

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 03.03.2021 ВОЗЛЕ ЛАРИСЫ (ГРЕЦИЯ) Mw = 6.3

Емил Ботев

*Национальный институт геофизики, геодезии и географии – Болгарская академия наук
e-mail: ebotev@geophys.bas.bg*

Ключевые слова: предвестники землетрясений, тест Utsu, Z-тест

Резюме: Район Ларисы считается одним из активных очагов землетрясений на Балканском полуострове. Это определяется активностью его роя и сложным характером стресса. За период с 1900 по 2021 год в регионе (круг радиусом 150 км) зарегистрировано 17 землетрясений с $M > 6$. Это исследование было проведено для оценки двумерного пространственного распределения значения b в районе Ларисы. Решетчатая техника Wiemer и Wyss (1997) была использована для расчета b -значения с помощью программного обеспечения ZMAP. Значение B рассчитано на основе каталога, состоящего из 8640 землетрясений, зарегистрированных с 1900 года до 2021 года, а также по кругу радиусом 150 км и центром - эпицентром землетрясения с 03.03.2021, с использованием метода максимальной вероятности. Важно отметить, что изменения значения b с течением времени не могут быть легко обнаружены за короткий период времени. Таким образом, это исследование было проведено для изучения вариаций значения b в пространстве. Расчетное значение b в районе Ларисы не имеет равномерного распределения.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE EARTHQUAKE 03.03.2021 NEAR LARISA (GREECE) Mw = 6.3

Emil Botev

*National Institute in Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ebotev@geophys.bas.bg*

Keywords: Earthquake Precursors, Utsu Test, Z-test

Abstract: The Larissa region is considered one of the active sources of earthquakes on the Balkan Peninsula. This is determined by the activity of his swarm and the complex nature of the stress. During the period from 1900 to 2021, 17 earthquakes with $M > 6$ were registered in the region (a circle with a radius of 150 km). This study was carried out to estimate the two-dimensional spatial distribution of the b value in the Larisa region. The lattice technique of Wiemer and Wyss (1997) was used to calculate the b -value using the ZMAP software. The B value is calculated from a catalog of 8640 earthquakes recorded since 1900. until 2021, as well as in a circle with a radius of 150 km and the center - the epicenter of the earthquake from 03.03.2021, using the maximum probability method. It is important to note that changes in b value over time cannot be easily detected in a short period of time. Therefore, this study was conducted to study the variations in b -value in space. The calculated value of b in the area of Larissa does not have a uniform distribution.

Введение

Землетрясения - это события, которые часто происходят в регионе Елинской дуги в результате погружения Нубийской плиты под Эгейскую плиту. Протяженность этого района составляет около 1200 км, начиная с западного побережья Туки и заканчивая западным островом Закинтос. В указанной сейсмической зоне 3 марта 2021 г. было зарегистрировано сильное землетрясение близ города Лариса в Греции. Это событие, а также серия последующих землетрясений, произошедших в последующие дни, ощущались даже во многих южных городах страны. Болгария, расположенная более чем в 200 км от эпицентра.

Величина наклона графика повторяемости (*b-value*) показывает распределение количества землетрясений по их магнитуде и широко используется в качестве характеристики сейсмического процесса. Этот параметр является предметом внимания сейсмологов, и многие исследования были посвящены его изучению. Интересным свойством наклона графика повторяемости является его изменение во времени [1]. Кроме того, как отмечается в ряде публикаций, временные колебания (аномальное уменьшение значения *b*) могут указывать на будущее землетрясение [2, 3, 4, 5]. Частотно-магнитудное распределение (1) определяет соотношение между частотой возникновения и силой землетрясений [6]:

$$(1) \quad \log N(M) = a + bM,$$

где $N(M)$ - количество землетрясений с магнитудой больше или равной M ; параметр a - параметр, характеризующий сейсмическую активность; параметр b описывает относительное распределение силы событий [7]. Пространственные вариации значения b характеризуют сейсмичность в данном регионе [8]. Обычно $b \geq 1$ предполагает неоднородность земной коры и низкое напряжение, тогда как $b < 1.0$ предполагает однородность земной коры и высокие объемы напряжения [7]. Исследования показали, что уменьшение значения b в исследуемой сейсмогенной области может быть связано с увеличением напряжения перед сильными землетрясениями [3].

В дополнение к вариациям значений b , изменения сейсмической активности и сейсмического затишья также могут быть индикаторами надвигающегося землетрясения. Изменения сейсмичности могут быть связаны с физическими свойствами земной коры, например, с изменением напряженного состояния [9; 10]. Заметное снижение сейсмической активности в течение месяцев или лет вокруг эпицентра надвигающегося умеренного или сильного землетрясения считается сейсмическим затишьем [11]. Подходящим подходом к изучению изменений сейсмической активности и сейсмической активности является Z-тест, которой используется во многих исследованиях [12].

Данная публикация направлена на изучение пространственных зон вокруг эпицентра, аномальных значений наклона графика повторяемости и других статистических параметров перед сейсмическим событием от 03.03.2021. с координатами эпицентра: 22,2012° E, 39,7532° N, магнитудой $M_w=6.3$ и $h=19$ км и их согласованием с исследованиями того же события [13].

Метод анализа данных

С учетом экспоненциального распределения землетрясений по магнитуде (закон Гутенберга-Рихтера) величина наклона графика повторяемости оценивается методом максимального правдоподобия [14].

$$(2) \quad b = \frac{\log e}{M_{\text{mean}} - M_{\text{min}}},$$

где M_{mean} - среднее значение магнитуды в выборке, M_{min} - минимальная величина выборки и рассчитывается как: $M_{\text{min}} = M_c - \Delta M / 2$, где ΔM - учитывает округление величины и здесь выбирается $\Delta M = 0,1$ [14], а M_c - величина полноты выборки. Среднеквадратичная ошибка оценки составляет

$$(3) \quad \sigma_b = \frac{b}{\sqrt{N}}$$

В этом исследовании пространственное распределение значения b было рассчитано с использованием программного обеспечения ZMAP [15, 16], с использованием методов максимального правдоподобия и метода регрессии наименьшего квадрата. Аки К. (1965) [17] придерживается мнения, что метод максимального правдоподобия дает более надежную оценку, чем метод регрессии наименьшего квадрата. Первым шагом в анализе b -значений является определение величины полноты M_c и ее ошибки. M_c определяется как наименьшая величина, при которой обнаруживаются 100% событий в заданном пространстве и времени [18]. Другими словами, значения ниже M_c считаются неоднородными и неполными.

Метод Z-теста основан на исследованиях Habermann [19] и ориентирован на определение пространственно-временных блоков в сейсмически активной зоне со значительным изменением интенсивности сейсмического потока событий в выбранный энергетический диапазон. Анализ основан на статистической функции Z-теста. Для определения сейсмического затишья область исследования покрывается фиксированной ступенчатой сеткой. Для каждого сетевого узла в данный момент времени вычисляется функция

$$(4) \quad z(t) = \frac{R_1 - R_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

где R_1 и R_2 – средние значения скорости потока землетрясений соответственно (количество землетрясений во временном окне 30 дней) для двух временных интервалов (один длительностью не менее одного года и привязанный к исследуемой дате, другое равное или равное всему остальному времени); σ_1 и σ_2 – стандартные отклонения R_1 и R_2 соответственно для первого и второго временного интервала, а n_1 и n_2 – количество землетрясений за соответствующий период. Землетрясения с глубиной гипоцентра до 70 км учитываются для каждого узла сети. Высокие (положительные) значения Z указывают на уменьшение скорости течения землетрясений, а низкие значения увеличиваются. Вычисленные значения в узлах сети объединяются по принципу пространственно-временного соседства и определяют участки с сейсмическим затишьями. Для всех расчетов использовалась программа ZMAP [20].

Исходные данные

В настоящем исследовании анализируется каталог за период 1900-2009 г. объединены каталогами независимых событий за годы с 2010 по 2021.04.03 Афинского университета [21], и событий на территории Болгарии [22, 23, 24, 25]. Объединенный каталог землетрясений охватывает данные в пространственном окне $32^\circ - 44^\circ$ N и $10^\circ - 30^\circ$ E (1900 - 2021.04.03; общее количество землетрясений 8640), глубиной $0 \leq h \leq 70$ км (рис. 1) и магнитудой M_w .

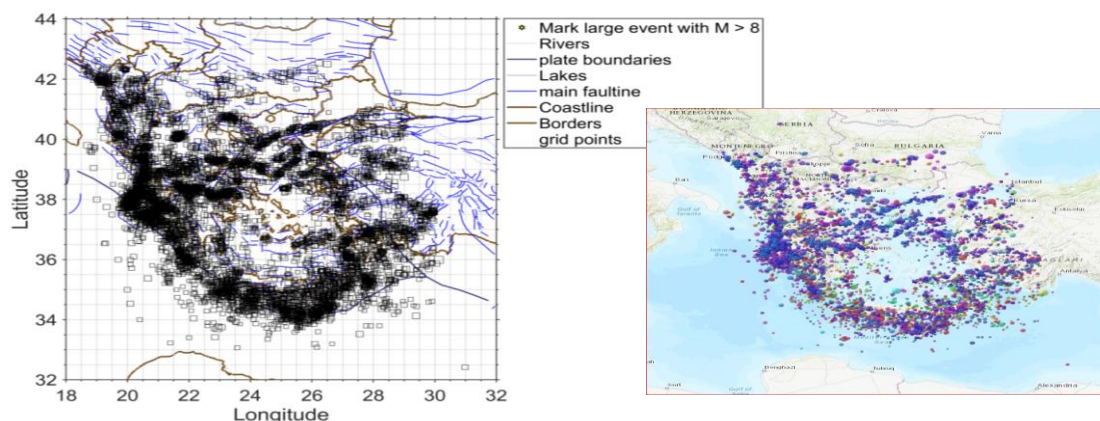


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с $M_c \geq 3.5$.

Для исследования землетрясения от 03.03.2021 г. с координатами $22,2012^\circ$ E, $39,7532^\circ$ N; $M_w = 6.3$, $h = 19$ км и $T_0 = 10:16:10.22$ выбрана пространственная окружность с радиусом 150 км и центром эпицентра исследуемого события (22.20° E, 39.75° N), представленного на рис. 2, содержащий 2602 события с $M_c > 3,5$.

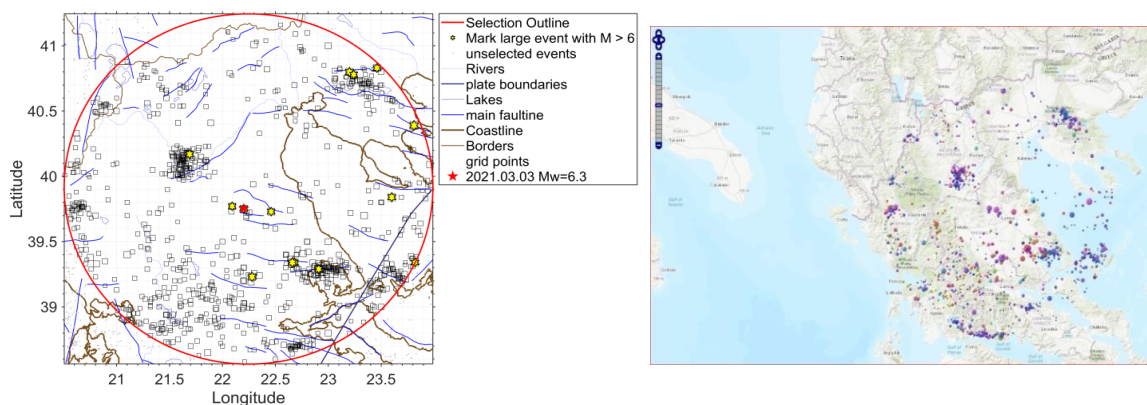


Рис. 2. Карты выбранного сайта обследования; ★ - эпицентр землетрясения от 03.03.2021 г.

Полученные результаты

Тест на Utsu

Для установления изменения b -параметра сравниваются значения b для двух периодов: 1-период с 2011.01.01 по 2015.12.30; и 2-период с 2016.01.01 по 2021.01.01 (что за 2 месяца до землетрясения от 03.03.2021) (рис.3) для сети ячеек 30x30 км. Если в обоих периодах размер выборки больше или равен $N_{min} = 50$ и, таким образом, b может быть вычислено, мы также вычисляем вероятность P_b гипотезы о том, что значения b для обоих периодов принадлежат одной и той же генеральной совокупности, т.е. демонстрируют стационарное поведение [15].

Эта вероятность (P_b) выводится из информационного критерия Акаике (A) [26]. Сравнение A_0 для двух периодов с одинаковым значением b b_0 и A_{12} для двух периодов с двумя разными значениями b b_1 и b_2 приводит к разнице dA этих двух результатов A, приведенных Utsu [27]: Вероятность оценивается по формуле

$$(5) \quad P \approx \exp\left(-\frac{dA}{2} - 2\right), \text{ где}$$

$$(8) \quad dA = -2N \ln(N) + 2N_1 \ln\left(N_1 + \frac{N_2 b_1}{b_2}\right) + 2N_2 \ln\left(\frac{N_1 b_2}{b_1} + N_2\right) - 2,$$

$N = N_1 + N_2$ - общее количество землетрясений за два периода (соответственно N_1 и N_2 - количество землетрясений за 1-й и 2-й периоды).

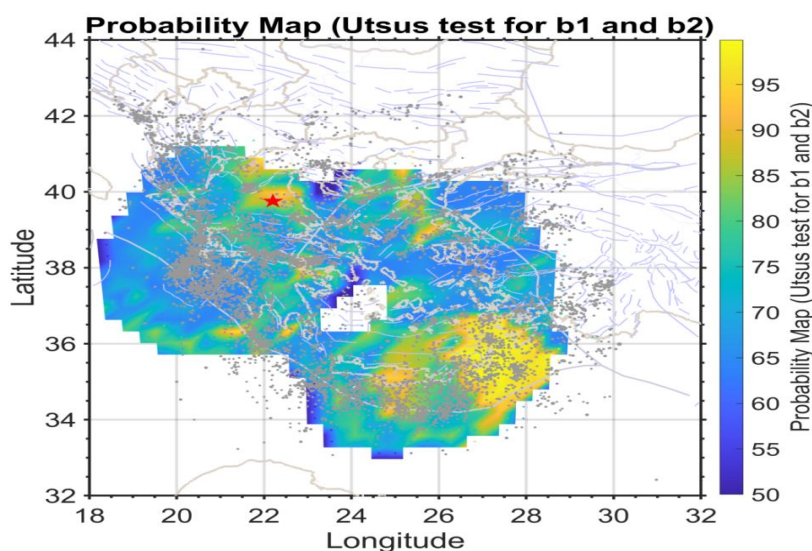


Рис. 3. Карта вероятности землетрясений (тест Utsus для периодов b_1 и b_2 ; Utsu, 1992); \star - эпицентр землетрясения от 03.03.2021 г.

Полученная карта вероятности возникновения сейсмического события в определенном месте четко показывает, что эпицентр события (красная пентаграмма) попадает в область с вероятностью $P > 90\%$.

Z-тест

Высокие (положительные) значения Z на картах можно интерпретировать как уменьшение скорости потока сейсмических событий (сейсмическое затишье) по сравнению с первым периодом, а низкие (отрицательные) значения Z представляют собой увеличение по скорости. Плотность и распределение землетрясений являются критическим фактором при интерпретации вариаций Z -значения. Большие участки постоянного цвета (значения) может показывать одинаковую плотность землетрясений для разных периодов времени, т.е. может показывать однородную степень сейсмичности в этой области.

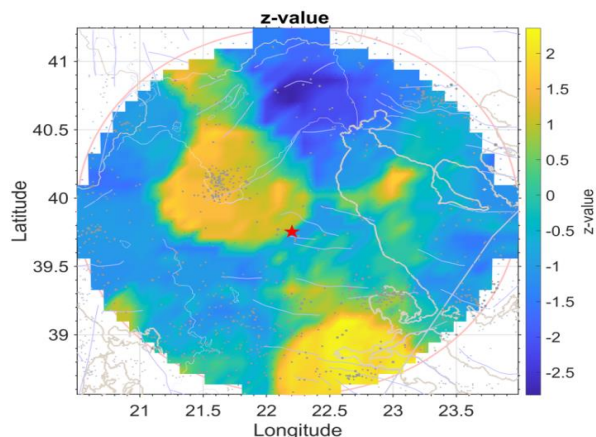


Рис. 4. Z-статистика для исследуемой территории в окружности радиусом $R = 150$ км, центр эпицентра землетрясения от 03.03.2021 г.

На рисунке (рис. 4) эпицентр попадает в область с относительно высокими значениями Z-значения (2), что означает, что выбранный период (с 01.01.2019 по 30.12.2020) перед землетрясением является периодом Период относительного сейсмического затишья по сравнению с периодом 01.01.2017-30.12.2018. Это видно из сравнения количества землетрясений за два периода (01.01.2017-30.12.2018 и 01.01.2019 - 30.12.2020) (рис. 5).

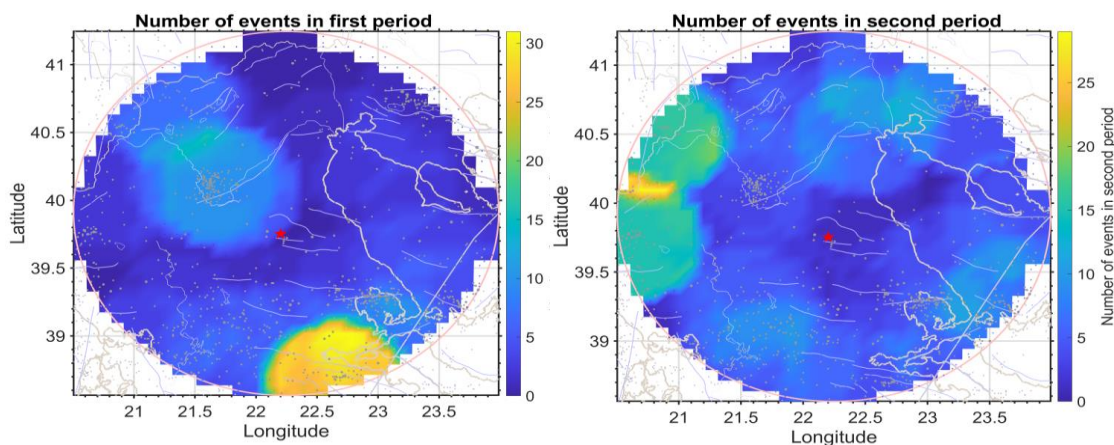


Рис. 5. Карты количества событий для двух периодов, изученных с помощью Z-теста (01.01.2017-30.12.2018 и 01.01.2019 - 30.12.2020)

Выводы

Изменение во времени значения b за период 1964-2020г. показывает минимум среднего значения b за период 2013-2021 г. ($b \approx 1$), который включает исследуемое землетрясение (за этот период имеется несколько сильных землетрясений в пространственный диапазон каталога). Значительное уменьшение значения b может быть связано с увеличением эффективных уровней напряжения перед сильными землетрясениями. Такое значительное уменьшение значения b может привести к увеличению эффективного стресса перед крупными событиями. Увеличение значения b после этих землетрясений может означать увеличение неоднородности земной коры и уменьшение напряжения сдвига, но после периода исследования значение b существенно не увеличивается, что может означать надвигающиеся сильные сейсмические события в регионе. область исследования. Изменение пространственного распределения значения b перед землетрясением показывает, что область с аномально низким значением b охватывает эпицентр исследуемого землетрясения. Это низкое значение b можно интерпретировать как потенциально заблокированную зону или зону накопленного высокого напряжения перед основным землетрясением.

Эпицентры землетрясений расположены в областях с относительно высоким значением параметра $Z \approx 2$, что свидетельствует о статистически достоверном определении области с относительной сейсмической «тишиной» перед землетрясением. Следовательно, уменьшение значения b и аномалий сейсмического затухания может быть индикатором сильного снятия напряжения, и эти изменения можно интерпретировать как предикторы сильных сейсмических событий.

Благодарности

Настоящая работа частично спонсируется Фондом Научных Исследований Болгарии, контракт N ДН14-1/11.12.2017

Литература:

1. Oynakov, Emil, et al. "Seismicity Patterns Associated with Earthquakes on the Balkan Peninsula." Proceeding of 1st international conference on environmental protection and disaster risks. 2020.
2. Oynakov, Emil, et al. "Spatial Variation of Precursory Seismic Quiescence Observed Before Earthquake from 01.04. 2010 in the Region of Crete." International conference on Environmental protection and disaster RISks. Springer, Cham, 2020.
3. Nuannin, P, Kulha nek O, Persson L (2005) Spatial and temporal b-value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophys Res Lett* 32:L11307. doi:10.1029/2005GL022679
4. Rani VS, Srivastava K, Srinagesh D, Dimri VP (2011) Spatial and temporal variations of b-value and fractal analysis for the Makran region. *Mar Geodesy* 34:77–82 Reasenber PA (1985) Second-order moment of Central California Seismicity. *J Geophys Res* 90:5479
5. Stiphout, T, Schorlemmer D, Wiemer S (2011) The effect of uncertainties on estimates of background seismicity rate. *Bull Seismol Soc Am* 101(2):482–494. doi:10.1785/0120090143
6. Gutenberg B, Richter CF (1944) Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Am* 34: 185–188
7. Bridges DL, Gao SS (2006) Spatial variation of seismic b-values beneath Makushin Volcano, Unalaska Island, Alaska. *Earth Planet Sci Lett* 245:408–415
8. Maeda, K, Wiemer S (1999) Significance test for seismicity rate changes before the 1987 Chiba-toho-oki earthquake (M6.7), Japan. *Ann Geofis* 42(5):833–850
9. Schorlemmer, D, Neri G, Wiemer S, Mostaccio A (2003) Stability and significance tests for b-value anomalies: example from the Tyrrhenian Sea. *Geophys Res Lett* 30(16):1835. doi:10.1029/ 2003GL017335
10. Urbancic TI, Trifu CI, Long JM, Toung RP (1992) Space–time correlations of b values with stress release. *Pure Appl Geophys* 139:449–462
11. Chouliara,s G (2009) Seismicity anomalies prior to 8 June 2008, Mw = 6.4 earthquake in Western Greece. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:327–335
12. Katsumata, K (2011) Long term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M = 9.0). *Earth Planets Space* 63:709–712
13. Atanasova, M., Nikolov H., Oynakov E. (2021) Co-seismic surface displacements after the earthquakes in Larissa, 3 march 2021, derived by DINSAR, 21 st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021
14. Schorlemmer, D, Wiemer S, Wyss M (2004) Earthquake statistics at Parkfield, Stationarity of b values. *J Geophys Res* 109:B12307. doi:10.1029/2004JB003234
15. Stiphout, T, Schorlemmer D, Wiemer S (2011) The effect of uncertainties on estimates of background seismicity rate. *Bull Seismol Soc Am* 101(2):482–494. doi:10.1785/0120090143
16. Tsukakoshi, Y, Shimazaki K (2008) Decreased b-value prior to the M 6.2 Northern Miyagi, Japan, earthquake of 26 July 2003. *Earth Planets Space* 60:915–924.
17. Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43, 237–239.
18. Wiemer, S, Wyss M (2000) Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull Seismol Soc Am* 90(4):859–869
19. Habermann RE (1987) Man-made changes of seismicity rates. *Bull Seism Soc Am* 77:141–159
20. Wiemer S (2001) A program to analyse seismicity: ZMAP. *Geophys Res Lett* 72:373–382
21. University of Athens- http://dggsl.geol.uoa.gr/en_index.html
22. Dragomirov, D., et al. Seismicity on the territory of Bulgaria and the adjacent lands recorded by notssi in 2019. *Bulgarian Geophysical Journal* 42 (2019): 106.
23. Buchakchiev, V., et al. Seismicity on the territory of Bulgaria and the adjacent lands recorded by notssi in 2017. *Bulgarian Academy of Sciences ISSN 1311-753X* 42 (2019): 94.
24. Dragomirov, D., et al. Seismicity on the territory of Bulgaria and the adjacent lands recorded by notssi in 2018. *Bulgarian Geophysical Journal* 42 (2019): 106.
25. Dragomirov, D., et al. "Seismicity on the Territory of Bulgaria and surroundings recorded by NOTSSI for the Period 2017-2019." Proceeding of 1st international conference on environmental protection and disaster risks. 2020
26. Akaike, Hirotugu. "A new look at the statistical model identification." *IEEE transactions on automatic control* 19.6 (1974): 716–723.
27. Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in the formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes, *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* 13, 99–103 (in Japanese with English summary).