



ON PROPER TIME OF THE SOURCE OF A STRONG EARTHQUAKE

A.V. Guglielmi ¹, O.D. Zotov ^{1,2}, A.D. Zavyalov ¹, B.I. Klain ²✉

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

² Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 142, Borok 152742, Russia

ABSTRACT. The physics of earthquakes was contributed to by the concept of proper time of the source of a strong earthquake, which is different from universal (calendar) time. The earlier idea of proper time was implicit and has been considered only in relation to the physics of aftershocks. The present paper extends the applicability of the concept of proper time, proposes a possible way of its measuring, and provides an example to illustrate the procedure for sequential ordering of earthquakes by proper time. The object of this study is a global activity of strong ($M \geq 7$) earthquakes. We consider the sequence of earthquakes as a Poisson-type random process. Comparatively weak earthquakes are used as the "underground clock", the tick of which marks the proper time. The Poisson distribution is compared with the distributions for two sequences of strong earthquakes. One of the sequences is ordered by universal time, and another – by proper time. The studies indicate the distribution of events ordered by proper time is closer to the Poisson distribution than that of events ordered by universal time. We attribute this to the non-stationarity of the geological medium, which is an immanent property of the Earth's lithosphere.

KEYWORDS: geodynamics; aftershocks; Omori law; evolution equation; deactivation coefficient; non-uniformity of time; non-stationarity of geological medium; Poisson process

FUNDING: The work is done according to the program plan as part of the state assignment of IPE RAS.



SHORT COMMUNICATION

Correspondence: Boris I. Klain, klb314@mail.ru

Received: August 5, 2022

Revised: November 25, 2022

Accepted: December 12, 2022

FOR CITATION: Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I., 2023. On Proper Time of the Source of a Strong Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0701. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0701

English version: see article page online

О СОБСТВЕННОМ ВРЕМЕНИ ОЧАГА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

А.В. Гульельми¹, О.Д. Зотов^{1,2}, А.Д. Завьялов¹, Б.И. Клайн²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

² Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, 152742, пос. Борок, 142, Россия

АННОТАЦИЯ. В физику землетрясений введено понятие о собственном времени очага сильного землетрясения, отличном от универсального (календарного) времени. Ранее использовалась идея о собственном времени, но неявно и только лишь в узкой области, относящейся к физике афтершоков. В данной работе расширена область применимости представления о собственном времени, указан возможный способ его измерения и приведен пример, иллюстрирующий процедуру упорядочивания последовательности землетрясений в собственном времени. В качестве объекта исследования выбрана глобальная активность сильных землетрясений ($M \geq 7$). Последовательность землетрясений мы рассматриваем как случайный процесс пуассоновского типа. В качестве «подземных часов», тиканье которых отмечает ход собственного времени, использованы сравнительно слабые землетрясения. Распределение Пуассона сопоставлено с распределениями для двух последовательностей сильных землетрясений, одна из которых упорядочена по универсальному времени, а другая – по собственному. Результат испытания показал, что распределение событий, упорядоченных по собственному времени, ближе к распределению Пуассона, чем распределение событий, упорядоченных по универсальному времени. Авторы объясняют это нестационарностью геологической среды, которая является имманентным свойством литосферы Земли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геодинамика; закон Омори; уравнение эволюции; коэффициент деактивации; неравномерность течения времени; нестационарность геологической среды; пуассоновский процесс

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в соответствии с программами госзадания ИФЗ РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Под собственным временем в широком смысле авторы понимают естественные механизмы синхронизации динамической системы, погруженной в нестационарную среду. Известны случаи удачного выбора «внутренних часов», по которым фактически протекают те или иные аспекты функционирования динамической системы. Например, в биологии циклы жизнедеятельности организмов в некоторых случаях регулируются циркадным ритмом, происхождение которого связано с вращением Земли. В солнечно-земной физике вращение Солнца приводит к квазипериодическому пересечению Землей резких границ между секторами межпланетного магнитного поля, что помогает рационально производить упорядочивание временного ряда последовательности геоэлектромагнитных событий. В предлагаемой работе предпринята попытка ввести представление о собственном времени в тектофизику. Поясняется сказанное следующими ображениями.

В земной коре непрерывно протекает сложный комплекс тектонофизических процессов, приводящих к деформации и изменению напряженного состояния той среды, в которой время от времени происходит структурная перестройка, возникает магистральный разрыв сплошности и наблюдается главный удар землетрясения [Gzovsky, 1975; Goncharov et al., 2005]. Другими словами, землетрясение происходит в нестационарной среде, параметры которой изменяются во времени. Из физики известно, что в нестационарной среде

характер функционирования динамической системы в целом и, в частности, катастрофический переход существенным образом зависят от темпа изменения параметров среды, в которую система погружена. Следует подчеркнуть, что известные математические, лабораторные и природные методы и результаты тектонофизического моделирования позволяют качественно представить нестационарность горных пород, но этого недостаточно для оптимальной хронологизации потока сильных землетрясений. В этих обстоятельствах идея собственного времени, отсчет которого ведется по более слабым подземным толчкам, может оказаться в ряде случаев полезной.

Представление о собственном времени очага возникло при изучении афтершоков сильного землетрясения [Guglielmi, 2016, 2017]. Идея оказалась удачной и была использована в ряде публикаций (см., например [Zavyalov et al., 2020; Guglielmi et al., 2021, 2022; Guglielmi, Zotov, 2021; Zotov, Guglielmi, 2021]). История вопроса такова.

В 1894 г. Ф. Омори открыл первый закон физики землетрясений [Omori, 1895], который гласит, что частота афтершоков n в среднем гиперболически уменьшается с течением времени:

$$n(t) = \frac{k}{c+t}, \quad (1)$$

здесь $k > 0$, $c > 0$, $t > 0$. Было замечено [Guglielmi, 2016], что закон Омори (1) можно представить в виде уравнения эволюции афтершоков:

$$\frac{dn}{dt} + \sigma n^2 = 0, \quad (2)$$

здесь σ – так называемый коэффициент деактивации очага землетрясения, «остывающего» после главного удара. При $\sigma = \text{const}$ общее решение дифференциального уравнения (2) совпадает с формулой Омори (1) с точностью до обозначений.

Иначе посмотрели на закон Омори Р. Хирано [Hirano, 1924], Т. Утсу и др. [Utsu, 1961; Utsu et al., 1995]. Они решили, что формула (1) некорректна и предложили свою версию закона:

$$n(t) = \frac{k}{(c+t)^p}, \quad (3)$$

авторы же отдают предпочтение закону в виде уравнения (2). Он формулируется с использованием лишь трех символов (n, t, σ) вместо пяти (n, t, k, c, p), которые используются в выражении (3). Более того, уравнение эволюции (2) допускает естественные обобщения [Zavyalov et al., 2020; Guglielmi et al., 2022; Guglielmi, Klain, 2020], отнюдь не очевидные при определении закона Омори в формуле Хирано-Утсу.

Решение уравнения (2) можно записать в виде, наиболее близком к формуле Омори (1):

$$n(\tau) = \frac{1}{n_0^{-1} + \tau}, \quad (4)$$

здесь $n_0 = n(0)$. Величину

$$\tau = \int_0^t \sigma(t') dt' \quad (5)$$

будем называть **собственным временем очага**, «остывающего» после главного удара землетрясения. Здесь авторы следуют традиции, обозначая собственное время буквой τ , чтобы отличить его от универсального времени t . Отличие τ от t , наблюдавшееся на опыте, объясняется нестационарностью массива горных пород в очаге после образования магистрального разрыва.

К настоящему времени накоплен успешный опыт использования τ наряду с мировым временем t при исследовании афтершоков [Zavyalov et al., 2020; Guglielmi et al., 2019, 2021, 2022; Guglielmi, Zotov, 2021; Zotov, Guglielmi, 2021]. Следует особо подчеркнуть, что ранее идея о собственном времени использовалась неявно и только в сравнительно узкой области, относящейся к физике афтершоков. В данной работе предпринята попытка расширить представление о собственном времени протекания тектонических процессов в надежде на то, что в будущем это окажется полезным. Эта попытка оправдана тем, что нестационарность является имманентным свойством литосферы Земли.

2. ОБОБЩЕНИЕ

В качестве объекта исследования выбрана глобальная активность сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 7$. По замыслу для этого необходимы «подземные часы», тиканье которых отмечает ход собственного времени. Вид формулы (4) подсказывает, что разумно

попытаться использовать сравнительно слабые землетрясения для отсчета собственного времени. Выбраны землетрясения с магнитудой $6 \leq M < 7$ в качестве пробной прогонки.

Для иллюстрации того, как можно использовать собственное время, авторы провели небольшое испытание. Последовательность землетрясений представлена как случайный процесс пуассоновского типа, т.е. как цепочка мгновенных событий, разделенных некоторыми промежутками времени. Распределение Пуассона имеет вид:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda). \quad (6)$$

При $\lambda = at$ величина $p_k(t)$ есть вероятность того, что за время t происходит k событий. Среднее число событий равно

$$\langle k \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k p_k(t) = at. \quad (7)$$

При $\lambda = \alpha\tau$ величина $p_k(\tau)$ есть вероятность того, что происходит k событий за время τ . Среднее число событий равно

$$\langle k \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k p_k(\tau) = \alpha\tau. \quad (8)$$

Сопоставим распределение (6) с распределениями для двух последовательностей сильных землетрясений. Одну из последовательностей упорядочим по универсальному времени, а вторую – по собственному. Результат испытания показан на рис. 1. Данные о распределении во времени землетрясений, которые произошли в 2020 и 2021 гг., взяты из каталога USGS/NEIC World Catalog of Earthquakes (<https://earthquake.usgs.gov>). За 24 месяца произошло 31 сильное землетрясение, т.е. в среднем произошло $\lambda = 1.3$ события за один месяц. За 24 месяца наблюдалось 255 более слабых землетрясений, которые авторы условились использовать для отсчета собственного времени.

На рис. 1 распределение Пуассона окрашено серым цветом. Синим и зеленым цветом окрашены распределения событий, упорядоченных соответственно по универсальному и собственному времени. Вообще, распределение событий, упорядоченных по собственному времени, немного ближе к распределению Пуассона, чем распределение событий, упорядоченных по универсальному времени. Однако объем выборки в данном иллюстративном примере слишком мал, чтобы на данном этапе исследования придавать этому особое значение. В следующем разделе статьи намечен план более тщательного исследования последовательности событий, упорядоченных по собственному времени.

Произведем сравнительный анализ на более обширном числовом материале. Вначале стоит отметить, что при пуассоновском процессе события в среднем происходят равномерно. Это значит, что с течением времени пуассоновский процесс в среднем ведет к линейному росту накопленного числа событий.

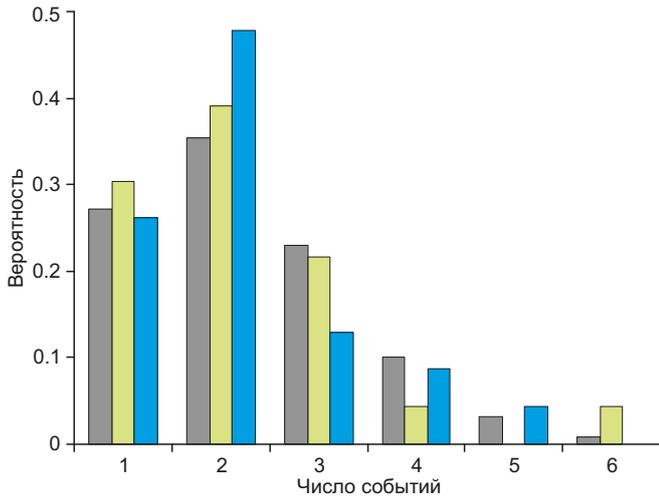


Рис. 1. Распределения сильных землетрясений. По горизонтальной оси указано количество событий на интервале в один месяц универсального времени (синий цвет) и на интервале собственного времени (зеленый цвет). Серым цветом представлено распределение Пуассона.

Fig. 1. Distributions of strong earthquakes. The horizontal axis shows the number of events in one-month interval according to universal time (blue color) and in the interval of proper time (green color). The gray color represents the Poisson distribution.

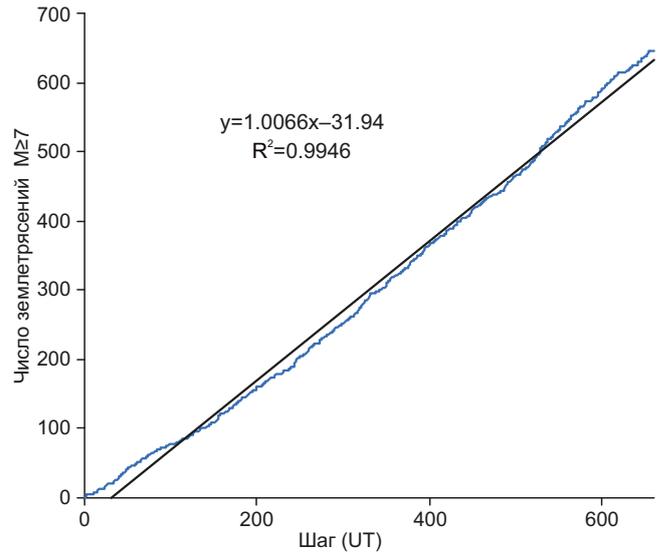


Рис. 2. Зависимость накопленного числа землетрясений с $M \geq 7$ от универсального времени. Шаг по времени 26 дней выбран таким образом, чтобы число точек примерно совпало с числом точек на рис. 3.

Fig. 2. Dependence of the accumulated number of $M \geq 7$ earthquakes on universal time. The time step of 26 days is chosen so that the number of points approximately coincides with the number of points in Fig. 3.

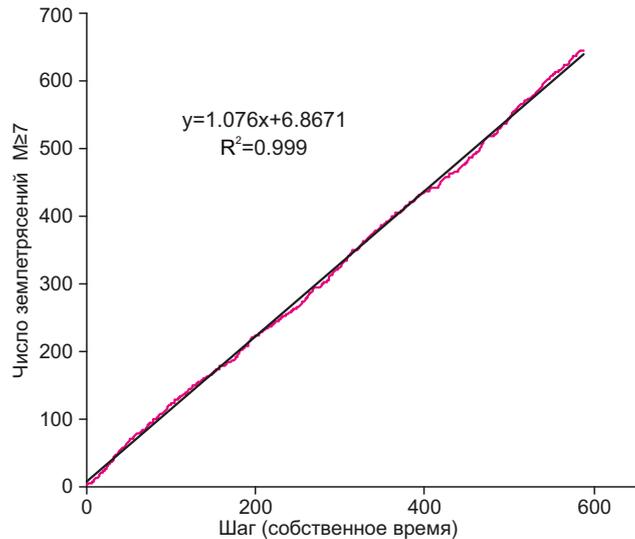


Рис. 3. Зависимость накопленного числа землетрясений с $M \geq 7$ от собственного времени. Шаг накопления равен 10 ударам «подземных часов».

Fig. 3. Dependence of the accumulated number of $M \geq 7$ earthquakes on proper time. The accumulation step is equal to 10 strokes of the "underground clock".

С 1973 по 2019 г. на Земле произошло 646 землетрясений с магнитудой $M \geq 7$ и 5886 землетрясений с магнитудой $6 \leq M < 7$. Ход накопления сильных землетрясений показан на рис. 2 и 3 при упорядочивании событий по мировому и собственному времени соответственно. Видно, что во втором случае экспериментальная кривая меньше уклоняется от прямой линии, чем в первом.

Для того чтобы сделать указанное различие более наглядным, на рис. 4 показаны отклонения реальных кривых от прямой линии. Очевидно, что использование собственного времени лучше соответствует теории пуассоновского процесса, чем использование универсального времени.

Еще более убедительно об этом свидетельствует рис. 5, на котором показаны распределения модулей

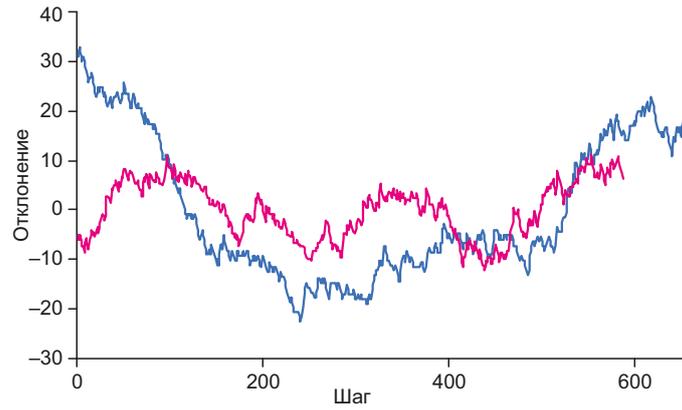


Рис. 4. Отклонение кривых, показанных на рис. 2 (синий цвет) и рис. 3 (красный цвет), от теоретической прямой линии.
Fig. 4. Deviations of the curves, shown in Fig. 2 (blue) and Fig. 3 (red), from the theoretical straight line.

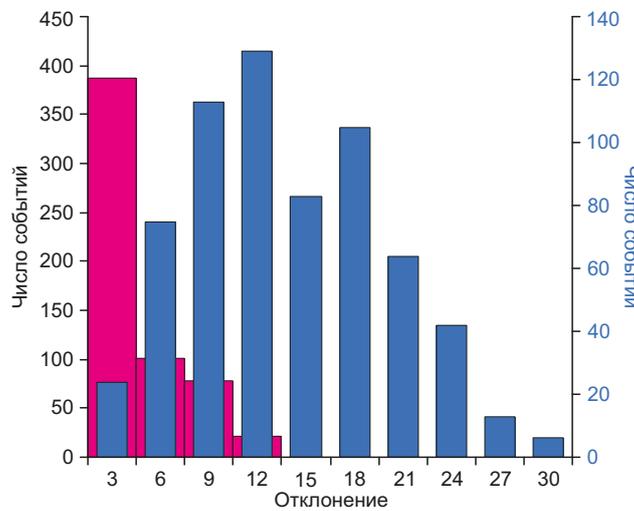


Рис. 5. Распределения абсолютных значений отклонения кривых, показанных на рис. 2 (синий цвет) и рис. 3 (красный цвет), от прямых линий.
Fig. 5. Distributions of the absolute values of the deviations of the curves, shown in Fig. 2 (blue) and Fig. 3 (red), from the straight lines.

отклонения экспериментальных кривых от теоретических линий.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Геологическая среда вообще нестационарна, ее параметры изменяются во времени. Весьма существенно то, что нестационарность нередко скрыта от наблюдателя. Изучая геодинамические явления по часам универсального времени, наблюдатель обнаруживает некоторые корреляции, однако при наличии латентной нестационарности корреляции могут оказаться слабыми или вообще не наблюдаться при упорядочивании последовательности явлений по часам универсального времени. В этих обстоятельствах менее совершенные часы, отсчитывающие собственное время, могут оказаться полезным инструментом исследователя.

Гиперболический закон Омори в форме (2) позволяет дать наглядный пример, поясняющий сказанное выше. Течение собственного времени отсчитывается по афтершокам. Вводится вспомогательная функция

$g(t)=1/n(t)$ и усредняется по надлежащим образом выбранным небольшим интервалам времени: $g \rightarrow \langle g \rangle$. После этого вычисляется коэффициент деактивации очага землетрясения по формуле:

$$\sigma = \frac{d}{dt} \langle g \rangle. \tag{9}$$

В так называемую эпоху Омори [Zavyalov et al., 2020], когда $\sigma = \text{const}$, наблюдается равномерный рост параметра $\langle g \rangle$ с течением времени: $\langle g \rangle \propto t$.

Авторы кратко описали постановку и процедуру решения обратной задачи физики очага [Guglielmi, 2017; Zavyalov et al., 2020; Guglielmi et al., 2019, 2021]. Опыт показал, что коэффициент деактивации, этот важнейший феноменологический параметр очага, испытывает сложные вариации во времени. Другими словами, горные породы в очаге находятся в нестационарном состоянии. Стоит отметить, что при постановке и решении обратной задачи идея о собственном времени использовалась неявно.

Ранее Р. Хирано [Hirano, 1924] уже обращал внимание на нестационарность геологической среды в остывающем очаге и пытался учесть нестационарность, заменив параметр p в формуле (3) на кусочно-непрерывную функцию $p(t)$. Однако при такой замене формула (3) становится логически невнятной. В отличие от этого, закон Омори в виде выражений (2), (4) корректен в математическом отношении, содержит представление о собственном времени и позволяет гибко моделировать нестационарность среды в очаге землетрясения.

При попытке обобщить представление о собственном времени авторы выбрали «часы», которые, oddly enough, тикают слишком громко. В самом деле, отсчет времени путем регистрации землетрясений с магнитудой из интервала $6 \leq M < 7$ мотивирован только лишь простотой обработки сравнительно небольшого массива числовой информации. В дальнейшем планируется использовать более слабые землетрясения.

Выбор конкретного объекта исследования (глобальная активность сильных землетрясений) также был сделан в данной работе достаточно произвольно. В дальнейшем интересно будет исследовать не только глобальную, но и региональную сейсмичность. Предметом изучения может быть, например, кросс-корреляция землетрясений в Северной и Южной Калифорнии. С 1983 по 2007 г. обнаружена антикорреляция между флуктуациями среднесуточной магнитуды землетрясений в этих двух смежных регионах [Zotov et al., 2022]. Этот результат можно попытаться уточнить, используя для упорядочивания землетрясений собственное время.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе, носящей сугубо дискуссионный характер, авторы в явной форме ввели в геотектонику понятие о собственном времени, отличном от универсального. Ранее уже использовалась идея о собственном времени, но неявно, и только лишь в сравнительно узкой области, относящейся к физике афтершоков. В данной работе предпринята попытка расширить область применимости представления о собственном времени, указан возможный способ его измерения и приведен простой пример, иллюстрирующий процедуру упорядочивания последовательности сильных землетрясений в соответствии с собственным временем.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Геологической службе США (USGS) за предоставление каталогов землетрясений.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Goncharov M.A., Talitsky V.G., Frolova N.S., 2005. Introduction to Tectonophysics. Textbook. University Book House, Moscow, 496 p. (in Russian) [Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику: Учебное пособие. М.: Книжный дом «Университет», 2005. 496 с.].

Guglielmi A.V., 2016. Interpretation of the Omori Law. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 52, 785–786. <https://doi.org/10.1134/S1069351316050165>.

Guglielmi A.V., 2017. Omori's Law: A Note on the History of Geophysics. *Physics Uspekhi* 60 (3), 319–324. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.01.038039>.

Guglielmi A.V., Klain B.I., 2020. The Phenomenology of Aftershocks. *arXiv:2009.10999* [physics.geo-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.10999>.

Guglielmi A.V., Klain B.I., Zavyalov A.D., Zotov O.D., 2021. A Phenomenological Theory of Aftershocks Following a Large Earthquake. *Journal of Volcanology and Seismology* 15, 373–378. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060038>.

Guglielmi A., Zotov O.D., 2021. Dependence of the Source Deactivation Factor on the Earthquake Magnitude. *arXiv:2108.02438* [physics.geo-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.02438>.

Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., 2019. A Project for an Atlas of Aftershocks Following Large Earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology* 13, 415–419. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060034>.

Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I., 2022. On the Fundamental Laws of Earthquake Physics. *Journal of Volcanology and Seismology* 16, 143–149. <https://doi.org/10.1134/S0742046322020026>.

Gzovsky M.V., 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].

Hirano R., 1924. Investigation of Aftershocks of the Great Kanto Earthquake at Kumagaya. *Kishoshushi* 2 (2), 77–83.

Omori F., 1895. On the Aftershocks of Earthquake. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo* 7 (2), 111–200. <https://doi.org/10.15083/00037562>.

Utsu T., 1961. A Statistical Study on the Occurrence of Aftershocks. *The Geophysical Magazine* 30, 521–605.

Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S., 1995. The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity. *Journal of Physics of the Earth* 43 (1), 1–33. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1>.

Zavyalov A.D., Guglielmi A.V., Zotov O.D., 2020. Three Problems in Aftershock Physics. *Journal of Volcanology and*

Seismology 14, 341–352. <https://doi.org/10.1134/S0742046320050073>.

Zotov O.D., Guglielmi A.V., 2021. Mirror Triad of Tectonic Earthquakes. arXiv:2109.05015 [physics.geo-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.05015>.

Zotov O.D., Zavyalov A.D., Guglielmi A.V., Klain B.I., 2022. Features of the Dynamics of Seismic Activity in Northern and Southern California. In: Trigger Effects in Geosystems.

Abstracts of the 6th International Conference (June 21–24, 2022). Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, p. 161 (in Russian) [Зотов О.Д., Завьялов А.Д., Клайн Б.И., Гульельми А.В. Особенности динамики сейсмической активности в Северной и Южной Калифорнии // Триггерные эффекты в геосистемах: Тезисы докладов VI Международной конференции (21–24 июня 2022 г.). М.: ИДГ РАН, 2022. С. 161].