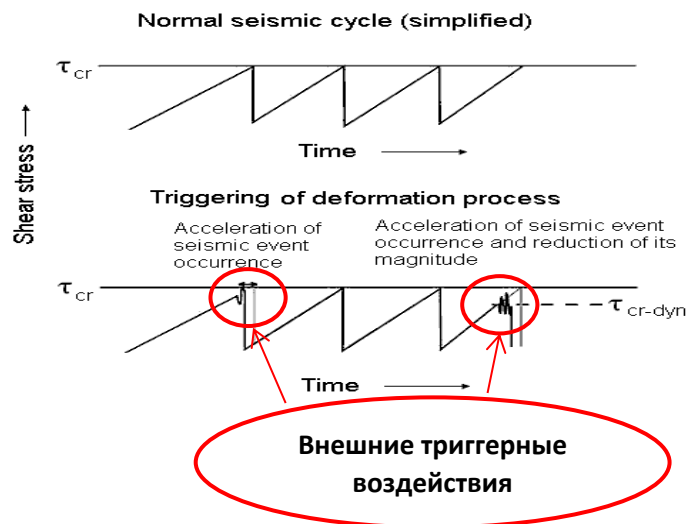
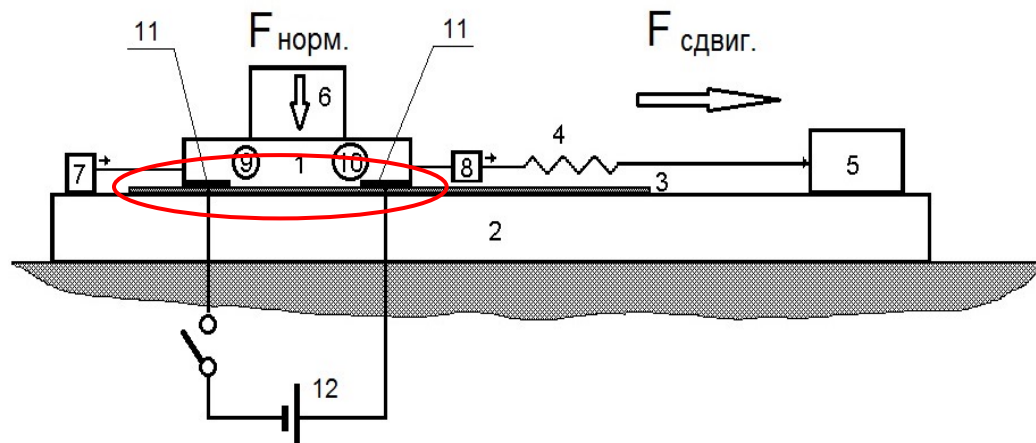
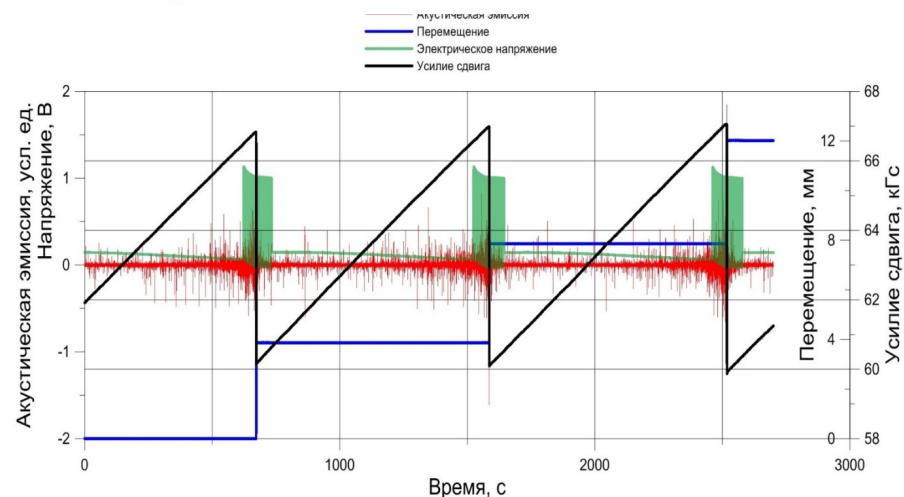


Схема электрического воздействия на контактную зону (модельный разлом земной коры) пружинно-блочной установки С-2



Пружинно-блочная модель разлома земной коры (слайдер С-2)



Иницирование лабораторного «землетрясения» импульсами постоянного электрического тока при $K_p=0,98-0,99$

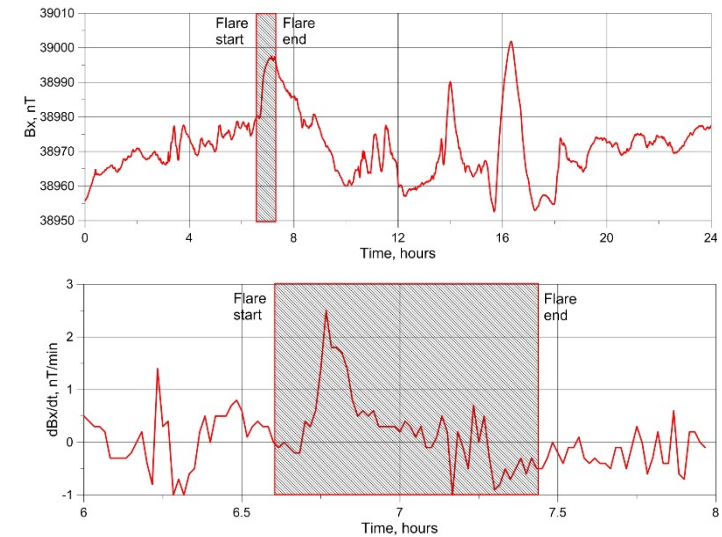
Анализ влияния солнечной вспышки (X10.18, 20.01.2005) на афтершоковую зону Суматра-Андаманского землетрясения (M9.1, 26.12.2004)



Эпицентр (красная точка) и афтершоки (справа)

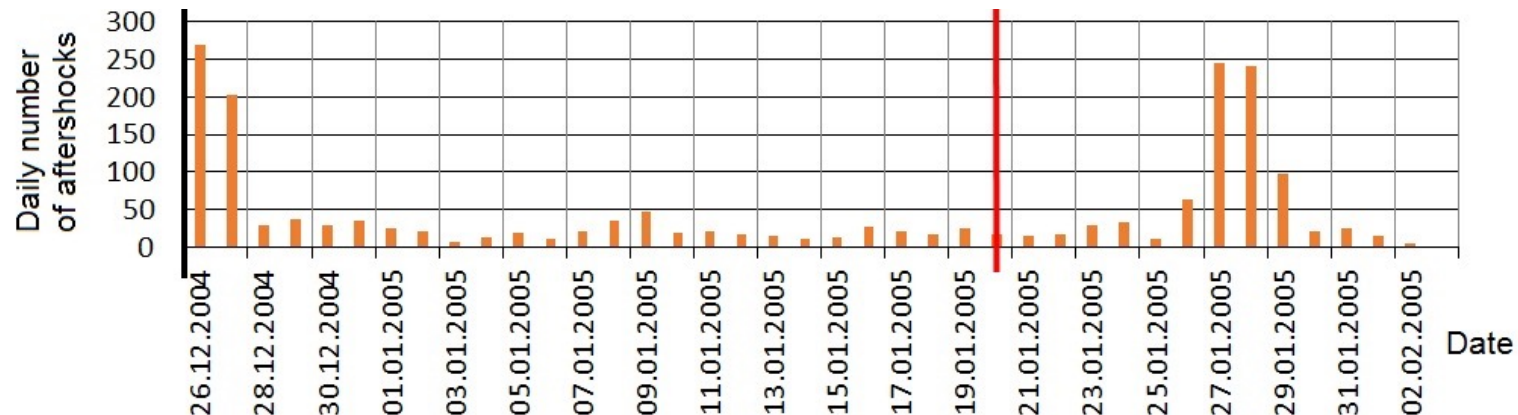
Суматра-Андаманского ЗТ

Расстояние от ПСТ СВ X10.18 до эпицентра ЗТ = 2717,6 км

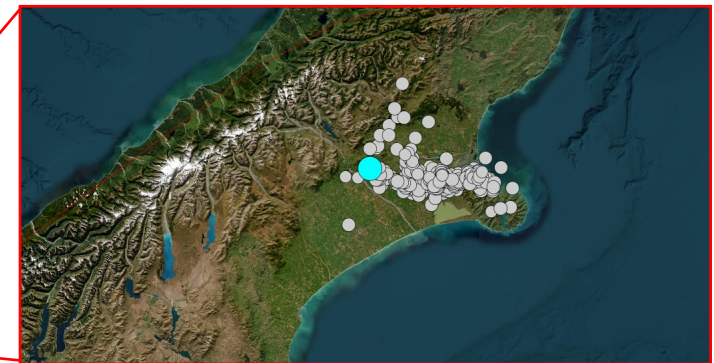
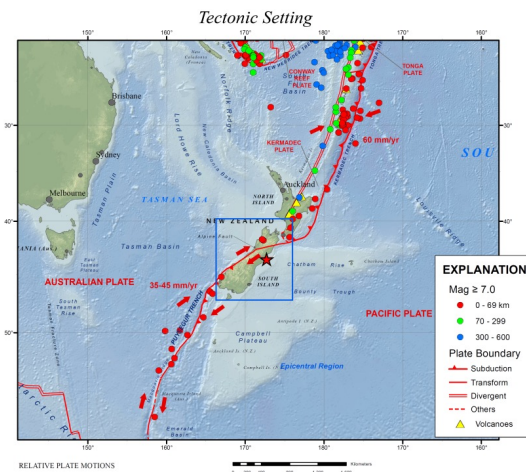


Афтершоковая последовательность ($M \geq 2,5$) Суматра-Андаманского землетрясения (черная вертикальная линия – момент ЗТ; красная вертикальная линия – момент СВ)

Рост количества афтершоков после СВ на 6-9 сутки в 20 раз!

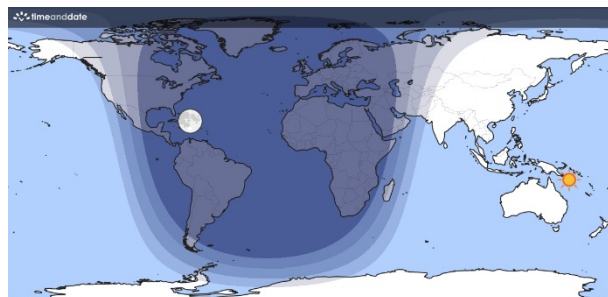


Воздействие солнечных вспышек на афтершоковую зону Дарфилдского землетрясения 03.09.2010, M7.0 (Новая Зеландия)

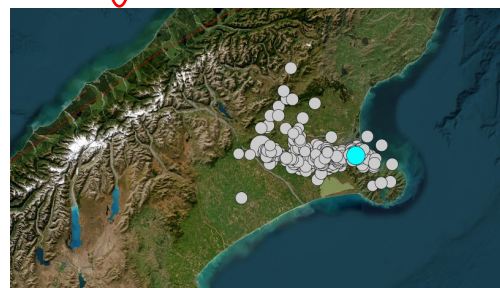
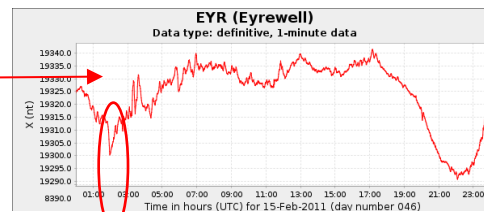


В соответствии с моделью [Sorokin et al., 2023] вектор плотности ТТ в земной коре имеет юго-восточное направление, которое совпадает с направлением простираения разлома Port Hills, на котором произошел афтершок M6.2. При этом плотность ТТ по численным оценкам имеет порядок 10^{-7} А/м². Таким образом, разлом Port Hills являлся наиболее чувствительным местом к электромагнитному воздействию СВ с точки зрения его напряженно-деформированного состояния (афтершоковая зона Дарфилдского ЗТ), плотности ТТ (10^{-7} А/м²) и ориентации вектора плотности ТТ, совпадающей с направлением простираения разлома, что содействовало дополнительной концентрации тока в разломе.

Солнечная вспышка X3.28,
15.02.2011, UTC 01:56



Расстояние от ПСТ СВ до
эпицентра афтершока 3853,7 км

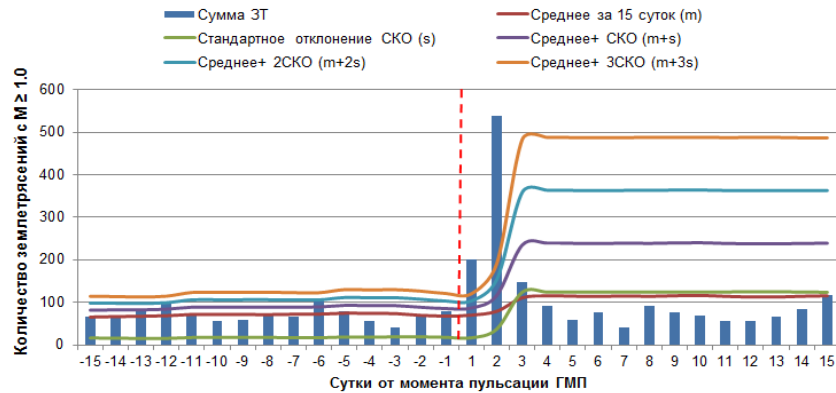


Афтершок Mw=6.2, 21.02.2011 с
задержкой 6 суток после СВ

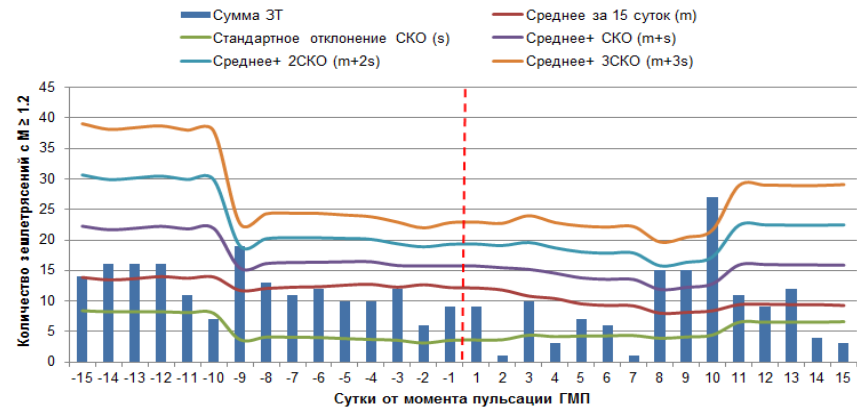
На этом же разломе с той же самой задержкой 6 суток 13.06.2011 г. произошли еще два сильных афтершока M5.2 и M5.9 после более слабой СВ класса M3.64 (07.06.2011).

Отклик микросейсмичности геотермальных полей Северной Калифорнии, США на сильные пульсации горизонтальной компоненты геомагнитного поля V_x $|dV_x/dt| \geq 50$ нТ/мин (результаты анализа) (Новиков, Лазарева, ДАН, 2025)

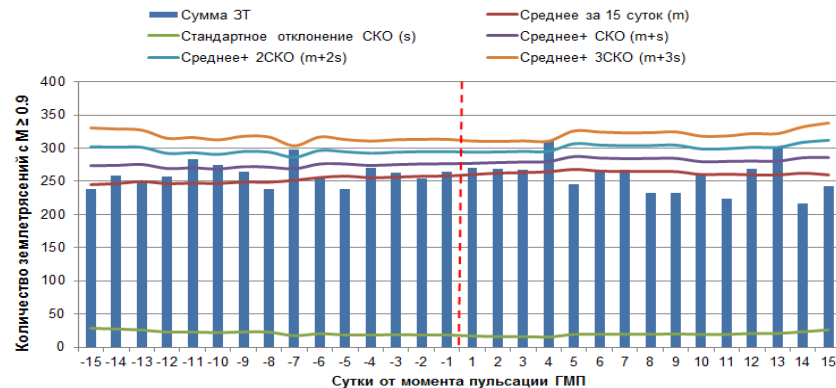
Количество землетрясений на территории Long Valley для пульсаций ГМП, зарегистрированных на FRN (1991-2024)



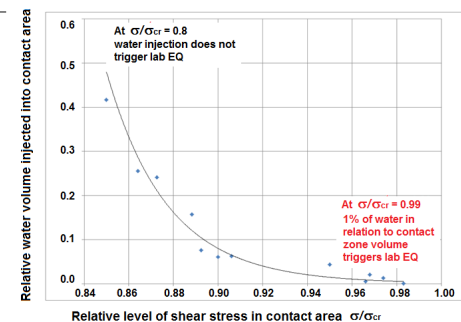
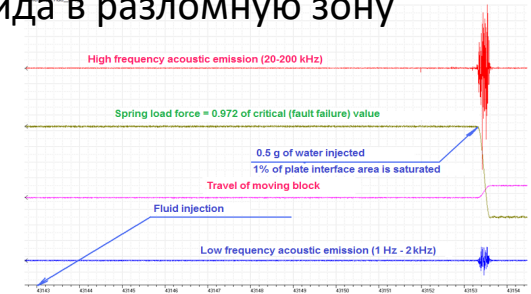
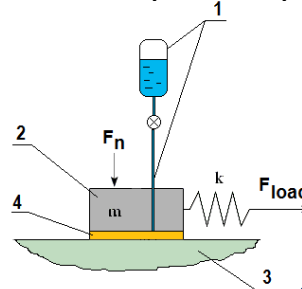
Количество землетрясений на территории Coso для пульсаций ГМП, зарегистрированных на FRN (1991-2024)



Количество землетрясений на территории Geysers для пульсаций ГМП, зарегистрированных на FRN (1991-2024)



Экспериментальные исследования влияния миграции флюида в разломную зону



Отклик микросейсмичности геотермальных полей на пульсации геомагнитного поля может указывать на миграцию флюида под воздействием электромагнитного поля, приводящую к инициированию землетрясений

Эффективность воздействия электрического тока на инициирование ЗТ (лабораторный эксперимент)

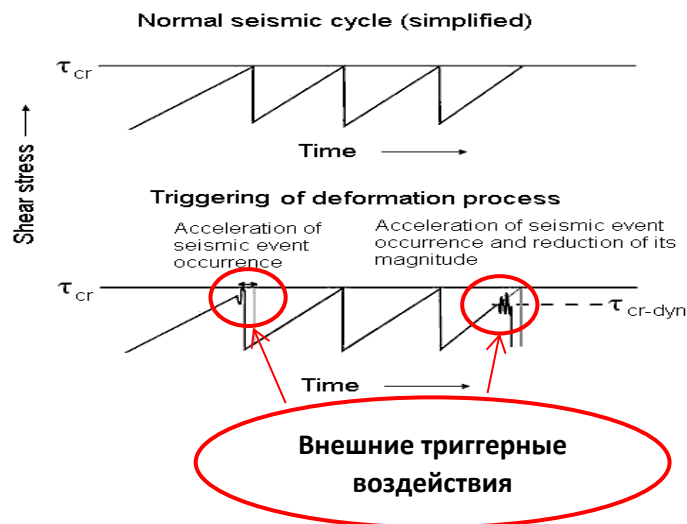
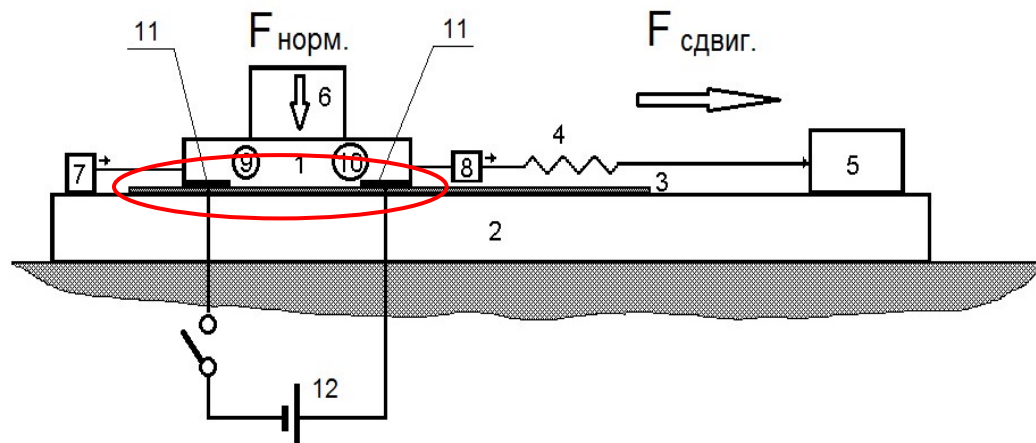
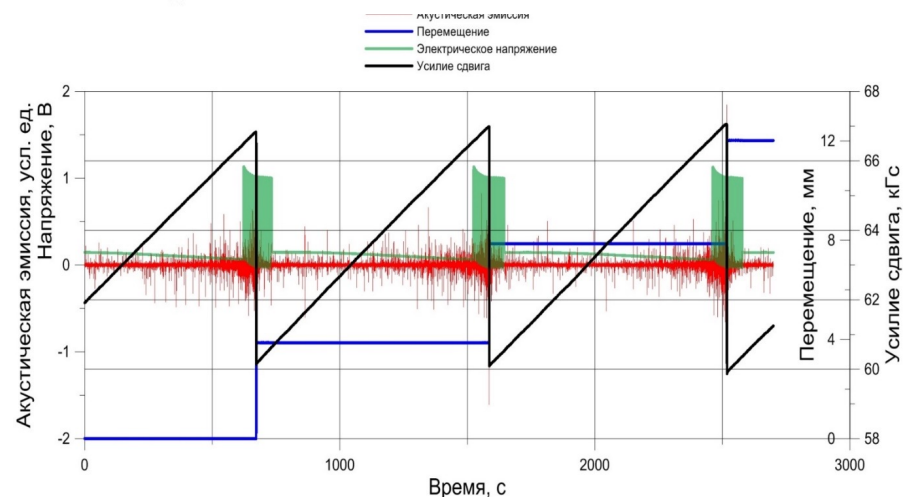


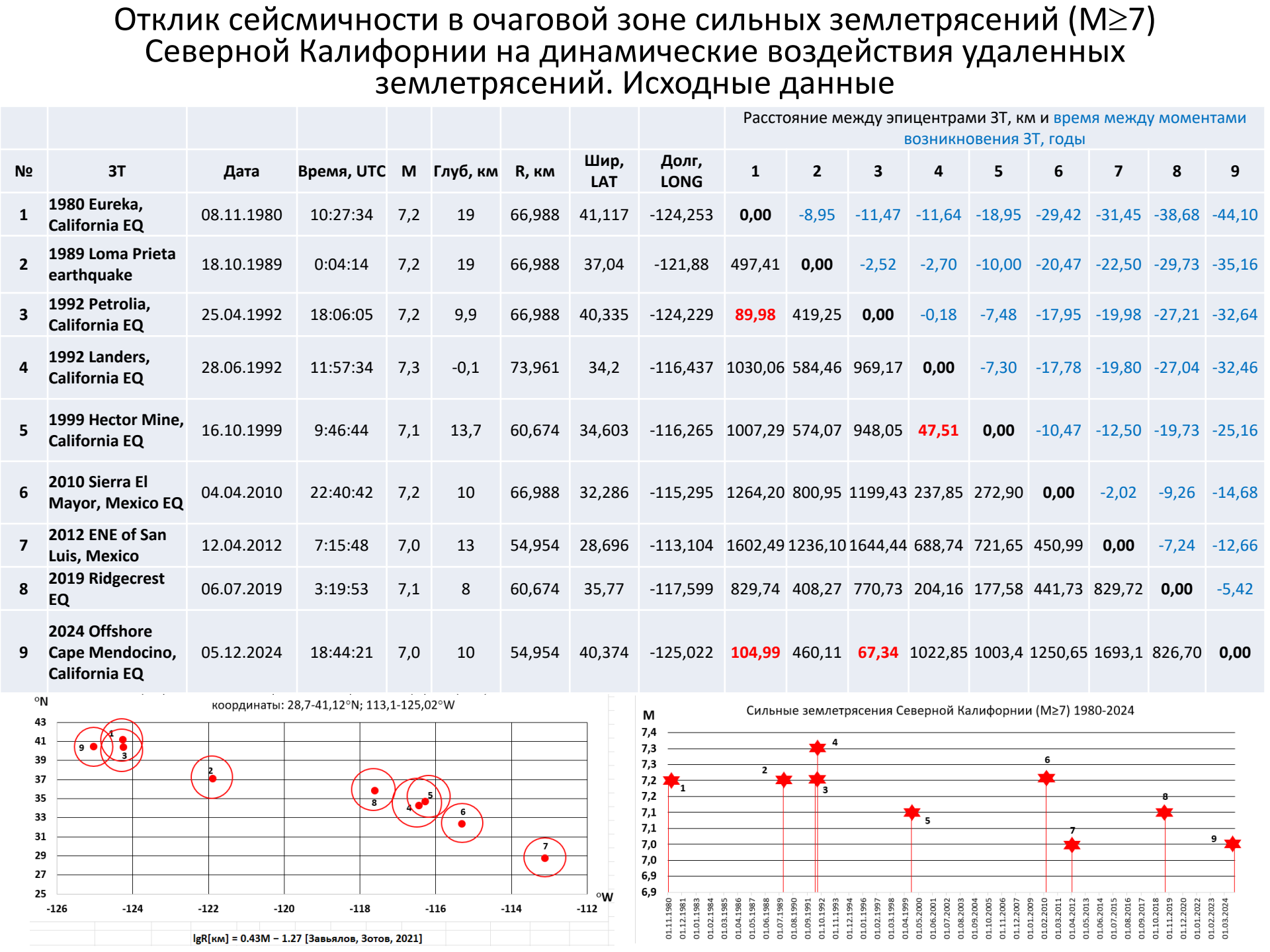
Схема электрического воздействия на контактную зону (модельный разлом земной коры) пружинно-блочной установки С-2



Пружинно-блочная модель разлома земной коры (слайдер С-2)



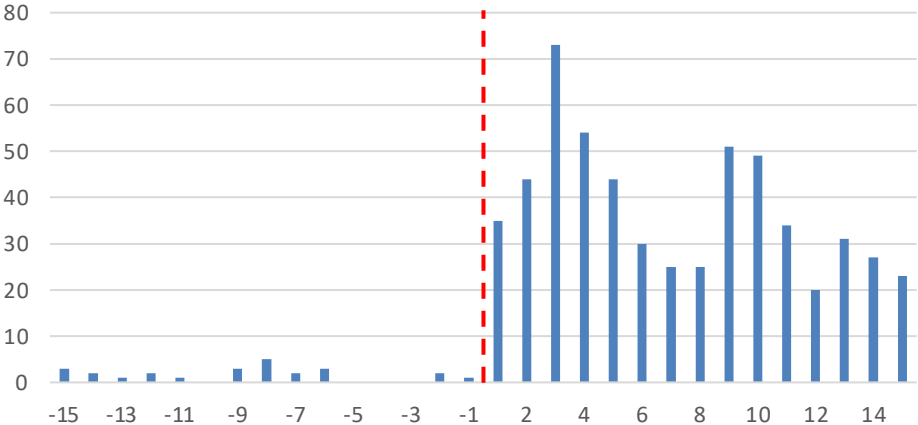
Иницирование лабораторного «землетрясения» импульсами постоянного электрического тока при $K_p=0,98-0,99$



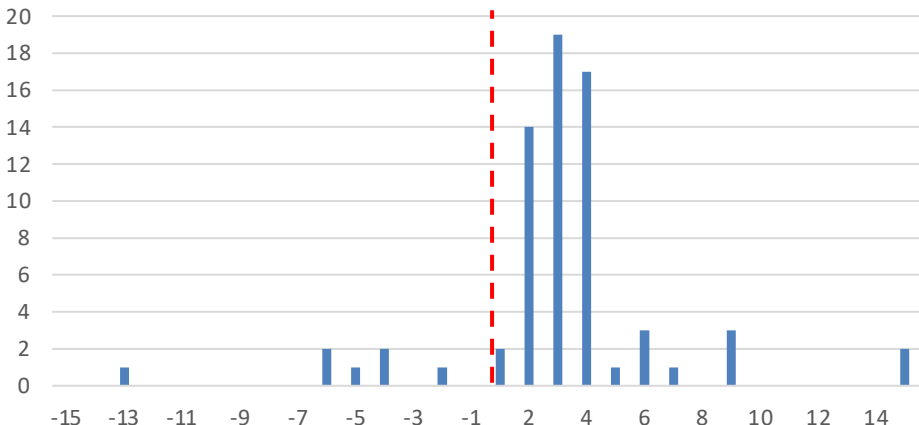
Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений (M≥7) Северной Калифорнии на динамические воздействия удаленных землетрясений. Результат анализа

					Na/Nb = отношение количества ЗТ в течение 15 суток после воздействия к количеству ЗТ в течение 15 суток до воздействия							
№	ЗТ	Дата	Время, UTC	M	1	2	3	4	5	6	7	8
6	2010 Sierra El Mayor, Mexico EQ	04.04.2010	22:40:42	7,2	0,5	0,17	2,33	1,5	8,86			
8	2019 Ridgecrest EQ	06.07.2019	3:19:53	7,1	1,33	1,38	1,24	22,60	0,6	0,82	1,75	
9	2024 Offshore Cape Mendocino, California EQ	05.12.2024	18:44:21	7,0	-	1,0	-	1,0	2,0	4,0	0,0	3,0

1992 Landers, California EQ
- 2019 Ridgecrest EQ

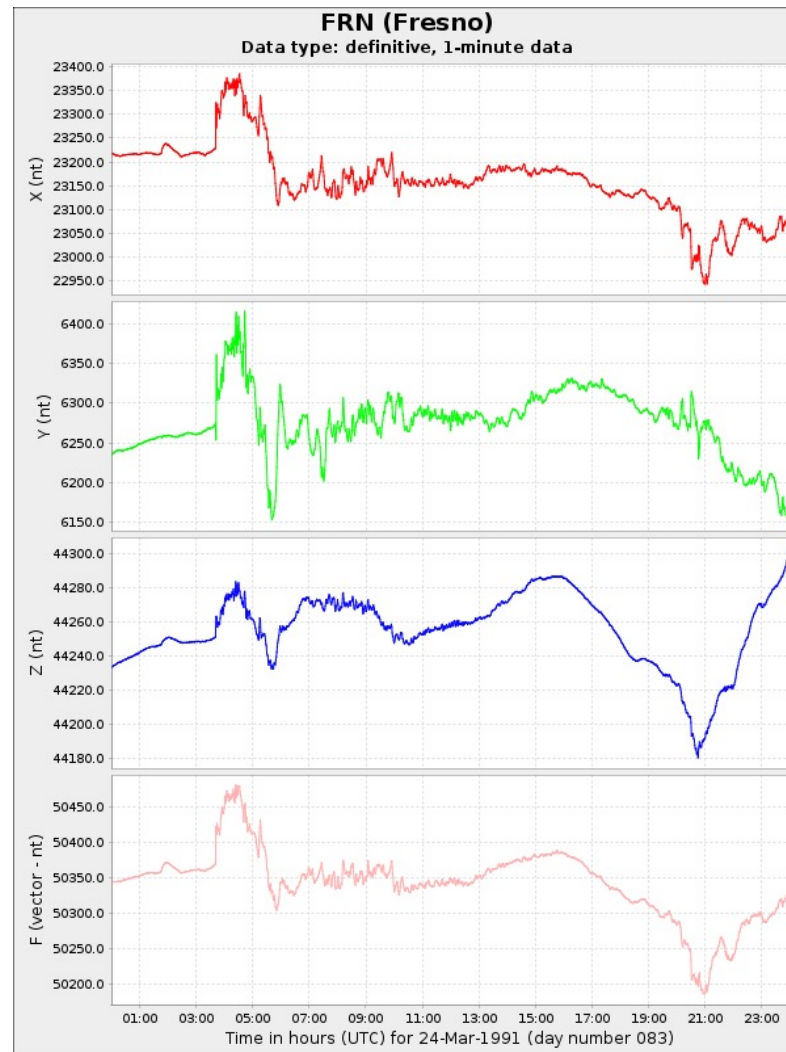


1999 Hector Mine, California EQ -
2024 Cape Mendocino, California EQ -



Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений ($M \geq 7$) Северной Калифорнии на сильные вариации геомагнитного поля (обсерватория Fresno). Исходные данные

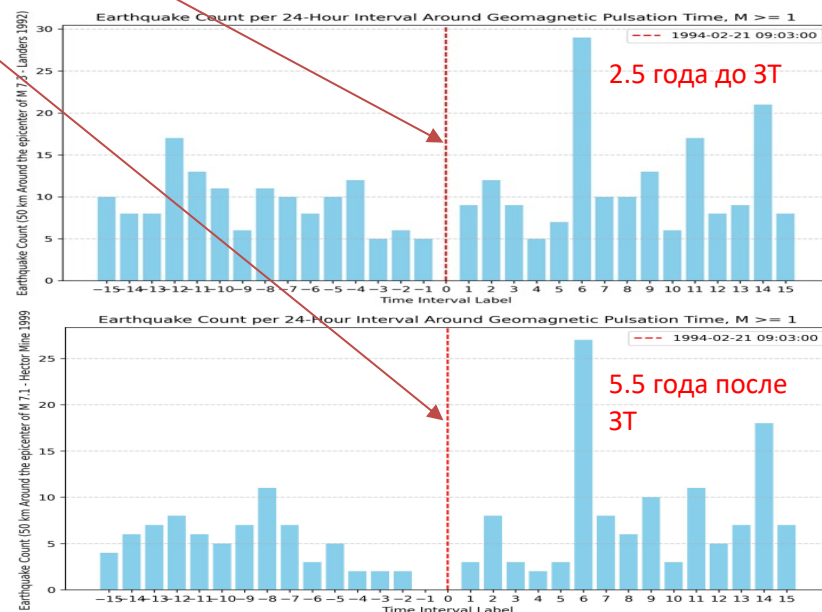
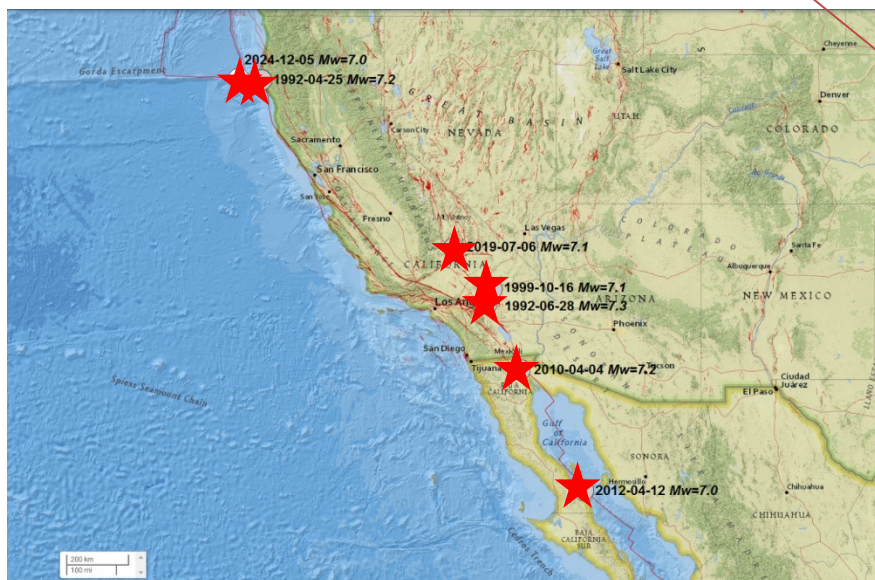
№	$ dBx/dt $, нТл/мин	Дата, ГГ-ММ-ДД	Время, UTC	K_p
1	86.8	1991-03-24	03:42:00	8
2	59.8	1991-06-05	16:53:00	8
3	56.3	1991-06-13	00:51:00	7
4	63.7	1991-10-28	15:38:00	8
5	77.1	1994-02-21	09:03:00	7
6	63.8	1998-05-04	07:40:00	9
7	51.8	2000-05-24	00:15:00	8
8	50.2	2000-06-08	09:12:00	7
9	56.0	2000-07-15	17:04:00	9
10	63.3	2001-03-31	00:53:00	9
11	50.6	2001-04-13	10:44:00	7
12	59.9	2001-11-06	01:53:00	9
13	56.6	2001-11-24	05:57:00	8
14	60.4	2002-05-23	15:46:00	8
15	51.3	2003-05-30	00:12:00	7
16	50.7	2003-10-29	06:45:00	9
17	50.4	2003-10-30	19:59:00	9
18	63.2	2004-11-07	18:29:00	8
19	60.5	2004-11-09	18:51:00	9
20	51.1	2005-01-21	20:58:00	8
21	53.6	2005-09-11	05:38:00	8
22	53.8	2024-05-10	22:04:00	9
23	68.2	2024-05-11	01:31:00	9
24	62.3	2024-10-10	23:12:00	9



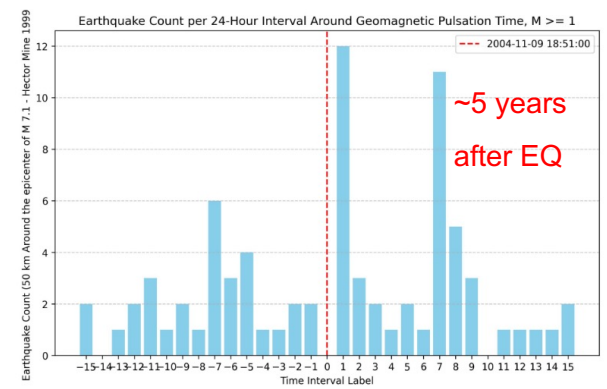
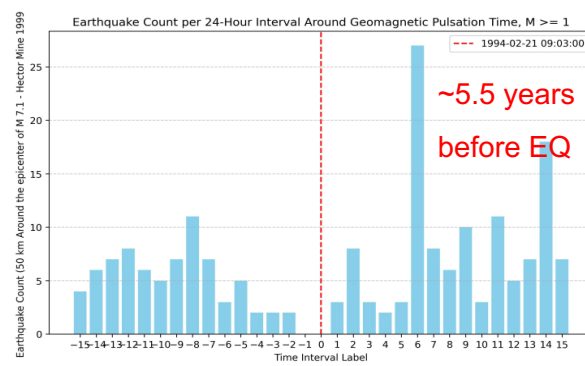
Для анализируемого периода 1991-2024 г.г. значения $K_p \geq 7$ наблюдались в течение 322 суток (данные Центра Гельмгольца, Потсдам, Германия), однако только в 24 случаях значение $|dBx/dt|$ превышало 50 нТл/мин.

Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений ($M \geq 7$) Северной Калифорнии на сильные вариации геомагнитного поля (обсерватория Fresno). Результаты анализа

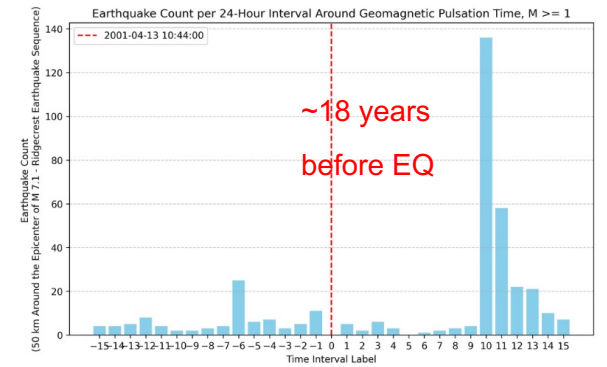
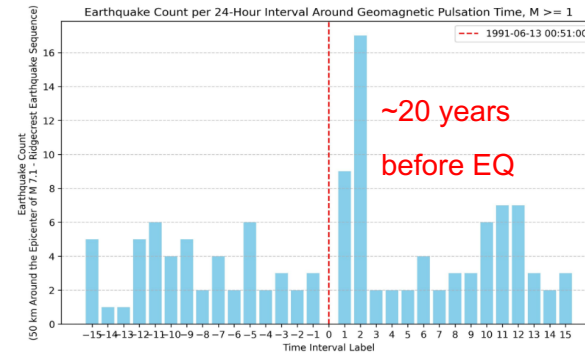
N	Earthquake	Date	Time, UTC	Magnitude	Depth, km	Latitude, °N	Longitude, °W
1	The 1992 Petrolia, California Earthquake	1992-04-25	18:06:05	7.2	9.9	40.335°N	124.229°W
2	The 1992 Landers, California Earthquake	1992-06-28	11:57:34	7.3	-0.1	34.200°N	116.437°W
3	The 1999 Hector Mine, California Earthquake	1999-10-16	09:46:44	7.1	13.7	34.603°N	116.265°W
4	The 2010 Sierra El Mayor, B.C., Mexico Earthquake	2010-04-04	22:40:42	7.2	10.0	32.286°N	115.295°W
5	69 km ENE of San Luis, Mexico	2012-04-12	07:15:48	7.0	13.0	28.696°N	113.104°W
6	Ridgecrest Earthquake Sequence	2019-07-06	03:19:53	7.1	8.0	35.770°N	117.599°W
7	2024 Offshore Cape Mendocino, California Earthquake	2024-12-05	18:44:21	7.0	10.0	40.374°N	125.022°W



Hector Mine Earthquake, M=7.1, 1999-10-16



Ridgecrest Earthquake Sequence, M=7.1, 2019-07-06

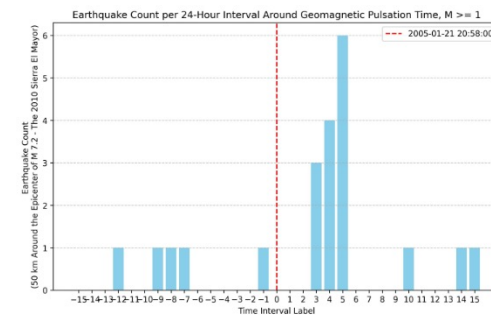
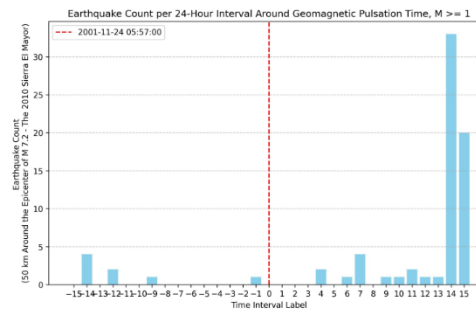
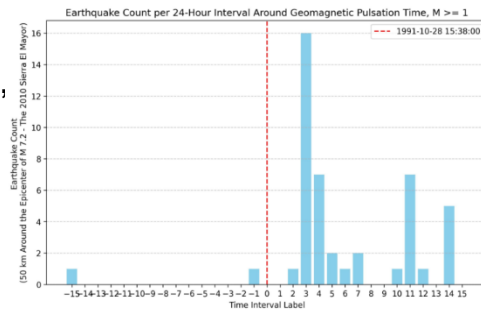


~18.5 years before EQ

~9 years before EQ

~5 years before EQ

Sierra El Mayor, B.C., Mexico Earthquake, 2010-04-04, M7.2



Выводы

- 1) Динамические и электромагнитные воздействия на очаговые зоны сильных землетрясений ($M > 7$) Северной Калифорнии приводят к росту их сейсмической активности до момента возникновения сильного землетрясения.
- 2) По аналогии с лабораторными экспериментами рост сейсмической активности после внешних воздействий может указывать на подготовку сильного сейсмического события.
- 3) В ряде случаев отмечается увеличение числа слабых землетрясений в очаговой зоне будущего сильного землетрясения после воздействий по мере приближения к моменту его возникновения, что может служить индикатором уровня напряженно-деформированного состояния очаговой зоны.
- 4) Тем не менее, для окончательного вывода о возможности использования триггерных динамических и электромагнитных воздействия как индикатора напряженно-деформированного состояния земной коры в очаговой зоне будущего сильного землетрясения необходим дополнительный анализ для более слабых воздействий ($M < 7$, $|dB_x/dt| < 50$ нТл/мин) и для других регионов.

**Спасибо
за внимание!**