

<https://doi.org/10.15407/knit2020.04.090>
УДК 523.9+550.34

І. Е. ВАСИЛЬЄВА

старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: vasil@mao.kiev.ua

Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

ЧИ Є ЗВ'ЯЗОК МІЖ СОНЯЧНОЮ АКТИВНІСТЮ ТА ЗЕМЛЕТРУСАМИ?

Розглядається можливий зв'язок між сонячною активністю і сейсмічною активністю Землі. За допомогою перетворення Фур'є проаналізовано періодичність виникнення землетрусів магнітудою $M > 7$ за період 1900—2019 рр. і магнітудою $2.5 \leq M \leq 7$ за період 1973—2019 рр. Розраховано середньорічні, середньомісячні і добові значення сонячно-земних змінних та кількість землетрусів, інтенсивність яких потрапляє в задані межі. Для аналізу можливих зв'язків між сонячною і геосейсмічною активністю використано метод накладення епох. У кожному сонячному циклі було виділено чотири часових періоди: фази зростання, максимуму, спадання і мінімуму. Для кожного періоду аналізувалися глобальна кількість землетрусів по всій земній кулі і окремо землетрусів в областях розтягування і стиснення земної кори. Для всіх часових діапазонів і усіх обраних магнітуд землетрусів не знайдено статистично суттєвої залежності між сонячно-земними змінними і виникненням землетрусів. Виявлено збільшення кількості землетрусів у нічний період (на 10 %) порівняно з денним, а також деяке збільшення кількості землетрусів після місцевого полудня. Зроблено висновок про сильну залежність результатів дослідження від вибірки даних. Ми не змогли підтвердити наявність прямого зв'язку між сонячною активністю і сейсмічною активністю Землі.

Ключові слова: сонячна активність, циклічність, землетруси, числа Вольфа, спалахи.

1. ВСТУП

Метою нашої роботи була перевірка можливих причинно-наслідкових зв'язків між геліо- і геофізичними процесами (плямами, спалахами та іншими активними явищами на Сонці) і землетрусами як характерними проявами активності Землі.

Землетрус є одним з найпотужніших катастрофічних природних явищ. Землетрус 11 березня 2011 р. магнітудою $M = 9.0$ (магнітуда землетрусу характеризує енергію, що виділилася у вигляді сейсмічних хвиль) був найбільшим зареєстрованим у Японії і четвертим за величиною землетрусом у світі з 1900 року. Він викликав цунамі, в

результаті якого загинули майже 16 тис. осіб [23], і сталася ядерна аварія на АЕС Фукусіма. Річард Гросс з Лабораторії реактивного руху (NASA, Пасадена, Каліфорнія) розрахував, що цей землетрус скоротив земну добу на 1.8 мкс і змістив вісь Землі на 17 см. Землетрус 26 грудня 2004 р. $M = 9.1$ поблизу північної Суматри і супутне йому сильне цунамі стало причиною загибелі близько 230 тис. осіб, скоротило добу на 6.8 мкс і змістило земну вісь приблизно на 7 см [4]. Згідно зі звітом [32], опублікованим у 2018 р. Управлінням ООН зі зменшення ризиків стихійних лих (UNISDR), за останні двадцять років відбулося різке зростання економічних втрат від кліматичних катастроф (на 151 %), і у першу чергу від землетру-

Цитування: Васильєва І. Е. Чи є зв'язок між сонячною активністю та землетрусами? *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 5 (126). С. 90—102. <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.090>

сів. Так, на 563 землетруси і пов'язаних з ними цунамі припадає 747 234 загиблих, або 56 % від загальної кількості жертв природних катастроф. Тому вчасне передбачення землетрусу, що наближається, та зменшення можливих збитків від нього є актуальним завданням на сьогоднішній день. Можливий періодичності землетрусів різної магнітуди присвячено розділ 3.

Сонце — основне джерело енергії для Землі. Вплив сонячного випромінювання і заряджених частинок на поверхню Землі та її атмосферу вивчено досить добре. Можна очікувати, що Сонце впливатиме і на геофізичні процеси, такі як землетруси. Можливий зв'язок землетрусів з інтенсивністю випромінювання в сонячних лініях кисню обговорюється в роботах [2, 3], де стверджується, що інтенсивності ліній кисню 557.7 нм і 630.0 нм збільшуються перед землетрусом протягом шести днів до землетрусу з магнітудою понад 5 відносно середнього сезонного значення інтенсивностей до сейсмічних подій.

В роботі [6] зазначалося, що землетруси магнітудою $M \geq 8$ в Куньлуні (2001 р.), Монголії (1905 р.) і Сінцзяні (1906 р.) були близькі за часом до максимумів сонячної активності, а землетруси у Сінцзяні (1931 р.) і в Дансьяні в Тибеті (1951 р.) відбулися приблизно на 3...4 роки пізніше максимумів сонячної активності.

У ряді опублікованих робіт на основі емпіричного аналізу історичних даних виявлено зв'язки між сонячною і геосейсмічною активністю. Однак ці роботи суперечать одна одній і часто базуються на обмежених даних. Наприклад, в результаті досліджень [22, 30] найбільшу глобальну сейсмічність відзначено під час максимуму сонячного циклу і на фазі спаду, і навпаки, в роботах [21, 24, 28, 35] виявлено негативну кореляцію між сейсмічністю і сонячною активністю. У роботі [7] стверджується, що більше землетрусів відбувається близько мінімуму і на фазі спаду сонячного циклу. Відсутність істотної кореляції між сонячною активністю і сейсмічністю відзначено в роботах [15, 17, 36]. Відсутність кореляції зазначалася також для окремих географічних регіонів [34]. Нижче ми сподіваємося виявити такі кореляції в результаті аналізу історичних даних про сонячну активність (чисел Вольфа) з одного

боку, і глобальних і регіональних землетрусах — з іншого.

Найбільш яскравим проявом сонячної активності є сонячні спалахи. В роботі [1] зазначено, що шість сильних землетрусів ($6.8 < M < 9.3$) в районі Суматри (26 листопада — 26 січня 2004 р.) відбулися протягом приблизно 1.5 діб після збільшення геомагнітної активності, пов'язаної з сонячними спалахами. В роботі [26] на основі аналізу чотирьох спалахів класу X (6—10 вересня 2017 р.) і фоновому інтервалу (26 серпня — 5 вересня 2017 р. виявлено значне збільшення кількості землетрусів магнітуди $2.5 < M < 5.5$ у період після спалахів. Можливі зв'язки сонячних спалахів (і викликаних ними сплесків геомагнітної активності) і землетрусів розглянуто в розд. 5. Зміна кількості землетрусів протягом доби і протягом року обговорюється в розд. 6.

2. ДАНІ

Як основну характеристику сонячної активності ми використовували багаторічні ряди чисел Вольфа [<http://www.sidc.be/silso/datafiles>] за період 1900—2019 рр. (Нагадаємо, що числа Вольфа характеризують кількість плям на диску Сонця і їх загальну площу і обчислюються для кожного дня за формулою $W = k(f + 10g)$, де f — кількість спостережуваних плям, g — кількість спостережуваних груп плям, k — нормувальний коефіцієнт, що характеризує умови спостереження і апаратуру, яка використовується).

Дані про спалахи класів А, В, С, М, Х ми отримали з результатів спостережень рентгенівського випромінювання в діапазоні 0.1...0.8 нм, зроблених на супутниках GOES в 1974—2019 рр. [<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/>], інформацію про найбільші спалахи (1996—2019 рр.) наведено на сайті SpaceWeatherLive.com [<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/top-50-solar-flares>].

Для оцінки геомагнітної активності використовувався Ар-індекс, що відповідає середньодобовій планетарній амплітуді зміни магнітного поля Землі. Ар-індекс визначається як середнє з восьми значень змін найбільш збуреного елемента магнітного поля у тригодинному інтервалі часу на середньоширотних станціях і стано-

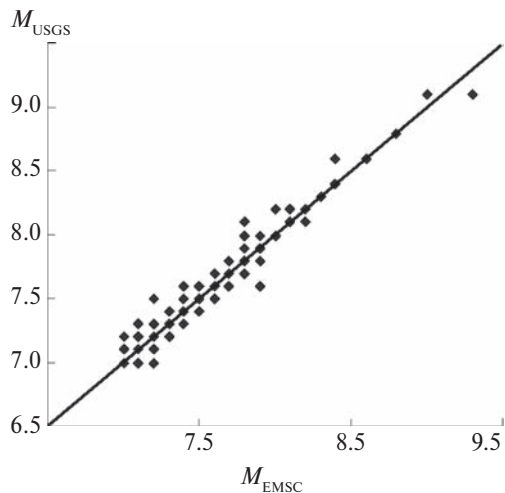


Рис. 1. Кореляційний зв'язок оцінок магнітуди землетрусів за даними EMSC і USGS ($M \geq 7$) та його апроксимація $M_{USGS} = 0.9995M_{EMSC} + 0.0142$

вить від 0 до 280 нТл. Обчислюється Ар-індекс у геомагнітній обсерваторії Німегк ім. Адольфа Шмідта (Adolf Schmidt Geomagnetic Observatory Niemegek) Центру ім. Гельмгольца у Потсдамі (Helmholtz-Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam), що є членом Міжнародної служби геомагнітних індексів (International Service of Geomagnetic Indices) [<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>].

Для аналізу землетрусів за період 1900–2019 рр. використовувалися каталоги Європейсько-Середземноморського сейсмологічного центру (EMSC / CSEM) (дані 2004–2019 рр.) і Геоло-

гічної служби США (USGS) (1900–2019 рр.). На жаль, дані каталогів не однакові в оцінці магнітуд землетрусів. Так, проаналізувавши 225 найсильніших землетрусів ($M \geq 7$) на часовому відрізку з жовтня 2004 по липень 2019 рр. ми виявили незначні розбіжності в оцінках магнітуд. Але в окремих випадках, наприклад для землетрусу 23.12.2004 р. на півночі від острова Маккуорі, Австралія (і деяких інших), розбіжності доходять до ± 0.3 (що, втім, можна порівняти із заявленою точністю каталогів ± 0.25). Кореляційний зв'язок даних каталогів показано на рис. 1.

Для аналізу землетрусів ми використовували в основному дані USGS. Дані EMSC, через обмеженість часового ряду даних (один цикл сонячної активності 2004–2019 рр.), використовувалися для порівняння і не увійшли в остаточний результат.

3. ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Перш за все ми хотіли вивчити питання про періодичність землетрусів (табл. 1). Якби був знайдений період, близький до 8–12 років (період сонячного циклу), то це було б важливим аргументом на користь зв'язку землетрусів із сонячною активністю. У ранніх роботах [14, 18, 27, 31] заперечується наявність будь-якої періодичності землетрусів. Натомість у пізніших роботах [11, 10, 13, 16, 24, 33, 36] на прикладі окремих регіонів або для всієї земної кулі знайдено періоди різної тривалості між виникненням землетрусів.

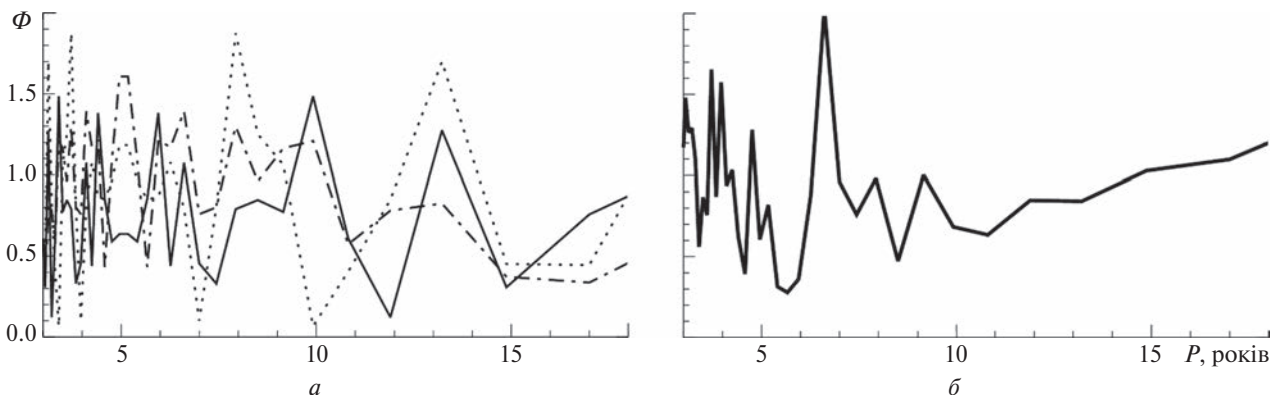


Рис. 2. Періодограми розподілу кількості землетрусів для всієї земної кулі: *a* – для часового інтервалу 1973–2019 рр. (штрих-пунктирна лінія – $2.5 \leq M \leq 4$, точки – $4 < M \leq 6$, суцільна лінія – $M > 6$), *б* – для часового інтервалу 1900–2019 рр. ($M > 7$)

Зокрема, в роботі [11] зроблено висновок, що є зв'язок між сонячною і сейсмічною активністю. Крім того, в роботі [12] зроблено цікавий висновок, що відсутність чіткої кореляції між мікроземлетрусами ($M < 2.5$) і місячними фазами свідчить про те, що, крім тектонічних і приливних сил, виникнення землетрусів має бути пов'язане з іншими факторами.

Ми проаналізували землетруси $M \geq 2.5$ по всій земній кулі і окремо для сейсмічно актив-

ного регіону на заході Південної Америки. При цьому тривалість рядів даних становила: 47 років для $2.5 \leq M$ (1973—2019 рр.) і 118 років для $M > 7$ (1902—2019 рр.). У табл. 1 представлено літературні дані і результати застосування нами Фур'є-аналізу до даних про щорічні кількості землетрусів. Аналіз спектральної потужності річних значень кількості землетрусів, наведено у вигляді періодограм на рис. 2, показав, що практично для всіх діапазонів магнітуд (за винятком

Таблиця 1. Періодичність землетрусів

Літературне джерело	Періодичність	Період, який аналізується	Магнітуда	Регіон
[14]	відсутня	1904—1952		Весь світ
[31]	відсутня	1942—1961		Нова Зеландія
[27]	відсутня	1961—1968		Весь світ
[18]	відсутня	1907—1975	≥ 8	Весь світ
[25]	3...12	1954—1975	≥ 4	Гімалайсько-Альпійський пояс
	7, 9...11, 18			Памір-Гіндукуш
	5...9, 14			Кедарнатх-Пітхорагарх
	8, 16			Тібет
	3...4			Шиллонг
	12			Високі Альпи
	9			Сахара
[13]	2.3...4; 5.5...6.5; 8...9; 14...20, 31...34	1898—1985	≥ 7.0	Весь світ
[33]	30	1910—1980	≥ 5	Китай
	2... 3, 20	1977—1997		
[16]	9, 56	1765—1885	≥ 7.9	Каліфорнія
[24]	11	1975—2005	≥ 4	Весь світ
[11]	4; 4.5; 5.5; 9; 11, 13.5	1900—2015	≥ 7	Чілі
[36]	30.98, 42.20	1950—2015	≥ 5	Весь світ
[10]	2.3...3.3	1900—2014	$4.0 \leq M \leq 7.9$	Туреччина
Дана робота	3, 5, 6.5, 10, 13	1973—2019	$2.5 \leq M \leq 4.0$	Весь світ
	3, 11	1973—2019	$2.5 \leq M \leq 4.0$	Південна Америка
	3...3.5, 8, 13	1973—2019	$4.0 < M \leq 5.0$	Весь світ
	3...4, 6, 7.5, 11...12.5	1973—2019	$4.0 < M \leq 5.0$	Південна Америка
	2.5, 8.5, 13	1973—2019	$5.0 < M \leq 6.0$	Весь світ
	3, 7.5, 11.5	1973—2019	$5.0 < M \leq 6.0$	Південна Америка
	3...4, 6, 10, 13	1973—2019	$6.0 < M \leq 7.0$	Весь світ
	2.5...4, 6...6.5, 10...11	1973—2019	$6.0 < M \leq 7.0$	Південна Америка
	2.5, 4, 4.5, 6.5, 40	1900—2019	> 7.0	Весь світ
	3.5, 4.5, 12.5, 27...37	1900—2019	> 7.0	Південна Америка
	2, 3.5, 5, 6.5, 8, 9, 13	1973—2019	≥ 2.5	Весь світ
	2.5...4, 6, 7.5, 9...11.5	1973—2019	≥ 2.5	Південна Америка

$M > 7$ для всієї земної кулі) вдається виділити період 9—13 років, який приблизно відповідає циклу сонячної активності.

4. СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ І СЕЙСМІЧНА АКТИВНІСТЬ ЗЕМЛІ

Для аналізу можливих зв'язків між числами Вольфа і кількістю землетрусів у відповідний момент циклу ми скористалися методом накладання епох. Його суть полягає в тому, що якщо вихідні дані повторюються з певним періодом, то крива, отримана усередненням всіх значень вихідної кривої, розкладених за відповідни-

ми періодами, буде якось відрізнятися від константи, а будь-які неперіодичні зміни вихідної кривої будуть компенсовані. Для кожного сонячного циклу було виділено чотири часові області: фазу зростання, максимуму, спаду і мінімуму (включає в себе частини двох сусідніх сонячних циклів). Для визначення меж областей використовувалася така методика. Для кожного сонячного циклу визначалися максимальна і мінімальна кількість плям (по середньорічних значеннях). Різниця між максимальною і мінімальною кількістю плям для кожного циклу була поділена на шість (це число визначалося дослідним

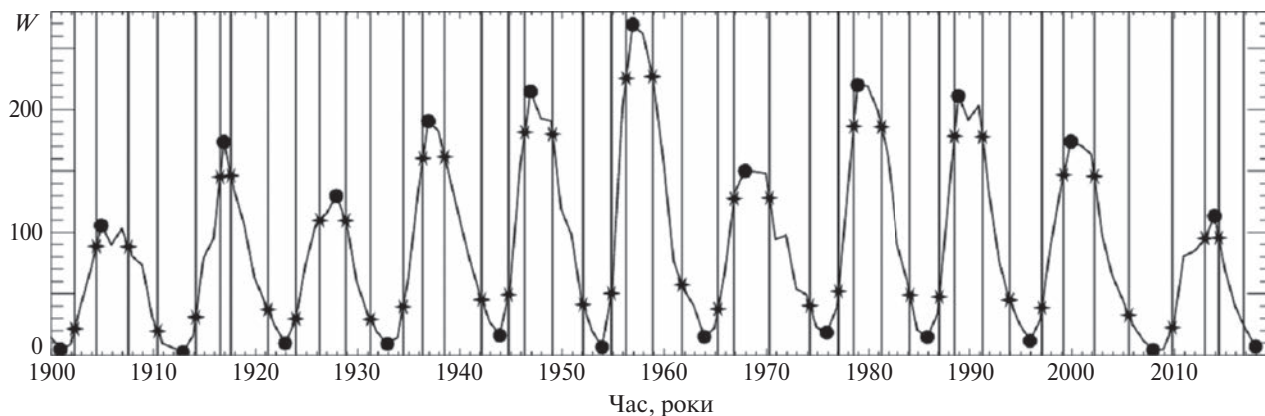


Рис. 3. Середньорічні числа Вольфа W (суцільна лінія), максимумами та мінімумами (точки) і обрані початки фаз мінімуму, зростання, максимуму і спадання сонячної активності (зірочки і вертикальні прямі)

Таблиця 2. Початок, максимумами циклів сонячної активності за даними сайту <https://www.revolv.com/page/List-of-solar-cycles?cr=1>

і розраховані нами дати початку фаз мінімуму, зростання, максимуму і спадання сонячної активності

Номер циклу	Початок циклу	Максимум циклу	Початок фази			
			зростання	максимуму	спаду	мінімуму
14	01.1902	02.1906	10.1902	12.1904	01.1908	12.1910
15	07.1913	08.1917	08.1914	01.1917	02.1918	09.1921
16	08.1923	04.1928	06.1924	10.1926	05.1929	10.1931
17	09.1933	04.1937	12.1934	11.1936	01.1939	08.1942
18	02.1944	05.1947	04.1945	11.1946	07.1949	07.1952
19	04.1954	03.1958	05.1955	10.1956	05.1959	03.1962
20	10.1964	11.1968	10.1965	05.1967	10.1970	09.1974
21	03.1976	12.1979	07.1977	01.1979	10.1981	09.1984
22	09.1986	11.1989	07.1987	01.1989	10.1991	06.1994
23	08.1996	11.2001	07.1997	09.1999	09.2002	01.2006
24	12.2008	04.2014	04.2010	06.2013	10.2014	04.2017

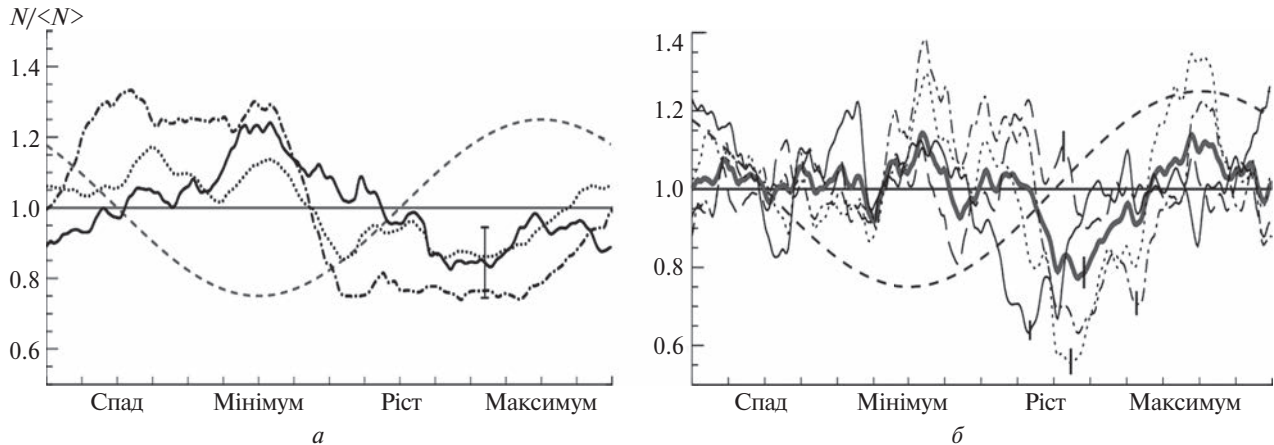


Рис. 4. Розподіл землетрусів за фазами сонячного циклу, отриманий методом накладання епох. Штрихи — «ідеальний» цикл сонячної активності (синусоїда з довільним нормуванням по амплітуді): *a* — дані 1977—2019 рр. (21—24-й сонячні цикли): $2.5 \leq M \leq 4$ (штрих-пунктирна лінія), $4 < M \leq 6$ (точки), $M > 6$ (суцільна лінія). Середня квадратична похибка показана для $M > 6$; *b* — дані 1902—2019 рр. для $M > 7$ (жирна суцільна лінія — 14—24-й сонячні цикли, тонка суцільна лінія — 15—18-й цикли, пунктир — 17—20-й цикли, штрих-пунктир — 19—22-й цикли, довгі штрихи — 21—24-й цикли)

шляхом для забезпечення приблизної рівності за часом усіх чотирьох фаз). Для отриманих точок визначалися відповідні моменти часу. На ділянці підйому і спаду доводилося по чотири інтервали, на фази максимуму і мінімуму — по два, причому другий інтервал фази мінімуму належав наступному сонячному циклу (рис. 3). Розраховані нами дати початку фаз мінімуму, зростання, максимуму і спадання сонячної активності приведено у табл. 2.

Розраховані середні щомісячні кількості землетрусів було проінтерпольовано на ділянки фаз мінімуму, зростання, максимуму і спаду сонячної активності. Кількість точок інтерполяції була однаковою для кожної з фаз. У цьому випадку цикл сонячної активності можна представити синусоїдою. Для землетрусів $M \geq 2.5$ побудовано залежності для 21—24-го циклів сонячної активності (1977—2019 рр.). Згідно з висновками роботи [36] і нашими оцінками дані до 1973 р. для землетрусів $M < 7$ є неповними. Для землетрусів $M > 7$ побудовано залежності для 1902—2019 рр. (рис. 4).

Для землетрусів $M \geq 2.5$ (при аналізі 47 років спостережень, 21—24-й цикли сонячної активності) видно деяке збільшення кількості землетрусів у фазі мінімуму сонячного циклу і змен-

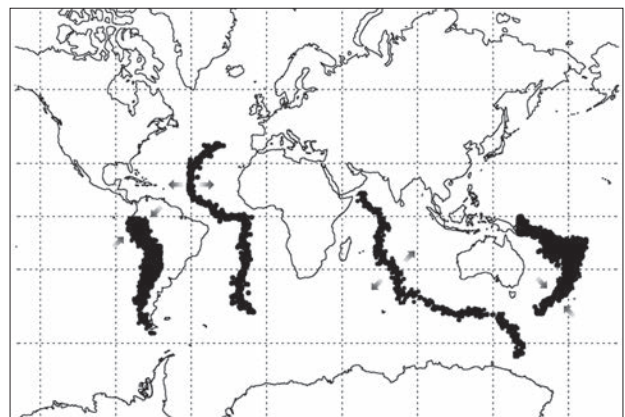


Рис. 5. Обрані зони областей стиснення-розтягування. Кожна точка відповідає одному землетрусу. Стрілками показані напрямки розтягування-стиснення

шення їхньої кількості на фазі зростання. Але при використанні даних для 11 сонячних циклів (більше 100 років спостережень) — ефект «замивається», стає порівняним з помилкою, за винятком ділянки на фазі зростання, на якій кількість землетрусів помітно менша. Ми проаналізували також цей ефект для кількох груп сонячних циклів по чотири цикли у групі (з 15-го по 18-й, з 17-го по 20-й, з 19-го по 22-й, з 21-го по 24-й). Для цих майже 44-річних періодів

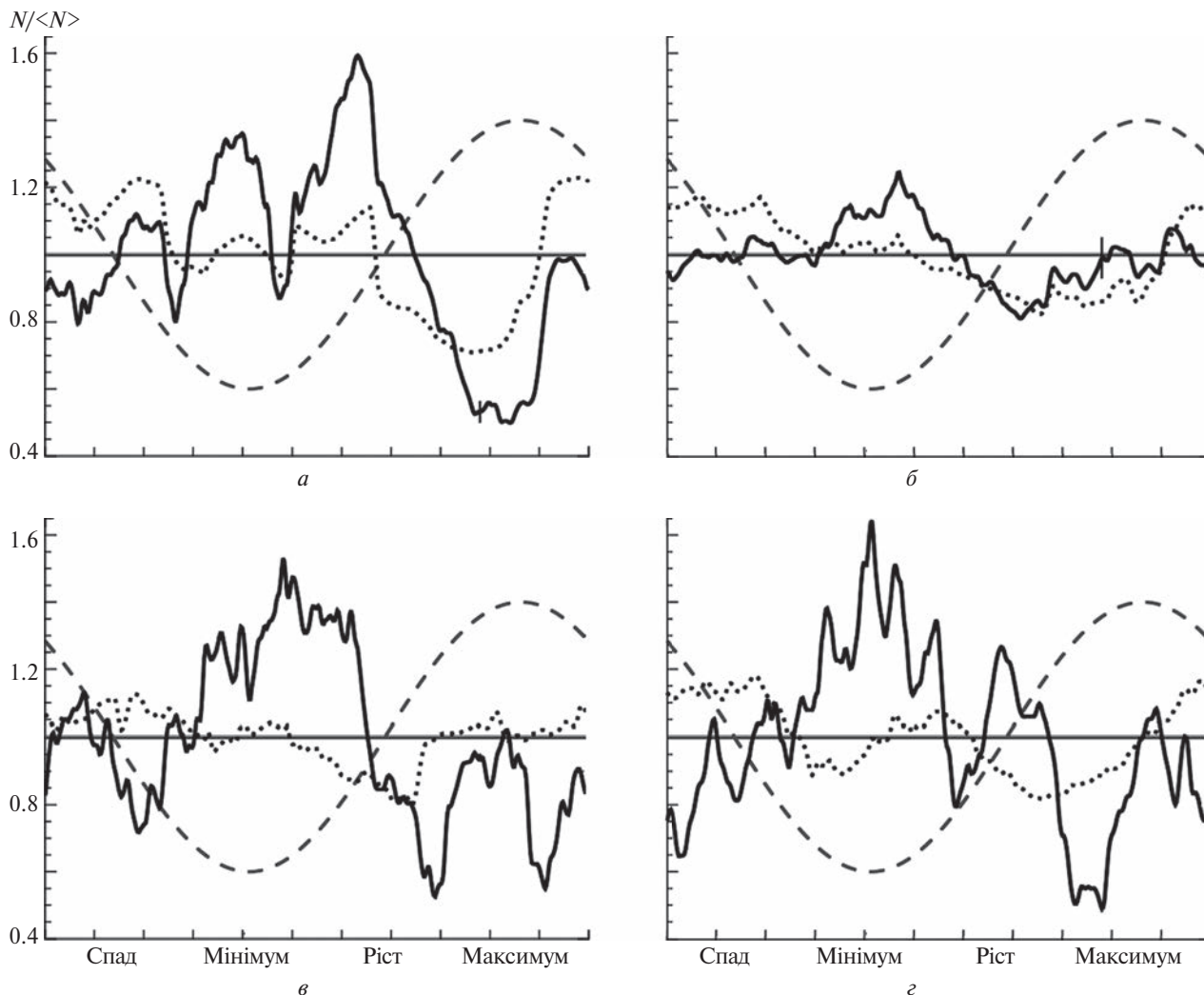


Рис. 6. Розподіл землетрусів по фазах сонячного циклу, отриманий методом накладання епох, усереднений у 5-річних інтервалах за даними 1977–2019 рр. (чотири сонячних цикли): *а* — Південна Америка, *б* — регіон островів Фіджі, *в* — Атлантичний океан, *г* — Індійський океан (див. рис. 5). Штрихова лінія — «ідеальний» цикл сонячної активності (синусоїда з довільним нормуванням по амплітуді), суцільна лінія — $4 < M < 6$, точки — $M > 6$

ніяких стійких залежностей кількості землетрусів від фази сонячного циклу не помічено, принаймні для землетрусів $M > 7$.

Висловлювалася гіпотеза [9], що сонячна активність по-різному діє на зони розтягування земної кори (серединно-океанські хребти і рифти) і зони стиснення (складчасті системи і островні дуги). Перші — зони невеликої товщини земної кори (3.5...5 км) з поширенням тільки неглибокофокусних землетрусів. Зони стиснення характеризуються товщиною земної кори

до 70 км і великою кількістю глибокофокусних землетрусів. За даними [9] у період збільшення сонячної активності відбувається збільшення сейсмічної і вулканічної активності у зоні стиснення Землі і зниження активності у зоні розтягування Землі. Для перевірки цієї гіпотези ми вибрали дві зони розтягування в Атлантичному і Індійському океані і дві зони стиснення — на заході Південної Америки і в районі островів Фіджі (рис. 5). Істотних відмінностей між кількістю землетрусів в зонах стиснення і розтягу-

Таблиця 3. Кількість проаналізованих землетрусів різних балів для деяких регіонів

Region	Кількість землетрусів	
	$4 \leq M \leq 6$	$M > 6$
Район островів Фіджі	65768	1652
Південна Америка	30281	455
Індійський океан	6178	126
Атлантичний океан	5470	109
Весь світ (1977—2019 рр.)	392339	6107
Весь світ (1902—2019 рр.)	414595	11453

вання по відношенню до сонячного циклу не виявлено. Спостерігається збільшення кількості землетрусів у фазі мінімуму сонячного циклу і деяке зменшення у фазі росту і максимуму (див. рис. 6). Що довшо вибірка, яка аналізується, то меншою стає кореляція з сонячним циклом. Загальну кількість землетрусів, розглянутих в даній роботі, приведено в табл. 3.

5. СПАЛАХИ, МАГНІТНІ БУРІ ТА ЗЕМЛЕТРУСИ

У роботі [28] допускається, що сонячні спалахи є спусковим механізмом для сильних землетрусів. Можливий зв'язок між спалахами класу X і збільшенням сейсмічної активності ($M \geq 4.5$) обговорюється також в роботі [5], де відзначається збільшення кількості сейсмічних подій протягом чотирьох днів після X-спалаху у порівнянні із середньомісячним значенням, і описано два землетруси $M > 8.0$, які, мабуть, були пов'язані з X-спалахами. У роботах [19, 20] на основі аналізу землетрусів 1900—2011 рр. з $M \geq 6$ показано, що ймовірність сильного землетрусу збільшується, коли геомагнітний індекс Кр досягає свого мінімального значення.

Найсильніший спалах на Сонці балу X28 стався 4 листопада 2003 р., інтенсивність його рентгенівського випромінювання у максимумі становила 2.8 мВт/м^2 . На щастя, цей спалах стався на лімбі і практично не вплинув на Землю. Ми аналізували разом спалахи і індекс геомагнітної активності, тому що навіть потужний спалах, який відбувся на лімбі, швидше за все, не вплине на землетрус. За час проходження активної області по диску Сонця може відбува-

тися кілька десятків спалахів різної потужності. За цей же час на Землі відбувається кілька десятків / сотень землетрусів різних магнітуд. Але якщо навіть сонячний спалах і землетрус розділяє короткий проміжок часу, це не означає, що одне викликало інше. Якщо спалах є спусковим механізмом для землетрусу, то збільшення спалахової активності має призвести до збільшення кількості землетрусів. Іншими словами, через певний проміжок часу після кожного потужного спалаху на Землі має збільшуватися кількість землетрусів. Залишилося визначити цей часовий інтервал. Оскільки попередньо нам нічого не відомо про тривалість часового проміжку між спалахом і (можливо) викликаним ним землетрусом, то ми виділили максимуми геомагнітної активності (пов'язані і зі спалахами, і з космічними променями) і максимуми в усереднених за день кількостях землетрусів. Потім ми взяли різницю між моментами часу максимумів геомагнітної активності і моментами часу відповідних максимумів кількості землетрусів, підраховали, скільки разів зустрічається той чи інший інтервал між геомагнітним максимумом і збільшенням кількості землетрусів. Істотного збільшення кількості подій для будь-якого інтервалу часу (від 1 до 120 діб) не виявлено. Відсутність зв'язку між геомагнітними бурями і землетрусами відзначено також в роботі [34].

6. ДОБОВІ ТА СЕЗОННІ ВАРІАЦІЇ

Момент, коли відбувається землетрус, наведено в каталогах за всесвітнім часом, однак, на нашу думку, певний інтерес становить і розподіл землетрусів протягом доби.

Для кожного землетрусу обчислювався місцевий час, а також час сходу і заходу Сонця для координат точки землетрусу для даного дня. Кількість землетрусів по всій земній кулі підсумовувалась у півгодинних інтервалах. Була побудована залежність кількості землетрусів від місцевого часу. При цьому були отримані несподівані результати. Зокрема, в нічний час відбувається на 10 % землетрусів більше, ніж вдень. Крім того, спостерігається збільшення кількості землетрусів після місцевого полудня (рис. 7, а). Можливо, цей ефект пов'язаний зі зміною тем-

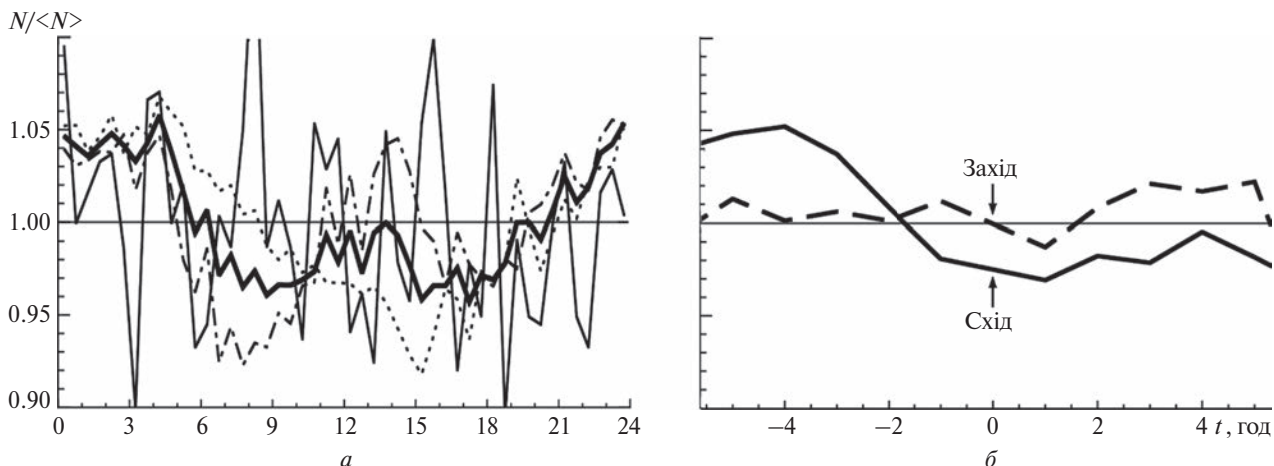


Рис. 7. Розподіл землетрусів за часом t доби: a — нормована кількість землетрусів, усереднена за кожні півгодини за місцевим часом для всієї земної кулі: жирна суцільна лінія — $M \geq 2.5$ (830301 подія), штрих-пунктирна лінія — $2.5 \leq M \leq 4$ (404034 події), пунктир — $4 < M \leq 6$ (414786 подій), тонка суцільна лінія — $M > 6$ (11481 подія); b — нормована кількість землетрусів за годину по всій земній кулі відносно моментів сходу і заходу ($M \geq 2.5$)

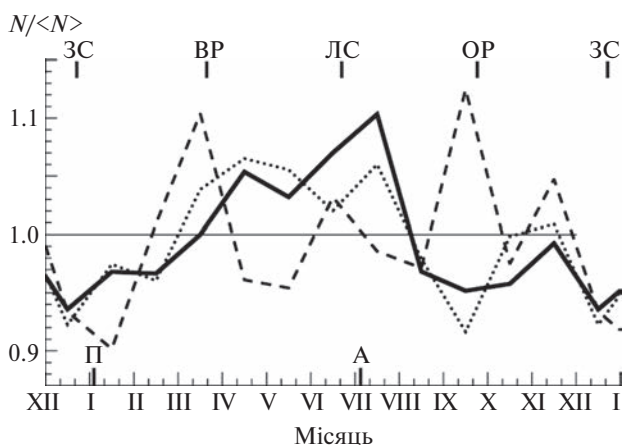


Рис. 8. Розподіл землетрусів по місяцях року ($M \geq 2.5$) за 1900—2019 рр.: суцільна лінія — для всієї земної кулі (830301 подій), пунктир — для північної півкулі ($\varphi > 30^\circ$, 423565 подій), штрихова лінія — для південної півкулі ($\varphi \leq 30^\circ$, 67004 події). Значення нормовано на середні за рік окремо по півкулях і по всій земній кулі. Вгорі відзначено моменти зимового і літнього сонцестояння (ЗС і ЛС), а також весняного і осіннього рівнодення (ВР і ОР), внизу — положення перигелію (П) і афелію (А)

ператури протягом доби. В роботі [24] була знайдена суттєва кореляція ($r = +0.77$) між глобальним числом землетрусів і глобальною температурою приземного повітря протягом року.

Крім того, ми побудували залежність сумарної кількості землетрусів (з усередненням за 1 годи-

ну) від моментів сходу і заходу Сонця для місяця події (рис. 7, б). Видно, що кількість землетрусів за 4 год до сходу сонця збільшується приблизно на 5 % відносно середнього значення.

Цікавою видається зміна кількості землетрусів протягом року (рис. 8). Землетруси були розподілені на три групи по широті φ . Перша група включала землетруси в діапазоні $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, друга — в діапазонах $-60^\circ \leq \varphi < -30^\circ$ і $30^\circ < \varphi \leq 60^\circ$ і третя — на широтах $\varphi < -60^\circ$ і $\varphi > 60^\circ$. Також аналізувалися всі землетруси по земній кулі $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. У високих широтах реєструється невелика кількість землетрусів (2245 для $\varphi < -60^\circ$ і 34192 для $\varphi > 60^\circ$), і вони не вносять істотного внеску у підсумковий результат, тому на графіку ми представили лише результати для $\varphi < -30^\circ$ і $\varphi > 30^\circ$. Залежність від сезону (ймовірно, від температури) простежується для землетрусів, що відбуваються на широтах $\varphi < -30^\circ$ і $\varphi > 30^\circ$. Відзначимо, що збільшення кількості землетрусів у квітні — травні для північної півкулі супроводжується падінням кількості землетрусів в південній, а в вересні картина прямо протилежна. Землетруси в екваторіальній зоні ($-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$) визначають середньомісячний розподіл землетрусів по земній кулі, при цьому простежується залежність від взаємного розташування Землі і Сонця. Поблизу точки афелію (найбільш від-

далена від Сонця точка орбіти Землі) кількість землетрусів збільшується, поблизу точки перигелію (найближча до Сонця точка орбіти Землі) — зменшується. Цікавим є також факт збільшення кількості землетрусів поблизу точки весняного рівнодення.

7. ВИСНОВКИ

Як механізм запуску землетрусів в результаті сонячних впливів розглядалися різні прояви сонячної активності.

Можна відзначити, що дуже часто висновки про зв'язок землетрусів і будь-яких проявів сонячної активності робляться на основі однієї-двох подій з того чи іншого боку [1, 6, 26]. Ми намагалися розглянути якомога більшу кількість землетрусів, порівняти ці результати з результа-

тами, отриманими в умовах обмеженої вибірки. Як впливає з наших досліджень, необхідно залучати якомога повніші дані при аналізі можливих зв'язків між сонячною активністю і землетрусами. Але що більше даних ми аналізуємо, то слабшим виявляється цей зв'язок.

Таким чином, неможливо не погодитися з висновками роботи [15] про те, що в даний момент немає статистично істотних залежностей між сонячно-земними змінними і виникненням землетрусу. І хоча не можна остаточно відкинути гіпотезу про сонячний механізм запуску землетрусів, поки що він явно не проявляється.

Що стосується довгострокових, і особливо короткострокових прогнозів землетрусів, то нам здається, що робити їх на основі даних про сонячну активність немає підстав.

ЛІТЕРАТУРА

1. Anagnostopoulos G., Papandreou A. Space conditions during a month of a sequence of six $M > 6.8$ earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.* 2012. **12**. P. 1551—1559.
2. Fishkova L. M., Gokhberg M. B., Pilipenko V. A. Relationship between night airglow and seismic activity. *Ann. Geophys.* 1985. **3**(6). P. 689—694.
3. Gole P. K., Midya S. K., Panda P., Nandi A. Intensity variations of O I 557.7 nm and O I 630.0 nm lines before M5.0 and greater earthquakes in Tokyo region, Japan, in 1979 to 1990. *Atmos. and Oceanic Opt.* 2018. **31**(6). P. 670—677.
4. Gross R. S., Chao B. The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake. *Surv. Geophys.* 2006. **27**. P. 615—632.
5. Hagen M., Azevedo A. Possible Connections between X-Solar Flares and Worldwide Variation in Seismicity Enhancement. *Natur. Sci.* 2017. **9**(12). P. 457—476.
6. Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s \geq 8$) in faults with near west-east strike in China. *Sci. in China. Ser. G Phys., Mech. and Astron.* 2004. **47**(2). P. 173—181.
7. Huzaimy J. M., Yumoto K. Possible correlation between solar activity and global seismicity. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Space Sci. Comm. Penang Malaysia. 2011. P. 138—141.
8. Jusoh M. H. Solar Activity and Seismicity.— A dissertation submitted by the Department of Earth and Planetary Sciences Graduate School of Science in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Science Kyushu University Fukuoka, Japan. 2013. 90 p.
9. Khain V. E., Khalilov E. N. About possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: long-term forecast. *Trans. Int. Acad. Sci. H&E. SWB.* 2007/2008. **3**. P. 217—256.
10. Kızılok Kara E., Durukan K. The statistical analysis of the earthquake hazard for Turkey by generalized linear models. *Gazi Univ. J. Sci.* 2017. **30**(4). P. 584—597.
11. Larocca, P. A. Application of the cross wavelet transform to solar activity and major earthquakes occurred in Chile. *Int. J. Geosci.* 2016. **7**(11). P. 1310—1317.
12. Lin C.-H., Yeh Y. H., Chen Y.-I., Zheng B., Chen K. J. Earthquake clustering relative to lunar phases in Taiwan. *Terrest. Atmos. and Oceanic Sci.* 2003. **14**(3). P. 1—10.
13. Liritzis I., Tsapanos T. M. Probable evidence for periodicities in global seismic energy release. *Earth, Moon and Planets.* 1993. **60**(2). P. 93—108.
14. Lomnitz C. Estimation problems in earthquake series. *Tectonophysics.* 1964. **1**(2). P. 193—203.
15. Love J. J., Thomas J. N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40**(6). P. 1165—1170.

16. McMinn D. 9/56 year cycle: 18th & 19th century world earthquakes. *New Concepts in Global Tectonics. Newsletter*. 2012. **65**. P. 15–26.
17. Meeus J., Gribbin J. Sunspots and earthquakes. *Physics Today*. 1976. **29**(6). P. 11–12.
18. Michael M. O. Fluctuations in yearly numbers of $M \leq 8.0$ earthquakes, 1900–1975. *New Zealand J. Geol. and Geophys.* 1978. **21**(1). P. 135–136.
19. Midya S. K., Gole P. K. Trend of major earthquakes during the period 1900–2011 and its association with some solar and geomagnetic parameters. *Indian J. Phys.* 2013. **88**(1). P. 1–4.
20. Midya S. K., Panda P. Study of Major Earthquakes (Magnitude ≥ 6 Richter Scale) with Cp Index During the Period 2001–2007. *Pacif. J. Sci. and Technol.* 2013. **14**(1). P. 586–592.
21. Nikouravan B. Do Solar Activities Cause Local Earthquakes? (New Zealand). *Int. J. Fundamen. Phys. Sci.* 2012. **2**. P. 20–23.
22. Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. Chem. Earth*. 2006. **31**. P. 88–93.
23. Police Countermeasures and Damage Situation associated with 2011Tohoku district — off the Pacific Ocean Earthquake. June 10, 2019. URL: https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo_e.pdf, <https://www.unisdr.org/archive/61121> (дата звернення: 24.12.2019).
24. Rajesh R., Tiwari R. K. Brief Communication: Correlation of global earthquake rates with temperature and sunspot cycle. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.* 2014. **2**(4). P. 2851–2867.
25. Rao N. M., Kaila K. L. Model of earthquake-energy periodicity in the Alpide-Himalayan seismotectonic belt. *Tectonophysics*. 1986. **124**(3). P. 261–270.
26. Ruzhin Yu., Novikov V. The response of global seismicity to solar flares of September, 2017. *Int. J. Electron. Appl. Res.* 2018. **5**(2). P. 1–10.
27. Shlien S., Toksöz M. N. A clustering model for earthquake occurrences. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1970. **60**(6). P. 765–1787.
28. Simpson J. F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1967–1968. **3**. P. 417–425.
29. Sukma I., Abidin Z. Z. Study of seismic activity during the ascending and descending phases of solar activity. *Indian J. Phys.* 2017. **91**(6). P. 595–606.
30. Tavares M., Azevedo A. Influences of solar cycles on earthquakes. *Natur. Sci.* 2011. **3**(6). P. 436–443.
31. Vere-Jones D., Davies R. B. A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand. *New Zealand J. Geol. and Geophys.* 1966. **9**(3). P. 251–284.
32. Wallemacq P., Below R., McLean D. UNISDR and CRED report: Economic Losses, Poverty & Disasters (1998–2017). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2018. URL: https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_Economic%20Losses.pdf (дата звернення: 24.12.2019).
33. Xingxin D. Wavelets Data Based Analysis of Dynamic Seismicity Period. *Earthquake*. 1997. **17**. P. 257–264.
34. Yesugey S. C. Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula. *Earth Sci. Res. J.* 2009. **13**. P. 82–89.
35. Zhang G.-Q. Relationship between global seismicity and solar activities. *Acta Seismol. Sinica*. 1998. **11**. P. 495–500.
36. Zhang Z. X., Li X. The sinusoidal periodicity nature for $M \geq 5$ global earthquakes. 2016. arXiv:1607.05391v1 [physics.geo-ph] 19 Jul 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1607.05391> (дата звернення: 24.12.2019).

Стаття надійшла до редакції 24.12.2019

REFERENCES

1. Anagnostopoulos G., Papandreou A. (2012). Space conditions during a month of a sequence of six $M > 6.8$ earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.*, **12**, 1551–1559.
2. Fishkova L. M., Gokhberg M. B., Pilipenko V. A. (1985). Relationship between night airglow and seismic activity. *Ann. Geophys.*, **3**(6), 689–694.
3. Gole P. K., Midya S. K., Panda P., Nandi A. (2018). Intensity variations of O I 557.7 nm and O I 630.0 nm lines before M5.0 and greater earthquakes in Tokyo region, Japan, in 1979 to 1990. *Atmos. and Oceanic Opt.*, **31**(6), 670–677.
4. Gross R. S., Chao B. (2006). The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake. *Surv. Geophys.*, **27**, 615–632.
5. Hagen M., Azevedo A. (2017). Possible connections between X-solar flares and worldwide variation in seismicity enhancement. *Natur. Sci.*, **9**(12), 457–476.
6. Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. (2004). Possible triggering of solar activity to big earthquakes ($M_s \geq 8$) in faults with near west-east strike in China. *Sci. in China. Ser. G Phys., Mech. and Astron.*, **47**(2), 173–181.
7. Huzaimy J. M., Yumoto K. (2011). Possible correlation between solar activity and global seismicity. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Space Sci. Comm. Penang Malaysia, 138–141.

8. Jusoh M. H. (2013). Solar Activity and Seismicity.— A dissertation submitted by the Department of Earth and Planetary Sciences Graduate School of Science in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Science Kyushu University Fukuoka, Japan. 90 p.
9. Khain V. E., Khalilov E. N. (2007/2008). About Possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: long-term forecast. *Trans. Int. Acad. Sci. H&E., SWB*, **3**, 217—256.
10. Kızilok Kara E., Durukan K. (2017). The statistical analysis of the earthquake hazard for Turkey by generalized linear models. *Gazi Univ. J. Sci.*, **30**(4), 584—597.
11. Larocca P. A. (2016). Application of the Cross Wavelet Transform to Solar Activity and Major Earthquakes Occurred in Chile. *Int. J. Geosci.*, **7**(11), 1310—1317.
12. Lin C.-H., Yeh Y. H., Chen Y.-I., Zheng B., Chen K. J. (2003). Earthquake clustering relative to lunar phases in Taiwan. *Terrest. Atmos. and Oceanic Sci.*, **14**(3), 1—10.
13. Liritzis I., Tsapanos T. M. (1993). Probable Evidence for Periodicities in Global Seismic Energy Release. *Earth, Moon, and Planets.*, **60**(2), 93—108.
14. Lomnitz C. (1964). Estimation problems in earthquake series. *Tectonophys.*, **1**(2), 193—203.
15. Love J. J., Thomas J. N. (2013). Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(6), 1165—1170.
16. McMinn D. (2012). 9/56 year cycle: 18th & 19th century world earthquakes. *New Concepts in Global Tectonics. Newsletter*, **65**, 15—26.
17. Meeus J., Gribbin J. (1976). Sunspots and earthquakes. *Physics Today*, **29**(6), 11—12.
18. Michael M. O. (1978). Fluctuations in yearly numbers of $M \leq 8.0$ earthquakes, 1900—1975. *New Zealand J. Geol. and Geophys.*, **21**(1), 135—136.
19. Midya S. K., Gole P. K. (2013). Trend of major earthquakes during the period 1900—2011 and its association with some solar and geomagnetic parameters. *Indian J. Phys.*, **88**(1), 1—4.
20. Midya S. K., Panda P. (2013). Study of major earthquakes (Magnitude ≥ 6 Richter Scale) with C_p index during the period 2001—2007. *Pacif. J. Sci. and Technol.*, **14**(1), 586—592
21. Nikouravan B. (2012). Do solar activities cause local earthquakes? (New Zealand). *Int. J. Fundamental Phys. Sci.*, **2**, 20—23.
22. Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. (2006). Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. Chem. Earth*, **31**, 88—93.
23. Police countermeasures and damage situation associated with 2011Tohoku district — off the Pacific Ocean Earthquake. June 10, 2019. URL: https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo_e.pdf, <https://www.unisdr.org/archive/61121>. (Last accessed: 24.12.2019).
24. Rajesh R., Tiwari R. K. (2014). Brief communication: Correlation of global earthquake rates with temperature and sunspot cycle. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.*, **2**(4), 2851—2867.
25. Rao N. M., Kaila K. L. (1986). Model of earthquake-energy periodicity in the Alpid-Himalayan seismotectonic belt. *Tectonophys.*, **124**(3), 261—270.
26. Ruzhin Yu., Novikov V. (2018). The response of global seismicity to solar flares of September, 2017. *Int. J. Electron. Appl. Res.*, **5**(2), 1—10.
27. Shlien S., Toksöz M. N. (1970). A clustering model for earthquake occurrences. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **60**(6), 765—1787.
28. Simpson J. F. (1967—1968). Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **3**, 417—425.
29. Sukma I., Abidin Z. Z. (2017). Study of seismic activity during the ascending and descending phases of solar activity. *Indian J. Phys.*, **91**(6), 595—606.
30. Tavares M., Azevedo A. (2011). Influences of solar cycles on earthquakes. *Natur. Sci.*, **3**(6), 436—443.
31. Vere-Jones D., Davies R. B. (1966). A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand. *New Zealand J. Geol. and Geophys.*, **9**(3), 251—284.
32. Wallemacq P., Below R., McLean D. (2018). *UNISDR and CRED report: Economic Losses, Poverty & Disasters* (1998—2017). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. URL: https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_Economic%20Losses.pdf (Last accessed: 24.12.2019).
33. Xingxin D. (1997). Wavelets Data Based Analysis of Dynamic Seismicity Period. *Earthquake*, **17**, 257—264.
34. Yesugey S. C. (2009). Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula. *Earth Sci. Res. J.*, **13**, 82—89.
35. Zhang G.-Q. (1998). Relationship between global seismicity and solar activities. *Acta Seismol. Sinica*, **11**, 495—500.
36. Zhang Z. X., Li X. *The sinusoidal periodicity nature for $M \geq 5$ global earthquakes*. 2016. arXiv:1607.05391v1 [physics.geo-ph] 19 Jul 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1607.05391> (Last accessed: 24.12.2019).

Received 24.12.2019

I. E. Vasyliєva

Senior Researcher, Ph.D. in Phys.& Math., Senior Researcher

E-mail: vasil@mao.kiev.ua

Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

27 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143 Ukraine

IS THERE ANY CONNECTION BETWEEN SOLAR ACTIVITY AND EARTHQUAKES?

A possible relationship between solar activity and the seismic activity of the Earth is considered. We analyzed the frequency of occurrence of earthquakes of various magnitudes with the Fourier transform: for $M \geq 7$ over the period 1900–2019 and for $2.5 \leq M \leq 7$ over the period 1973–2019. The average annual, monthly, and daily values of the solar-terrestrial variables, the number of earthquakes with intensities that fall within the specified boundaries are calculated. The epoch overlapping method was used to analyze the possible relationship between the Wolf numbers and the number of earthquakes at the corresponding moment in the cycle. 4 periods of each solar cycle were identified: the phase of ascending, maximum, descending, and minimum. Earthquakes over the entire globe and in the regions of extension and compression of the earth's crust were analyzed for each phase. No statistically significant dependencies between solar-terrestrial variables and earthquake initiation were found for all time intervals and all selected earthquake magnitudes. An interesting fact was established concerning the change in the number of earthquakes at different periods of the day. The number of earthquakes in the nighttime appreciably increases (by $\sim 10\%$) compared to the daytime. A slight increase in the number of earthquakes after local noon was also detected. We could not confirm the existence of a direct connection between solar activity and the seismic activity of the Earth, but we cannot also claim that such a connection does not exist.

Keywords: solar activity, cyclicity, earthquakes, Wolf numbers, solar flares.