

Взаимосвязь динамики тропических циклонов и землетрясений во время афтершоков Landers-92

В.М. Костин¹, О.Я. Овчаренко¹, Е.П. Трушкина¹

¹ Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской Академии наук
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе 4
E-mail: kostin@izmiran.ru

Рассматриваются фрагменты отдельных аномальных событий во всех геосферах Земли после землетрясения Ландерс 7.3 M_w с 28 июня по 17 сентября 1992. Показано, что 29 июня сильнейший афтершок вызвал аномальные возмущения в ионосфере по данным спутника Космос-1809 и вторичное усиление урагана Селия. Последующие афтершоки привели к резкой интенсификации тропических возмущений в Тихом океане около Америки. Число ураганов на порядок превысило число штормов. Показана корреляционная связь возникших тропических циклонов (ТЦ) с литосферными землетрясениями. Особенности коровых землетрясений проанализированы при прохождении урагана Андрю через п-ов Флорида, урагана Лестер через п-ов Калифорния и урагана Иники через Гавайские о-ва. Цепь аномальных событий привела 2 сентября к более сильному землетрясению 7.7 M_w в Никарагуа. Новая цепь взаимосвязанных аномальных событий во всех геосферах Земли произошла после экспериментов Hunters Trophy (18 сентября) и Divider (23 сентября) на полигоне Невада.

Ключевые слова: спутник Космос-1809, верхняя ионосфера, ДЗЗ, мощные источники.

Введение

30 лет назад произошло землетрясение Landers-92, которое вызвало широкое обсуждение. На сайте Геологической службы США (USGS) приведены ссылки на ~ 500 работ. Одна из наиболее цитируемых работ - [Hauksson et al., 1993].

В ряде работ рассмотрены взаимосвязи отдельных мощных процессов в различных геосферах. Одним из глобальных индикаторов таких процессов является ионосфера [Данилов и др., 1987]. Воздействие землетрясений и их предвестников на ионосферу рассмотрены во многих работах, например, [Гохберг и др., 1983; Гохберг, Шалимов, 2008; Сурков, 2000; Сорокин, Чмырев, 2002; Пулинец и др., 2015; Беляев, Костин, 2015; Schekotov et al., 2006; Наукава, 2015]. В теоретических работах [Абурджания, 2006; Абурджания и др., 2013] было показано, что сильные акустические волны в атмосфере, в частности после землетрясений, при учете неоднородного стратосферного ветра и магнитного поля могут самоорганизовываться в отдельные вихри и цепочки вихревых структур. Эти выводы были подтверждены при акустическом воздействии подземных ядерных взрывов (ПЯВ) США, Франции и Китая на тропические возмущения [Костин и др., 2022; Kostin et al., 2020; 2021].

Усиленные до ураганной силы тропические возмущения вызывают литосферные землетрясения [Костин и др., 2022; Костин и др., 2022a]. Анализ сейсмических колебаний с периодами от 20 до 50 секунд на 2800 станций США за 2006-2015 годы выделил 14077 дискретных импульсных источников эквивалентных землетрясениям $M \sim 3.5$ и длительностью до нескольких суток, которые были связаны со штормами в шельфовых зонах Северной Америки [Fan et al., 2019]. Ранее, была показана связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере, например, [Швед и др., 2018].

Анализ форшоков землетрясения Ландерс показал, что их число коррелирует с запуском ракеты Атлас 2А с Западного космодрома и ПЯВ Galena в Неваде. Представлено в

презентации к докладу [Костин и др., 2022a].

В настоящем докладе рассмотрены корреляционные связи тропических циклонов (ТЦ), возникших после ПЯВ Galena и афтершоков Ландерс, не только на глобальную сейсмическую активность, но и обратное влияние ТЦ на афтершоковую активность около разлома Сан Андреас.

Взаимосвязь эксперимента Galena и землетрясения Ландерс

Около побережья Центральной Америки 21 июня в Тихом океане началось формирование тропических депрессий Blas и Celia [Lawrence and Rappaport, 1994], а в Атлантическом океане в середине Карибского моря формирование плохо организованной конвективной зоны, позднее ТЦ One.

После эксперимента Galena 23 июня, состоящего из трех одновременных ПЯВ каждый эквивалентом ~ 5 кт, все три ТЦ изменили вектор своего движения (рис.1). Произошло взрывное усиление Blas до тропического шторма, облачная структура One сфокусировалась в тропическую депрессию. ТЦ One 24 и 25 июня вызвал сильнейшие за 100 лет осадки во Флориде и на западе Кубы. ТЦ Blas диссипировал 24-25 июня на пути движения ТЦ Celia.



Рис. 1. Схема интенсификации тропических возмущений после ПЯВ и момент воздействия урагана Селиа на землетрясение Ландерс, стрелки от источника к очагу.

Отдельные землетрясения с 28 июня по 17 сентября 1992

Землетрясение Landers $7.3 M_w$ произошло 28-06-1992 в горах на глубине 1.09 км к востоку от главного разлома Сан-Андреас. Большинство афтершоков произошло на глубине до 5 км. Отдельные авторы считают, что сильнейшим форшоком было землетрясение Joshua Tree $6.1 M_w$ 23 апреля в 27 км южнее [Hauksson et al., 1993]. В этой работе представлена система мелких разломов Южной Калифорнии и показано, что сильный толчок $6.3 M_w$ через 3 часа после Landers произошел в соседней трещине в 35 км западнее около Big Bear, а сильнейший афтершок $5.7 M_w$ произошел через 26 часов (табл. 1, 2 и 3).

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения $M_w > 5.0$ на разломе Сан Андреас 28.06-17.09.1992

№	Магнитуда (M_w)	Дата 1992	Местонахождение	Время (UT)	Эпицентр (°с.ш./°в.д.)	Глубина, км
1	7.3	28-6	Landers	11:57	34.2 / -116.44	-0.1
2	5.8		Yucca Valley	12:00	34.131 / -116.408	-1.1
3	5.7		Joshua Tree	12:01	34.12 / -116.323	5.7
4	5.5		Yucca Valley	12:36	34.115 / -116.426	7.5
5	5.4		Yucca Valley	12:40	34.341 / -116.511	4.4
6	5.5		Big Bear Lake	14:43	34.162 / -116.852	9.6
7	6.3	28	Big Bear Lake	15:05	34.203 / -116.83	3.6
8	5.3		Big Bear Lake	17:05	34.255 / -116.912	6.6
9	5.7	29	Yucca Valley	14:08	34.105 / -116.403	9.6
10	5.1		Yucca Valley	14:13	34.105 / -116.39	11.2
11	5.3	1-7	Yucca Valley	07:40	34.33 / -116.464	5.1
12	5.4	5	Ludlow	21:18	34.583 / -116.322	4.9
13	5.2	17-8	Big Bear Lake	20:41	34.195 / -116.863	9.4
14	5.3	15-9	Yucca Valley	08:47	34.064 / -116.361	7.2

Таблица 2. Землетрясения, вызвавшие усиление тропических возмущений в середине 1992

№	Дата	Землетрясение				Тропический циклон				
		M_w	Центр °с.ш./°в.д.	Время (UT)	Глубина h, км	Имя	Центр °с.ш./°в.д.	Ветер км/час	Δt , час	s, км
1	29 июнь	5.7	34.1/-116.4	14:08	9.6	Celia	18/-120	138	~ 2	1825.5
2	1 июль	5.3	34.3/-116.5	07:40	5.1	Darby	12.5/-95.0	46	4.3	3253.9
3	8 июль	5.2	7.4/126.8	23:09	52.9	Ely	13/136	35	1	1883.4
4	9 июль	4.9	34.2/-116.8	01:43	-1.9	Estelle	11.7/-108.4	46	4.3	2642.6
5	13 июль	4.7	12.7/-89.2	03:41	93.2	Frank	14.1/-105.8	46	2.3	1801.8
6	13 июль	6.3	-3.9/-76.6	18:11	96.5	Georgette	10.8/-94.2	46	18	2542.8
7	15 июль	5.6	1.3/123.2	06:34	44.1	TS Faye	18.9/117.6	46	17.5	2049.9
8	18 июль	6.0	39.3/143.0	21:18	36.7	Gary	14.9/124.8	46	2.7	3242.2
9	20 июль	4.7	35.0/-116.9	13:13	-0.8	Georgette	18.1/-117.4	138	4.8	1879.7
10	24 июль	5.5	-11.9/166.2	18:15	57.5	TS Helen	25/157.2	46	24	4017.4
11	24 июль	4.8	29.3/90.2	06:24	33	TC 04B	17/87.1	46	30	1409.7
12	26 июль	4.5	-7.8/-97.4	04:15	229	TS Howard	13.1/-114.1	46	2	2966.9
13	27 июль	5.2	50.2/-130.1	04:21	10.0	TS Isis	14.4/-106.1	46	19.7	4531.9
14	29 июль	5.1	-29.5/-72.8	18:31	10.0	Javier	12.3/-103.6	46	23.5	5701.6
15	31 июль	5.4	10.1/126.2	14:02	47.6	Irving	22.8/131.2	46	10	1508.9
16	2 авг	6.3	-0.9/127.6	05:50	18.9	Irving	26.1/131.7	64	6	3034.2
17	2 авг	6.6	-7.1/121.7	12:03	485.9	Janes	10/145.7	46	9.5	3267.7
18	4 авг	6.4	-12.1/166.6	21:08	91	Kent	9.8/169.4	55	18	2454.6
19	14 авг	5.2	24.1/121.7	17:26	15.1	TS Lois	15.8/129.3	46	12.5	1216.9
20	14 авг	5.2	24.1/121.7	17:26	15.1	TS Mark	19.7/117.5	46	13	653.4
21	15 авг	5.9	5.1/-75.6	19:02	119	Andrew	10.8/-35.5	46	25	4457.4
22	17 авг	4.9	-3.7/151.7	10:09	358.7	TS Nina	27.6/158.3	46	8	3551.4
23	17 авг	5.2	34.2/-116.9	20:41	9.4	TS Kay	19.1/-111.4	46	9	1374.5
24	18 авг	4.6	19/-106.7	03:55	20.7	Lester	15.5/-106.0	46	44	396.2
25	24 авг	6.2	42.0/140.7	06:59	120.5	Omar	8.6/155.4	55	5	3983.5
26	25 авг	5.0	-5.5/146.7	06:58	235.9	TS Polly	17.4/136.9	46	5	2764.4
27	27 авг	4.0	18.2/-101.4	08:11	96.1	TS Madeline	12.9/-123.4	55	10	2427.2
28	27 авг	4.0	18.2/-101.4	08:11	96.1	TS Newton	11.1/-107.3	46	3.9	1012.6
29	31 авг	4.8	14.2/145.2	10:06	33	Ryan	17.1/149.6	64	14	570.8
30	2 сент	7.7	11.7/-87.3	00:16	44.8	Orlene	9.9/-102.5	55	18	1671.9
31	5 сент	5.5	-3.9/142.6	20:06	43.3	Sibyl	20.7/166.4	55	28	3770.9
32	5 сент	6.0	12.0/-87.3	21:48	10.0	Iniki	11.9/-135.9	46	2.3	5279.4
33	10 сент	5.9	10.2/-86.5	15:03	26.5	Paine	18.7/-112.8	55	9	2980.9
34	13 сент	5.6	11.6/-86.7	10:53	27.8	Roslyn	16.8/-111.0	46	1	2680.2

Землетрясения в табл.2 выбирались из общего каталога USGS – сильнейшие и ближайšie к ТЦ на стадии начала их интенсификации. ТЦ усилившиеся только до стадии шторма отмечены как TS. Предпоследняя колонка Δt (час) дает оценку начала

самоорганизации тропического возмущения после землетрясения. Так как использовались каталоги ТЦ с опросностью через 6 час, то эта оценка может быть занижена на несколько часов. Последняя колонка $s(\text{км})$ – удаление центра ТЦ от очага землетрясения.

Таблица 3. Сильнейшие $M \geq 6.3$ землетрясения 28.06-17.09.1992

№	Магнитуда (M_w)	Дата 1992	Местонахождение	Время (UT)	Эпицентр (°с.ш./°в.д.)	Глубина, км
1	7.3	28-6	Ландерс, Калифорния	11:57	34.2 / -116.44	-0.1
2	6.3	28	Биг Биар, Калифорния	15:05	34.2 / -116.83	3.6
3	6.5	10-7	Курильск, Россия	9:31	44.69 / 149.48	19.9
4	7.2	11	о-ва Фиджи	10:44	-22.48 / -178.41	377.2
5	6.3	13	Перу	18:11	-3.92 / -76.6	96.5
6	6.9	18	Ямада, Япония	8:36	39.41 / 143.33	28.6
7	6.4	18	Ямада, Япония	10:20	39.44 / 143.03	26.7
8	6.7	20	Свалбард	7:46	78.56 / 5.52	10
9	6.3	2-8	Софифи, Индонезия	5:50	-0.88 / 127.58	18.9
10	6.6	2	Маумере, Индонезия	12:03	-7.12 / 121.74	485.9
11	6.4	4	о-ва Соломон	21:08	-12.13 / 166.59	91
12	6.9	7	Якутат, Аляска	18:19	57.59 / -142.85	13.6
13	6.4	11	о-ва Изу, Япония	15:14	32.54 / 141.64	15.5
14	6.3	16	Папуа новая Гвинея	10:23	-5.37 / 146.67	215.2
15	7.3	19	Токтогул, Киргизия	2:04	42.14 / 73.57	27.4
16	6.3	19	Токтогул, Киргизия	3:12	42.11 / 73.26	21.1
17	6.6	19	Токтогул, Киргизия	3:20	42.1 / 73.24	18.5
18	6.9	28	о-в Аксеншен	18:18	-0.96 / -13.56	15.5
19	6.3	29	Япония	19:19	33.19 / 137.97	289.4
20	6.4	30	Левука, Фиджи	20:09	-17.92 / -178.71	565
21	7.7	2-9	Коринто, Никарагуа	00:16	11.74 / -87.34	44.8
22	6.7	2	Тубан, Индонезия	5:50	-6.05 / 112.14	624.6
23	6.4	11	Кабало, Конго	3:57	-6.08 / 26.65	10.6
24	6.3	15	Сола, Вануату	21:03	-14.05 / 167.26	184.2

Развитие тропических циклонов с июня по 17 сентября 1992

Траектории ТЦ в Атлантическом и восточной части Тихого океанов, а также очаги землетрясений, вызвавших их *табл.2*, приведены на *рис.2*. Начало усиления ТЦ отмечено жирной синей точкой с указанием номера из *табл.2*. Кроме очагов землетрясений из *табл.2* – синий кружок с точкой, приведены также сильнейшие землетрясения из *табл.3* – красный кружок с точкой и номером из таблицы.

Аномальное усиление тропических возмущений до ураганной силы, число которых на порядок превышает число штормов, обычно - соотношение противоположное, связано с тремя областями сейсмической активности:

1. Область афтершоков землетрясения Ландерс – номера 2, 4, 9 и 23 (*табл.2*).
2. Южнее, в Мексике – номера 24, 27 и 28.
3. Никарагуа – номера 5,30,32,34 и 34, где произошло сильнейшее землетрясение 7.7 M_w № 21 (*табл.3*).

Остальные, скорее всего, связаны с отдельными сильными землетрясениями вдоль Перу-Чилийского разлома.

Траектории ТЦ в западной части Тихого и Индийского океанов, а также очаги землетрясений с обозначениями аналогичными *рис.2* приведены на *рис.3*.

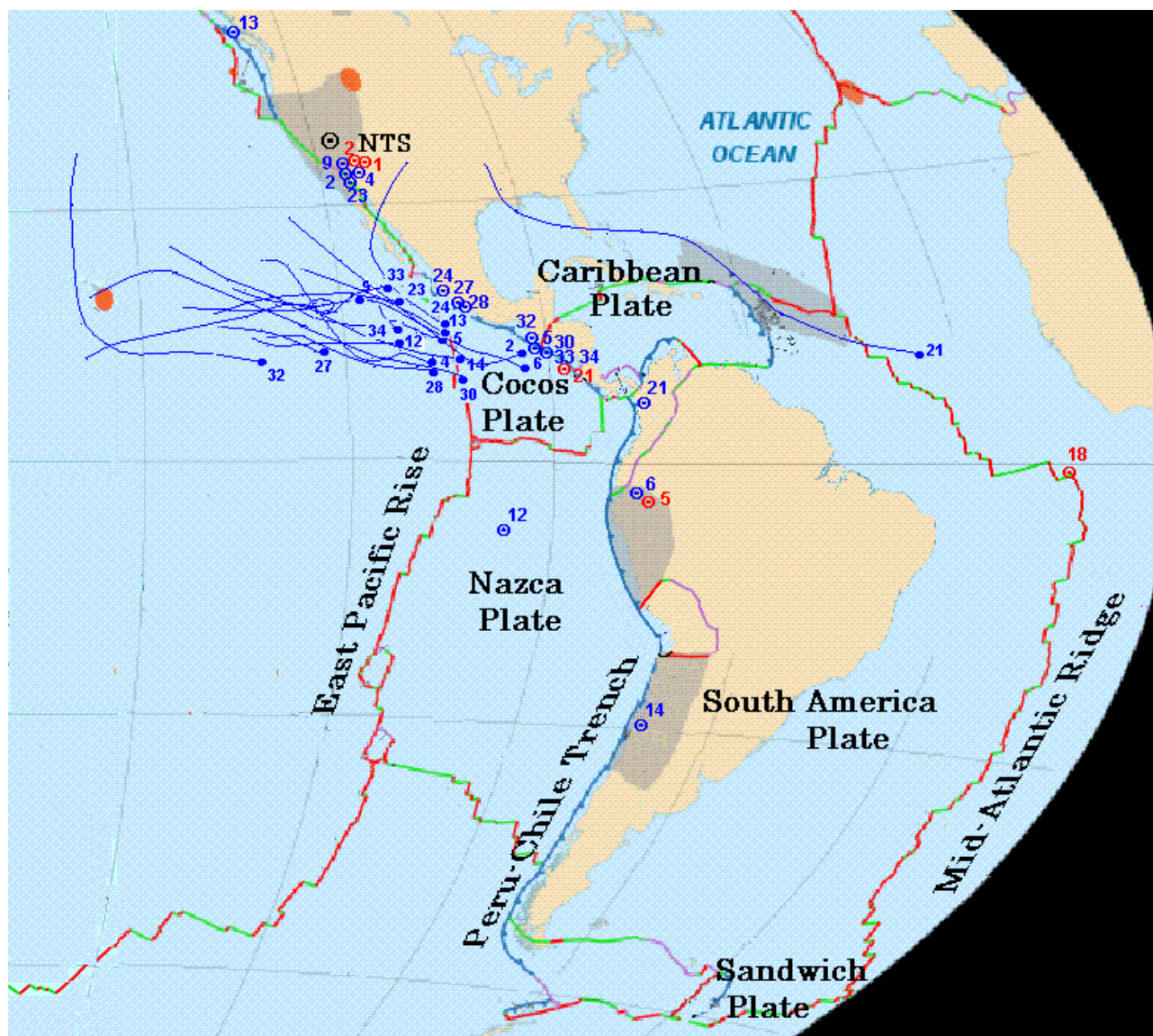


Рис. 2. Траектории ТЦ с 1 июля по 17 сентября 1992. Жирная синяя точка с номером (табл.2) – начало интенсификации тропического возмущения. Синий кружок с точкой и номером – эпицентр землетрясения, вызвавшего развитие ТЦ. Красный кружок с номером (табл.3) – эпицентр сильного землетрясения.

Так как большинство сильных землетрясений и землетрясений, вызвавших развитие ТЦ (рис.1 и 2), расположены вдоль разломов, окружающих Тихоокеанскую плиту, то ниже на рис.5-7 приведена динамика интенсивности ТЦ совместно с гистограммами \log суммы энергии литосферных землетрясений за сутки в тераджоулях (ТДж) на различных разломах и $\ln(N)$. Где N-число суточных афтершоков после землетрясения Ландерс на основных, локальных разломах (рис.4).

Е-энергия отдельных землетрясений вычислялись из формулы

$$M_w = 2/3 (\lg E - 4.8) \quad (1)$$

Для землетрясений на разломе Сан-Андреас учитывались толчки $M_w \geq 2.5$, а для литосферных землетрясений учитывались толчки $M_w \geq 4.5$ глубиной $h > 20$ км. С 28 июня по 17 сентября рассмотрено 3034 толчка на разломе Сан-Андреас и свыше 1000 землетрясения $M_w \geq 4.5$.

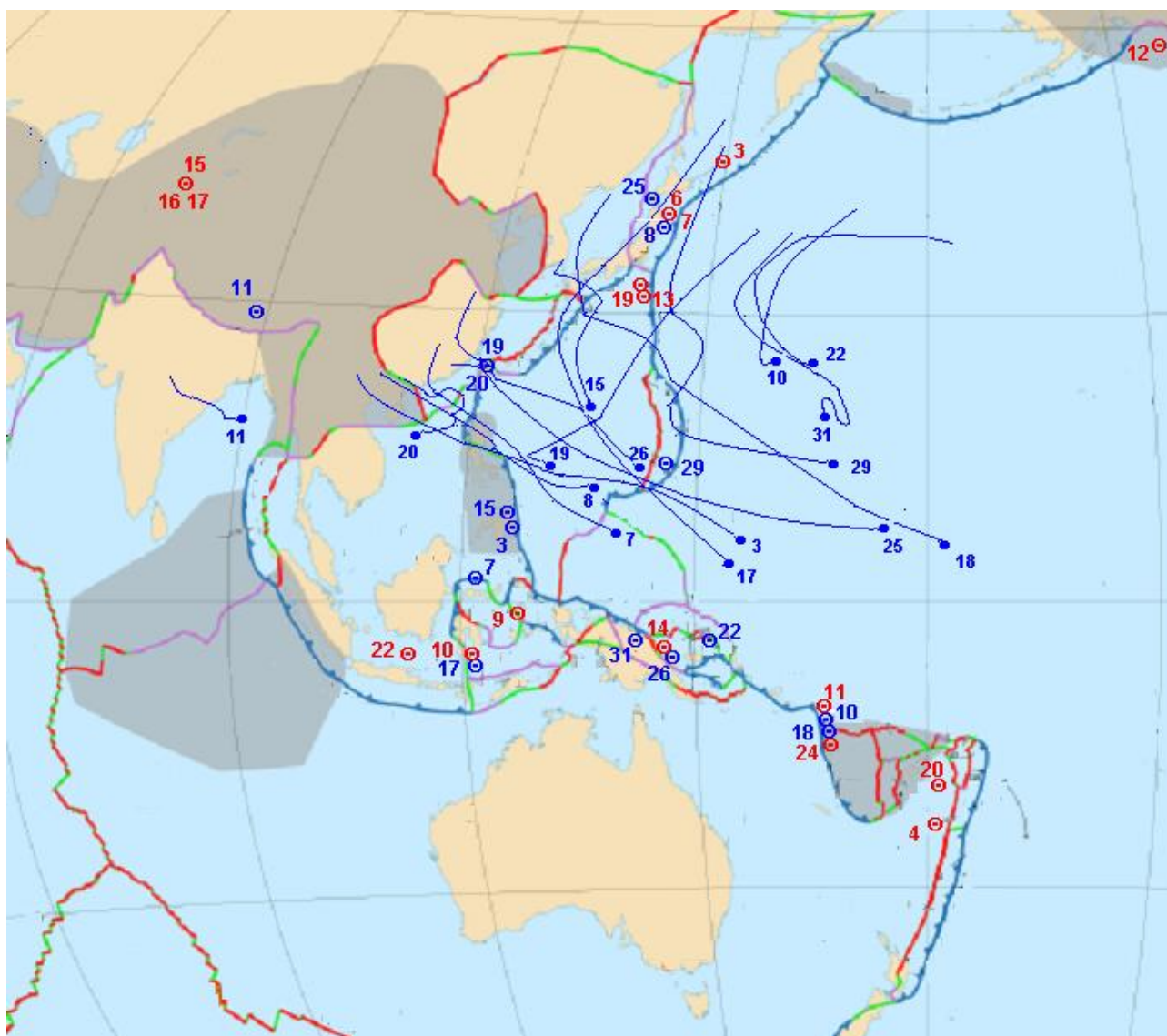


Рис. 3. Траектории ТЦ с 1 июля по 17 сентября 1992. Жирная синяя точка с номером (табл.2) – начало интенсификации тропического возмущения. Синий кружок с точкой и номером – эпицентр землетрясения, вызвавшего развитие ТЦ. Красный кружок с номером (табл.3) – эпицентр сильного землетрясения.

Обычно, образование тропических возмущений в Атлантическом и восточной части Тихого океанов (рис.2) происходило благодаря тропическим волнам, стартующим из Африки [Lawrence, Rappaport, 1994].

Формирование же тропических возмущений в западной части Тихого и Индийского океанов (рис.3) обычно происходило в конце муссонных желобов [Mautner, Guard, 1992]. Дальше они начинали перемещаться вдоль оси муссона и могли усилиться до тропической депрессии и тропического шторма только через несколько дней. Причем, важную роль играло наличие в регионе сильного ТЦ, который взаимодействовал с ними.

Выбор землетрясений, акустическое воздействие которых могло резко усилить самоорганизацию тропических возмущений (табл.2), как рассматривалось в работах [Абурджания, 2006; Абурджания и др., 2013], не учитывало эти особенности.

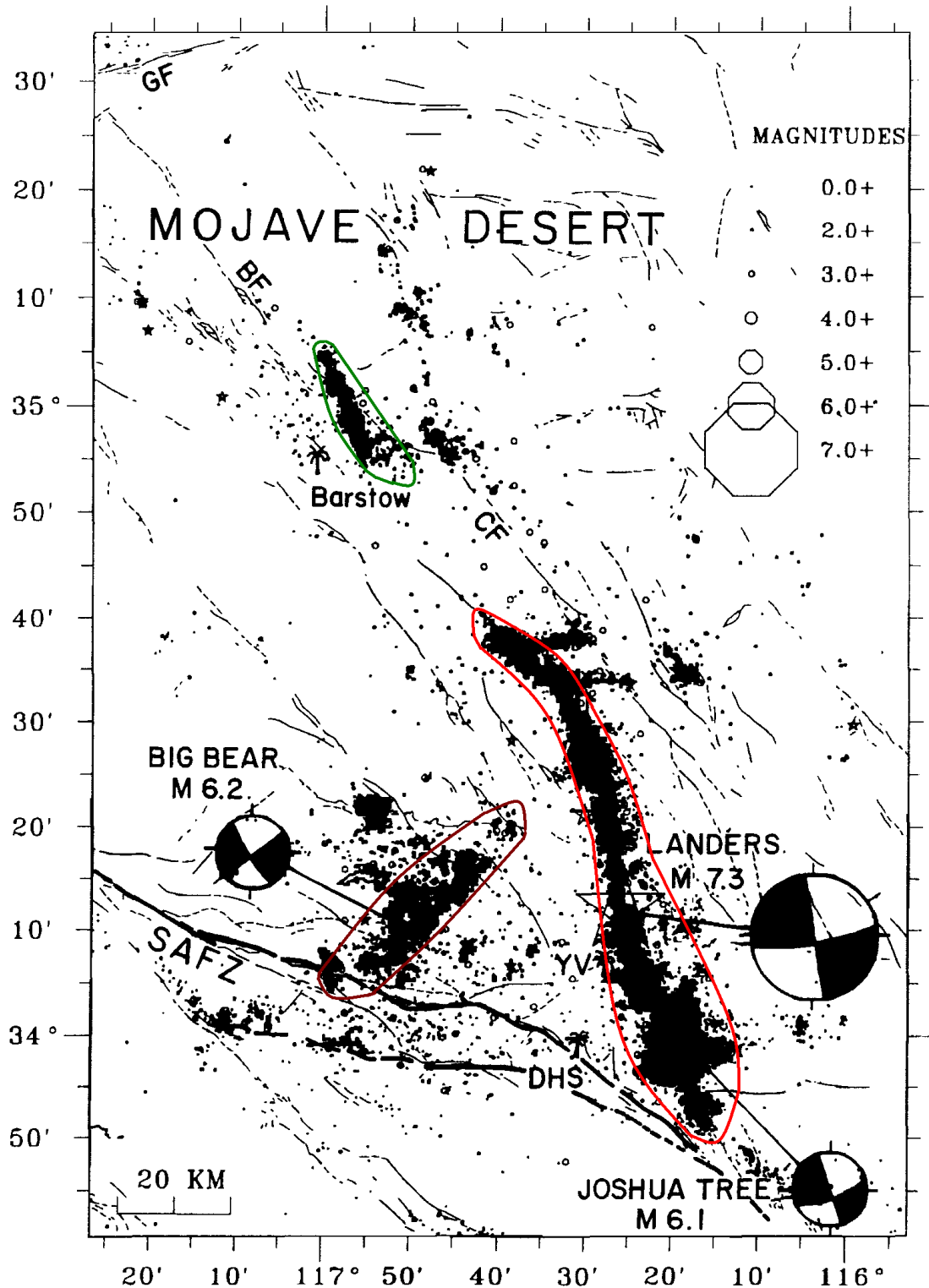


Fig. 4. Landers aftershock region showing all earthquakes recorded by the SCSN from April to December 1992, and major faults (dotted if inferred) from Jennings [1975]. Lower-hemisphere, first-motion focal mechanisms, compressional quadrant shaded, of the three main earthquakes are also shown. BF, Blackwater fault, CF, Calico fault, YV, Yucca Valley, GF, Garlock fault, SAFZ, San Andreas fault zone, and DHS, Desert Hot Springs. Earthquakes of $M \geq 4.0$ are shown by stars.

Рис. 4. Взят из работы [Hauksson et al., 1993].

На разломах Landers, Big Bear и Barston различными цветами выделены области, в которых рассчитывалось по данным USGS число афтершоков $M_w \geq 2.5$ за день и соответствующий \ln представлен на верхней панели рис.5.

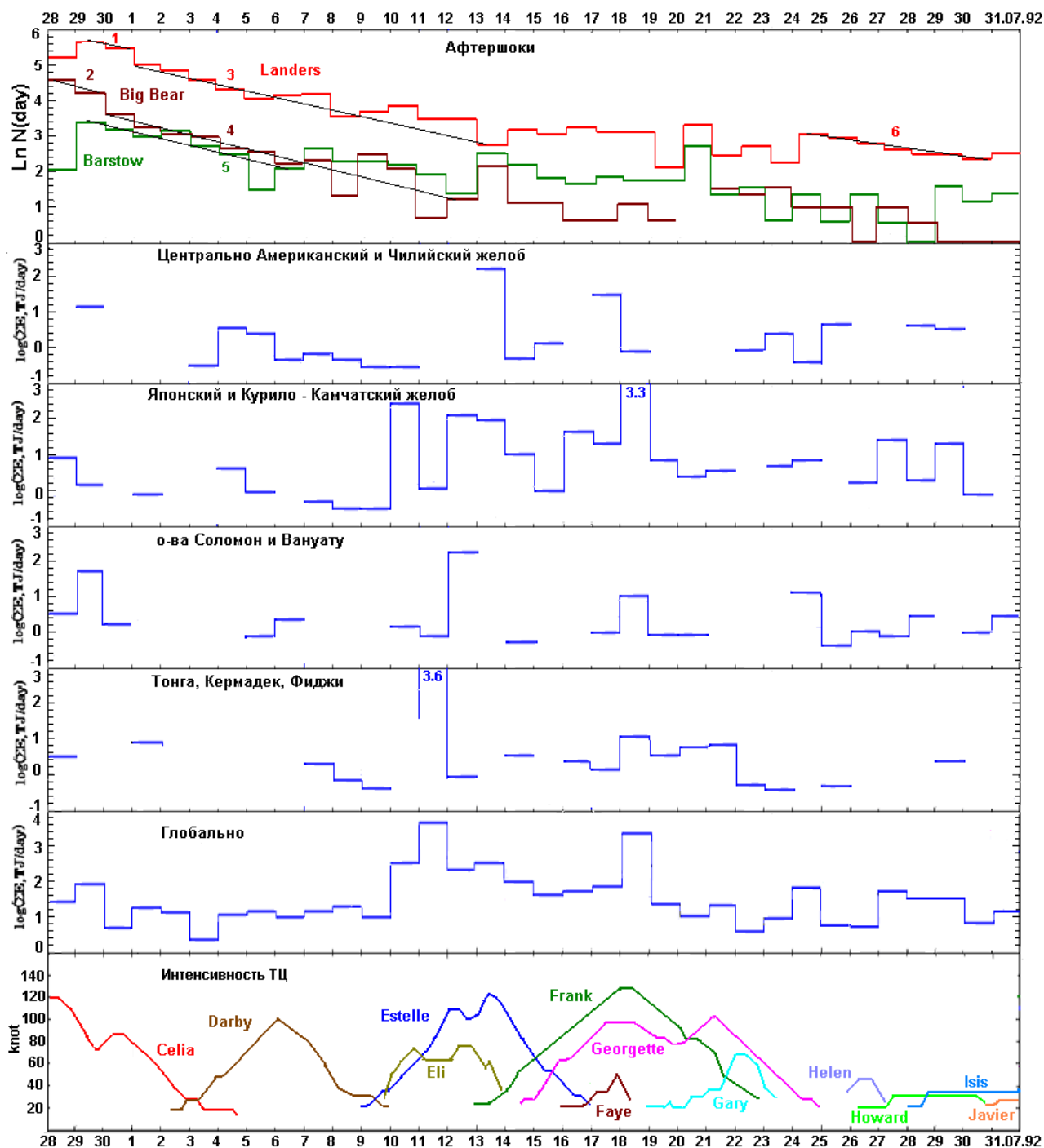


Рис. 5. Интенсивность тропических циклонов и энергия литосферных землетрясений за день.

После главного удара Ландерс афтершоковая активность до 1 июля сопровождалась ударами с магнитудой большей 5.1 (10 событий, табл.1) и сотней более слабых ударов $M_w > 2.5$, верхняя гистограмма рис.5. В это время вблизи Калифорнии развивался ураган Celia. Следующий в этом регионе ураган Darby был стимулирован сильным афтершоком 1 июля (табл.2). 5 июля на заключительной стадии интенсификации урагана произошел сильный удар в соседней трещине Ludlow (№ 12, табл.1).

Сильнейшая сейсмическая активность начала развиваться на Японском и Курило-Камчатском желобе (рис.5, табл.3) после прохождения 10 июля тайфуна Eli через Лусон, Филиппины и на фазе резкого усиления ураганов Estelle, Frank и Georgette 18 июля.

Разрывы в гистограммах на *рис.5-7* связаны с тем, что в эти дни на разломах не было землетрясений $M \geq 4.5$.

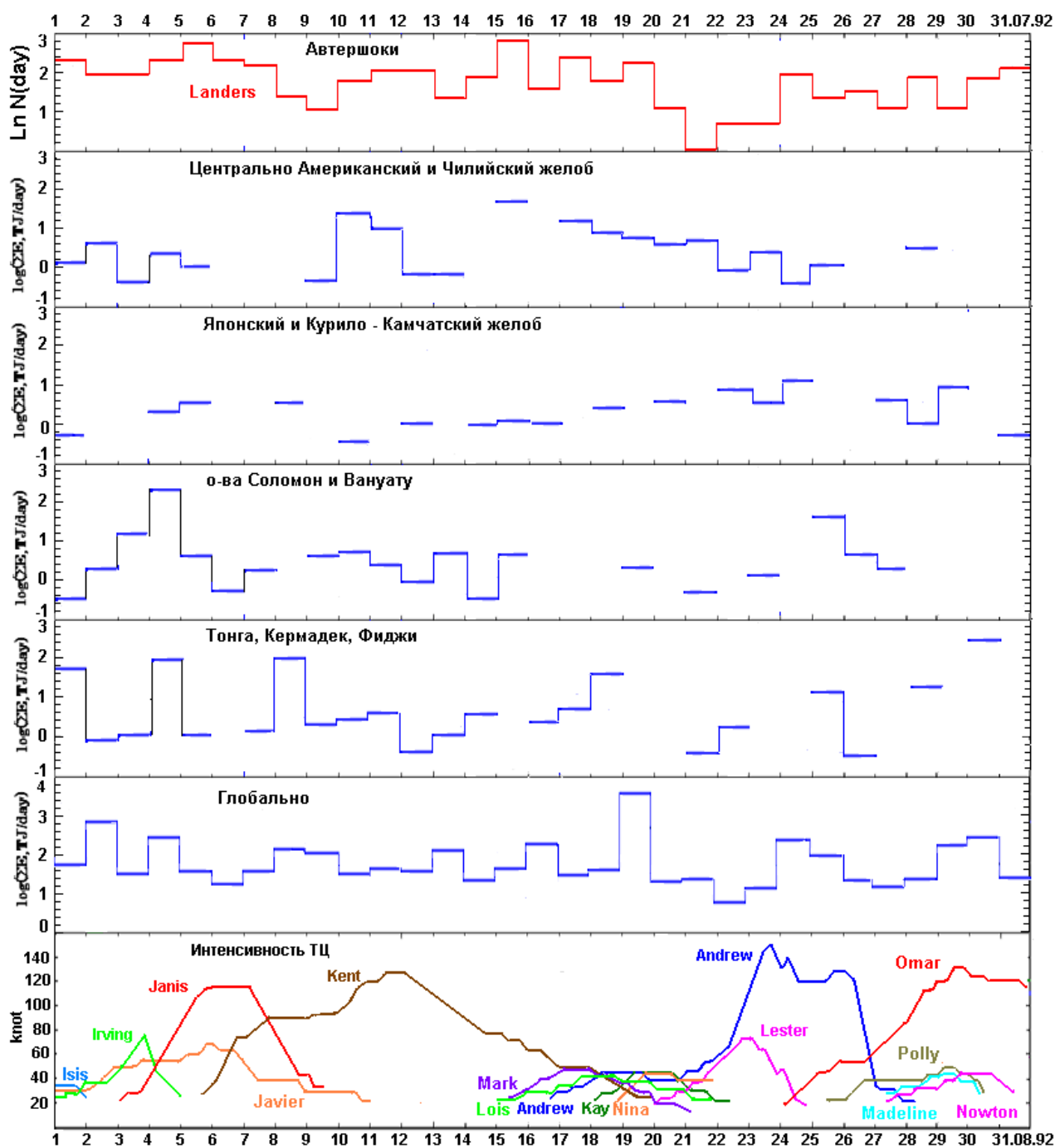


Рис. 6. Интенсивность тропических циклонов и энергия литосферных землетрясений за день.

Наибольшая сейсмическая активность в августе 1992 наблюдалась на фазе резкого роста интенсивности тайфунов Irving и Janis в районах взаимодействия Австралийской и Тихоокеанской плит (*рис.6*).

Несколько сильнейших ударов произошло 19 августа в Токтогуле, Киргизия (*табл.3*), когда шесть ТЦ достигли интенсивности тропического шторма.

Прохождение тайфуна Janis через Японию, урагана Lester через Калифорнию и вступление урагана Andrew в Новый Орлеан не вызвали сильных землетрясений.

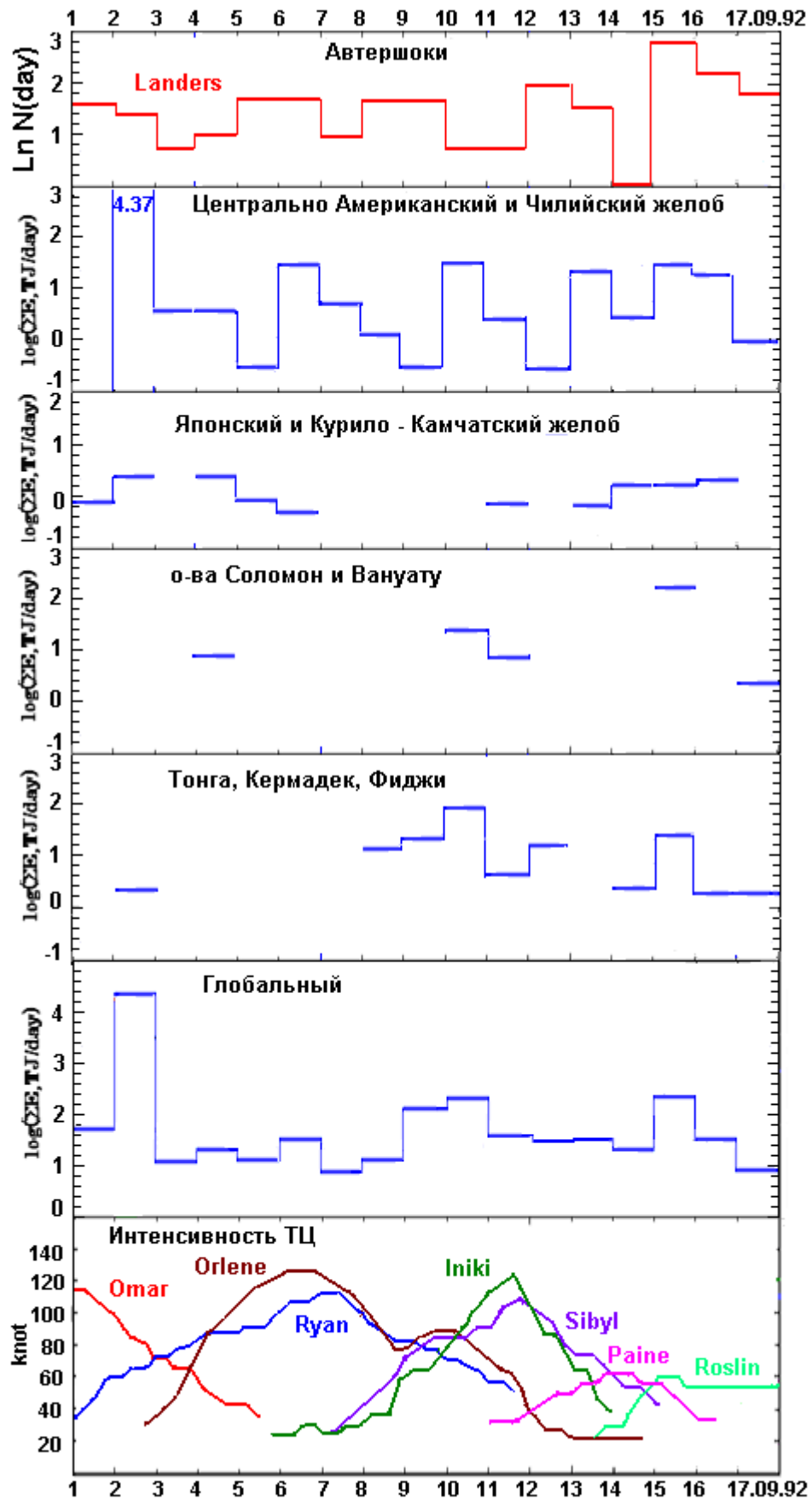


Рис.7. Интенсивность тропических циклонов и энергия литосферных землетрясений за день.

Изменения в верхней ионосфере за день до землетрясения Ландерс и на следующий день по данным спутника Космос-1809

С 10 по 27 июня над зоной Landers $L \sim 1.3-1.6$ наблюдался повышенный спектр КНЧ-ОНЧ шумов плазмы, что связываем с воздействием 1-2 ежедневных форшоков магнитудой 2.5-3.2 (презентация к докладу [Костин и др., 2022a]). За сутки до главного толчка в магнитном зените Landers $L=1.32$ и сопряженной области наблюдался аномальный всплеск в частотном канале 140 Гц шириной $\Delta f = f / 8$ (рис.1). Электрическое поле вдоль всего разлома Сан-Андреас имеет квазипериодическую структуру амплитудой ~ 10 мВ/м и широтным периодом ~ 500 км. Номера витков указаны над рисунками и меняются после пересечения экватора. Стрелками отмечены моменты резкого изменения параметров ионосферной плазмы и соответствующие L-оболочки на высоте спутника. Пересечение магнитного экватора (m.e.) указано пунктирной линией. Следует отметить, что электромагнитные КНЧ-ОНЧ сигналы на $L \sim (1.6-1.9)$ в южном полушарии связаны, скорее всего, с воздействием ТЦ Celia на ионосферу.

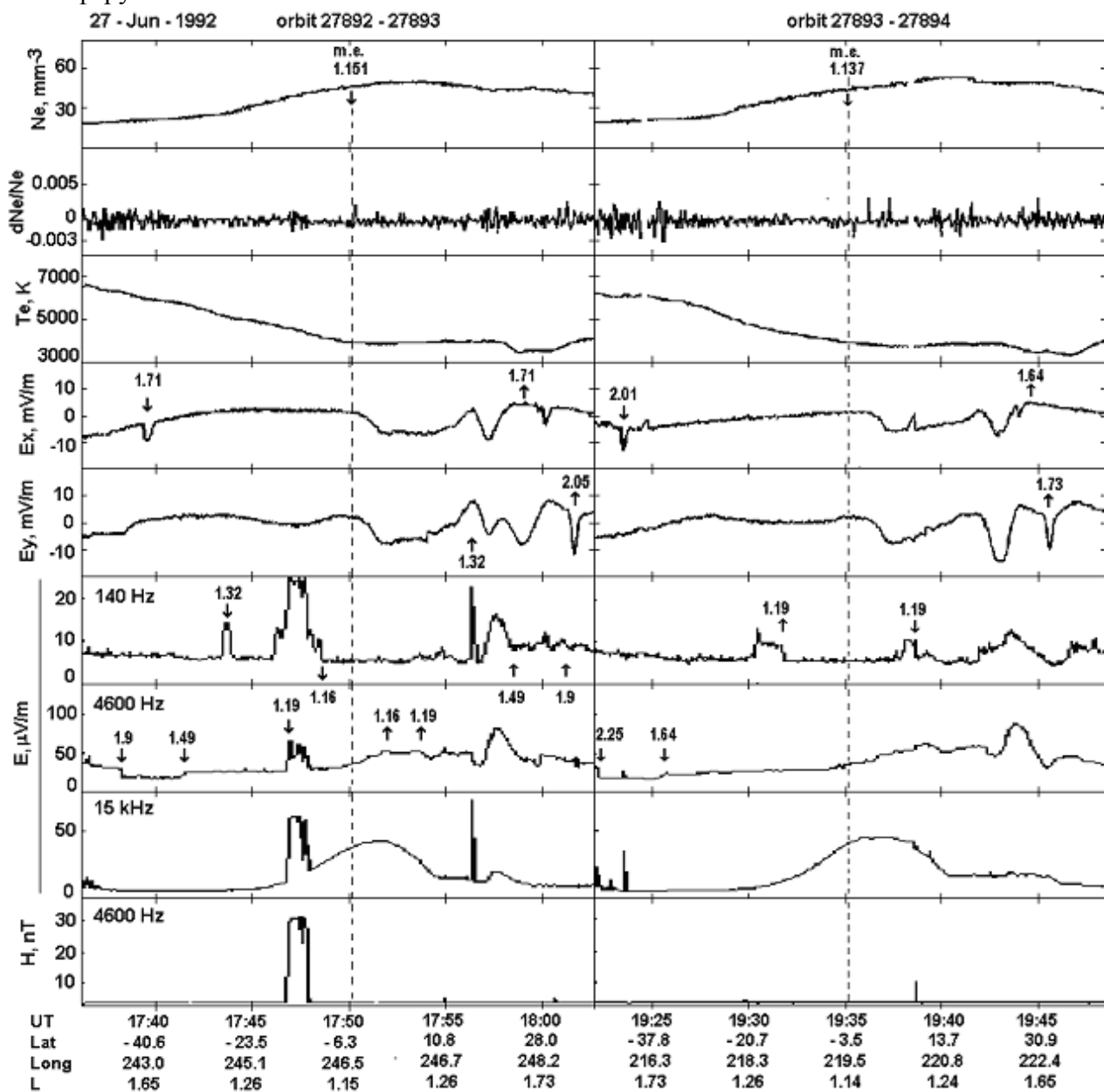


Рис. 8. Параметры плазмы верхней ионосферы над Калифорнийским разломом за сутки до землетрясения Landers.

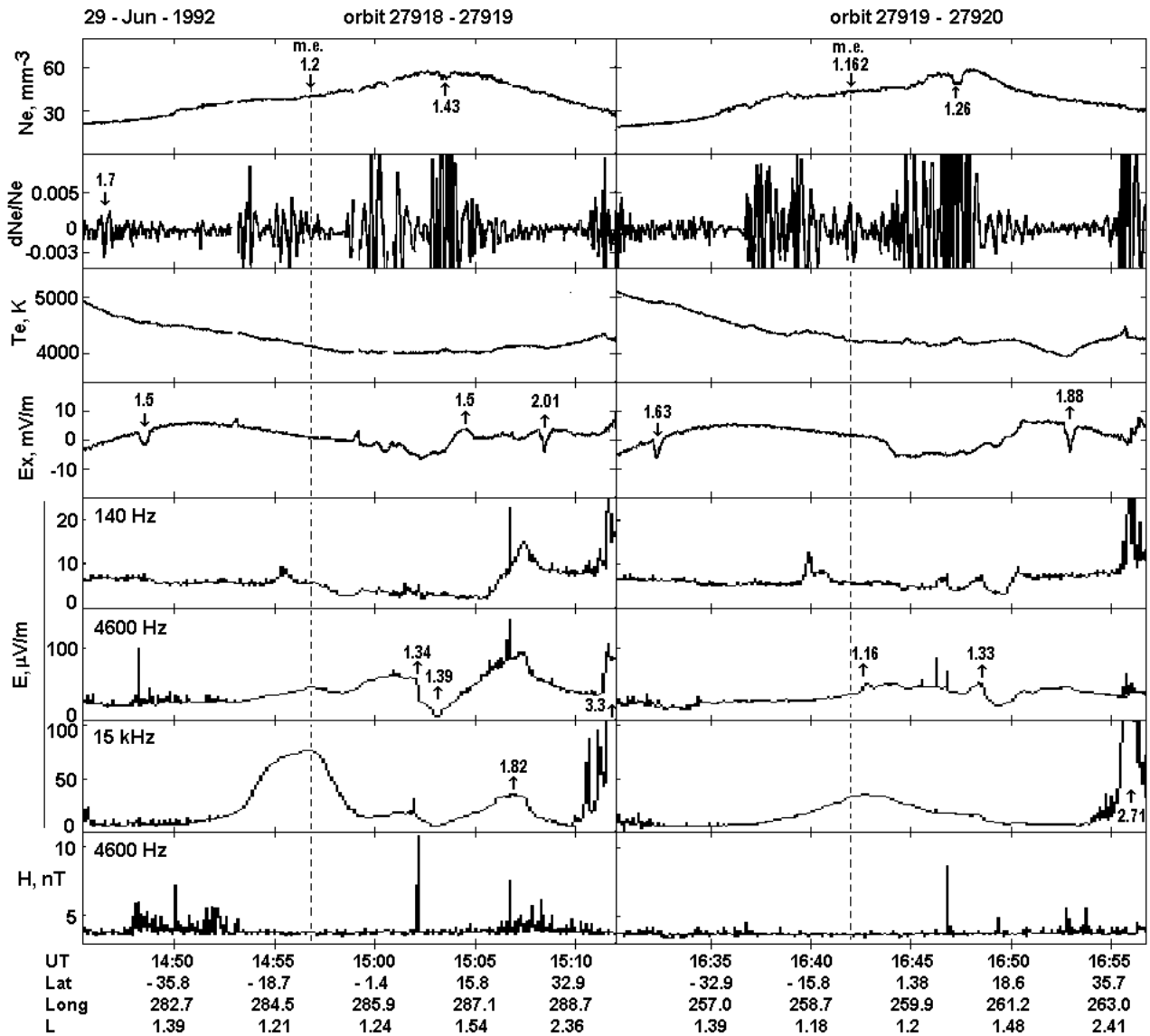


Рис. 9. Возмущения верхней ионосферы через 4-6 часов после афтершока 5.7 M_w землетрясения Landers.

На витке 27918-19 после сильного акустического воздействия на ионосферу выделяются следующие главные особенности:

1. Формирование ПИВ на $L \sim 1.5$. Он выделяется по сильному возмущению dNe , падению Ne и глубокому \min в канале 4600 Гц, в который обычно попадают НГР колебания плазмы. При сильном увеличении концентрации водорода на высоте спутника ~ 960 км происходит смещение интенсивных НГР колебаний вверх по частоте и выход их из канала регистрации. Оценка средней скорости перемещения ПИВ дает ~ 340 м/с.
2. Возникновение сильно возмущенной ионосферы в магнитном зените и сопряженной области $L \sim 1.3-1.45$.

Обсуждение результатов

В результате данной работы на большом статистическом материале (табл.2) показано, что акустическое воздействие на тропические возмущения отдельных афтершоков Ландерс и последующих сильных землетрясений, в основном магнитудой более 5, могли

вызвать их самоорганизацию в ТЦ, как рассматривалось в работах [Абурджания, 2006; Абурджания и др., 2013].

Ранее в работах авторов [Костин и др., 2022; Костин и др., 2022а] было показано, что акустическое воздействие ПЯВ в Неваде с $M_w < 5$ вызывало взрывное усиление тропических возмущений около Америки, удаленных на расстояние более 2000 км. Причем, эксперименты Galena (23 июня), Hunter Trophy (18 сентября) и Divider (23 сентября) вызвали синхронную интенсификацию ТЦ в западной части Тихого океана, что было связано с развитием волны Россби-Абурджания [Костин и др., 2019].

В свою очередь сильные изменения и локализация атмосферного давления в ТЦ перераспределяет тектоническую нагрузку. Характерный временной масштаб в динамике ТЦ сутки. Поэтому, чтобы выделить корреляционные зависимости между ТЦ и землетрясениями их число и энергию на различных разломах усредняли за сутки. Такой подход, естественно, не учитывает мониторинг геомеханики блоков, в настоящее время внедренный на разломе Сан-Андреас [Бондур и др., 2021], и физику развития различных процессов в зонах разломов, подробно изложенную, например, в работах [Кочарян, 2018; 2021].

На верхне панели *рис.5* после главного удара Ландерс можно выделить несколько участков линейного падения логрифта числа афтершоков в соседних трещинах: Landers, Big Bear, Barstow, что соответствует экспоненциальной зависимости суточного числа афтершоков:

$$N_1 = 273 \times \exp(-0.23(t-28)), \text{ где } t=29, 30 \quad (2)$$

$$N_2 = 73 \times \exp(-0.32(t-27)), \text{ где } t=28, 29 \quad (3)$$

$$N_3 = 161 \times \exp(-0.24t), \text{ где } t=1 - 13 \quad (4)$$

$$N_4 = 30 \times \exp(-0.26t), \text{ где } t=0 - 12 \quad (5)$$

$$N_5 = 29 \times \exp(-0.15(t-28)), \text{ где } t=29, 30, 31 - 36 \quad (6)$$

$$N_6 = 22 \times \exp(-0.09(t-23)), \text{ где } t=24 - 30 \quad (7)$$

Данные результаты подтверждают закон продуктивности землетрясений [Шебалин, 2022].

Значительное усиление афтершоковой активности наблюдалось 6-8 июля, 10-12 июля и с 14 июля при усилении ураганов Darby, Estelle, Frank и Georgette (*рис.5*) около западного побережья Мексики, а также с 15 сентября (*рис.7*) при развитии урагана Roslin. В этом регионе после ПЯВ Galena резко усилился ураган Celia за 4 дня до землетрясения Ландерс (*рис.1*), что подтверждает его роль в усилении форшоковой активности.

В заключение отметим:

1. Необычно высокая циклоническая активность около западного побережья Мексики после землетрясения Ландерс вызвала 2 сентября более сильное литосферное землетрясение 7.7 M_w на глубине 44.8 км в Никарагуа (№21, *табл.3*), после которого над очагом главного удара в течение суток произошло около 40 коровых землетрясений магнитудой 4.5 – 5.5 на характерной глубине ~10 км.
2. Данные мониторинга ионосферы со спутника Космос-1809 позволили выделить развитие аномалии на разломе Сан-Андреас, в частности предвестник землетрясения Ландерс, но не столь информативны, как сейсмические данные и данные оптического мониторинга развития циклонической активности.

Выводы

1. Большинству тропических возмущений, усиливавшихся до стадии шторма и выше, можно указать землетрясения, акустическое воздействие которых могло вызвать такое усиление.
2. На фазах резкого изменения интенсивности ТЦ наблюдался значительный рост энергии литосферных землетрясений ($h > 20$ км).
3. Коровые землетрясения ($h < 10$ км) на разломе Сан Андреас, в отдельных случаях, также следуют за резким изменением интенсивности ТЦ.

4. Землетрясения происходят в областях с наибольшим развитием деформационных процессов [Горшков и др., 2019], одним из спусковых механизмов которых являются ТЦ.

Финансирование работы

Работа выполнена по теме «Исследование структуры и динамики ионосферы и условий распространения радиоволн» ГР № 01201356396. Пункт 5 - «Исследование литосферно-атмосферно-ионосферных связей».

Благодарности

Авторы благодарят С.И. Козлова, указавшего при обсуждении доклада [Костин и др., 2022а], что надо более подробно рассмотреть интенсификацию тропических возмущений после землетрясения Ландерс.

Литература

- Абурджания Г.Д.* Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига. URSS. 2006. 325 с.
- Абурджания Г.Д., Харшиладзе О.А., Чаргазия Х.З.* Самоорганизация ВГВ структур в неоднородной ионосфере. 2. Нелинейные вихревые структуры // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 6. С. 797–808. DOI: 10.7868/S0016794013060023.
- Беляев Г.Г., Костин В.М.* Проявление мощных естественных и антропогенных процессов в ионосфере и на Земле / Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Сборник ИЗМИРАН-75. Ред. В.Д. Кузнецов. 2015. С. 170-184.
- Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаи И.А., Алексеев Д.А.* Динамика напряженного состояния Нижней Калифорнии по данным геомеханического мониторинга перед землетрясением 06.07.2019 г. с $M=7.1$ // Физика Земли. 2021. № 1. С.3-23.
- Горшков А.И., Соловьев А.А., Шебалин П.Н.* К 30-летию ИТПЗ РАН // <https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2020/09/2019-ITPZ-Conference-30y-1.pdf>.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А.* О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли. 1983. № 10. С. 17-21.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 295 с.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.В.* Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 269 с.
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.* Параметры верхней ионосферы над тропическими циклонами при изменениях стратосферного ветра после извержения вулкана Пинатубо. // Сборник материалов конференции «Пушковские чтения – 2019. Магнетизм на Земле и в Космосе». 2019. ИЗМИРАН. С. 95-98.
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.* Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 114-128.
- Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.* Тропические циклоны – триггер литосферных землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы VI Международной конференции (Москва, 21-24 июня 2022 г.) ИДГ РАН 2022а. С.52. <https://conf2022.idg.ras.ru/docs/Триггерные%20эффекты%20в%20геосистемах%202022%20-%20Тезисы.pdf>
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.

- Кочарян Г.Г.* Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // *Физика Земли*. 2021. № 4. С. 3-41.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В.* Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 4. С. 521-538.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М.* Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. Т. 42. № 4. С. 821-830.
- Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. М.: МИФИ. 2000. 448 с.
- Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е.* Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 3. С. 315-319.
- Шебалин П.Н.* Закон продуктивности землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы VI Международной конференции (Москва, 21-24 июня 2022 г.) ИДГ РАН 2022. С.179.
- Fan W., McGuire J. J., de Groot-Hedlin C. D., Hedlin M. A. H., Coats S., Fiedler J. W.* Stormquakes // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46 (22). P. 12909-12918.
- Hayakawa M.* Fundamentals of earthquake prediction. Singapore: J. Wiley & Sons. 2015.
- Hauksson E., Jones L., Hutton K., Eberhart, Phillips D.* The 1992 Landers Earthquake Sequence: Seismological observations // *J.Geoph. Res. Solid Earth*. 1993. V. 98. № B11. P. 19835-19858.
- Jennings C.W.* Fault map of California with volcanoes, termal springs and thermal wells, scale 1:750,000, geol. data map I, Calif. Div.of Mines and Geol., Sacramento. 1975.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E.* Impact of France Nuclear Tests on typhoons and Earthquakes in November 1990 // *International Journal of Engineering Research & Science*. 2020. V. 6. № 12. P. 25-31.
- Kostin V., Belyaev B., Ovcharenko O., Trushkina E.* American Continent Lithosphere Earthquakes after Nuclear Test of France in November 1990 // *Intern. J. Engineering Research & Science*. 2021. V. 7. № 12. P. 30-34.
- Lawrence M.B., Rappaport E.N.* Eastern north Pacific hurricane season of 1992. Monthly weather review. 1994. V. 122. P. 549-558.
- Mautner D.A., Guard C.P.* Annual tropical cyclone report 1992 // Joint typhoon warning center. 1992. Guam, Mariana Island. 269 p.
- Schekotov A.Yu., Molchanov O.A., Hayakawa M.* A study of atmospheric influence from earthquake statistics // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V. 31. P. 341-345.