

Научная статья  
УДК 550.386

**Л.В. Казанцев**  
*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

### **Подходы к использованию показательного закона распределения в исследовании сейсмической активности**

**Аннотация.** В статье рассматриваются подходы к практическому применению показательного закона распределения к исследованию данных о сейсмической активности. Выполнена проверка гипотезы подчинения сейсмических толчков на Аляске показательному закону распределения. Также приводится информация о наиболее значимых землетрясениях на Аляске в период с 1964 до 2021 г.

**Ключевые слова.** Закон распределения, сейсмическая активность, землетрясения, Аляска.

**Информация о статье.** Дата поступления: 16 марта 2022 г.

Original article

**L.V. Kazantsev**  
*Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

### **Approaches to the Exponential Distribution Law Use Seismic Activity Study**

**Abstract.** The article discusses approaches to the practical application of the exponential distribution law to the study of data on geomagnetic activity. It also provides information on the most significant earthquakes in Alaska since 1964 to 2021, which was the strongest earthquake since the observations beginning.

**Keywords.** Distribution law, seismic activity, earthquakes, Alaska.

**Article info.** Received 16 March 2022.

---

### **Введение**

Значительное количество людей склонны считать, что нет ничего страшнее войны, однако после непродолжительных размышлений большинство опрошенных склонны согласиться с тем, что стихийные бедствия не менее опасны. Одним из наиболее страшных стихийных бедствий во все времена считалось землетрясение, в особенности, цунамигенное.

В числе основных проблем, которые стоят перед геофизиками и сейсмологами в двадцать первом веке, следует выделить фундаментальную проблему, охватывающую отдельный класс прогностических задач, решение которых позволит предсказывать начало и место развития сейсмической катастрофы на Земле [5].

Вероятно, это можно было бы предсказать с помощью существующих математических методов и моделей, которые строятся

на основе полученных данных о сейсмической активности, в частности магнитуды.

Использование показательного закона распределения в исследовании сейсмической активности впервые было применено еще в середине прошлого века, в частности, в работе «Элементарная сейсмология» Ч.Ф. Рихтера, который по праву считается одним из наиболее известных ученых, трудившихся в области сейсмологических исследований в США. Он разработал подходы к инструментальному и геологическому анализу землетрясений, методы инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства и др. [2].

Статистические распределения сильнейших землетрясений в рамках теории экстремальных значений являлось предметом исследований М.В. Родкина и В.Ф. Писаренко, которые в своих работах исследуют, в том числе, события определенных величин и их вероятность подчинения закону Гуттенберга — Рихтера [3], формула (1):

$$N = 10^{a-bM}, \quad (1)$$

где  $N$  — число событий с магнитудой  $> M$ , а  $a$  и  $b$  — константы.

В более поздних работах этих авторов [4] уделяется особое внимание исследованиям стабильной модификации закона повторяемости землетрясений и перспектив его применения в сейсморайонировании. Таким образом, использование математических методов в исследовании сейсмической активности Земли в целом, а также показательного закона распределения в частности, не теряет своей значимости и представляется чрезвычайно актуальным в настоящее время.

Сейсмическая зона (СЗ) — территория в тектонически активной области, ограниченная контуром, внутри которого за заданный интервал времени (как правило, пятьдесят лет) количество сейсмических событий с магнитудой  $M > 3$  (где  $M$  — величина магнитуды) выше первого десятка (или не ниже определенной статистически значимой величины) [6]. На планете имеется несколько сейсмоактивных зон, в частности на североамериканском континенте можно выделить следующие: штат Калифорния, Невада, а также Аляска. Необходимо отметить, что именно на обозначенные территории приходится девять из десяти землетрясений, происходящих в Северной Америке, при этом землетрясения  $M > 8$  происходят здесь по различным подсчетам раз в 100–140 лет, в то время как возмущения с интенсивностью около 8 баллов - примерно раз в десятилетие.

Для применения математических методов необходимы длительные ряды однородных данных, это объясняет причину использования каталогов наблюдений землетрясений на Аляске.

## Результаты наблюдений наиболее значимых землетрясений в штате Аляска, США

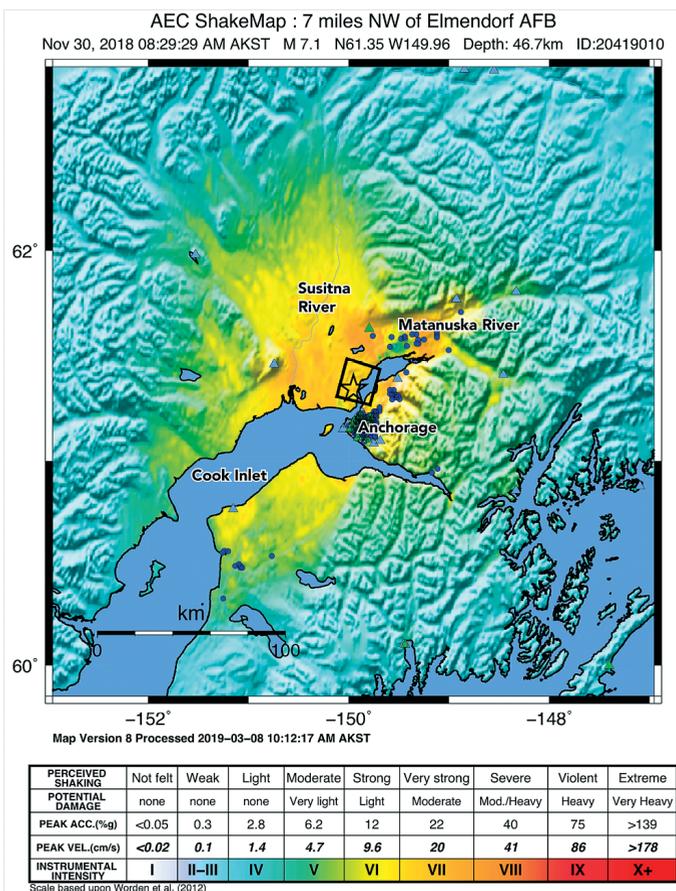
Район Алеутских островов и Аляски является высокосейсмоактивным. В нем в историческое время неоднократно фиксировались сейсмические события с  $M > 8$ . Максимальная глубина очагов землетрясений Аляско-Алеутской дуги изменяется от 250 до 50 км с востока на запад [1].

Наиболее сильным землетрясением поразившем Аляску в последние годы стало событие магнитудой 7,1 в 12 км к северу от Анкориджа (штат Аляска, США), произошедшее утром 30 ноября 2018 г. Глубина очага составила около 47 км, что свидетельствует о том, что землетрясение произошло в субдуцирующей части Тихоокеанской плиты. Геологическая служба США (United States Geological Survey) сообщила о значительной интенсивности (магнитуда 8) вблизи эпицентра (см. рис. 1), что принесло значительный ущерб городскому инфраструктурному центру штата Аляска, при этом по данным из различных источников отголоски события ощущались во всех районах Анкориджа и долины Матануска-Суситна. Землетрясение нанесло экономический ущерб в диапазоне от 100 млн до 1 млрд долл. США. Сообщений о погибших после землетрясения в Анкоридже в 2018 г. не поступало, но во всем эпицентральной регионе наблюдались значительные инфраструктурные повреждения: дорог, железнодорожных путей, жилых домов и др. Таким образом, землетрясение в Анкоридже в 2018 г. стало одним из наиболее разрушительных землетрясений в США за последнее десятилетие.

Звездочка указывает на эпицентр, прямоугольник показывает контур протяженности разрыва, цвета обозначают уровень сотрясения.

Важно заметить, что наибольшее количество оползней и других повреждений было зафиксировано после так называемого Великого Аляскинского землетрясения, которое и по сей день считается сильнейшим на территории североамериканского континента за всю историю наблюдений, магнитуда события составила 8,4. Землетрясение произошло 27 марта 1964 г. в 17:36 по местному времени. Площадь разрушения насчитывала пятьдесят тысяч квадратных миль, кроме того событие привело к образованию сильнейших обвалов грунта и оползней, нанесших тотальный на тот момент вред транспортной инфраструктуре штата Аляска. Важно отметить, что эпицентр землетрясения пришелся на Колледж-фьорд, расположенный в 120 км от Анкориджа, глубина очага составила около 20 км, приуроченная к границе погружения Тихоокеанской тектонической плиты под Североамериканскую.

Оползни, вызванные землетрясением на Аляске в 1964 г., отреагировали на подземные толчки в 2018 г., но не активизиро-



**Рис. 1. Карта, подготовленная Центром землетрясений Геологической службы США на Аляске, для Землетрясения М 7,1 30.11.2018**

вались значительным движением вниз по склону. Наблюдаемая деформация грунта согласно данным была ограничена трещинами растяжения шириной 1–2 см в пределах оползней, а большинство наблюдаемых провалов грунта (оползни и разжижение) показали остаточные деформации менее ~ 20 см.

Несколько оползней в пределах насыпи центральных и стратегических с логистической точки зрения шоссе (в первую очередь, Вайн-роуд и Миннесота-драйв) произошли в том же месте, что и оползни Поттер-Хилл, которые были вызваны толчками во время землетрясения на Аляске 1964 г., магнитуда которых, напомним, составила 9,2.

Во время землетрясений страдают и водные артерии, так, повсеместное боковое растекание и оползание берегов реки наблюдалось вдоль нижних участков многочисленных рек и ручьев Анкориджа, расположенных, что не мало важно, вдоль жилых до-

мов. Землетрясение 2018 г. вызвало меньшее разрушение нежели землетрясение 1964 г., но на более ограниченной территории, вероятно это можно было бы предсказать с помощью математических методов и моделей, которые строятся на полученных данных о сейсмической активности, в частности магнитуды.

### **Анализ сейсмической активности, выявленной на территории штата Аляска за период с 2010–2021гг.**

Рассмотрим данные о сейсмической активности территории штата Аляска, расположенного на территории США за период 2010–2021 гг., представленные в табл. 1.

Таблица 1

#### **Исходные о сейсмической активности выявленной на территории штата Аляска данные за период с 2010–2021гг.\***

Год	Объем выборки $n$	Минимум	Максимум	Размах	Количество интервалов группирования	Шаг группирования
2010	284	4,40	6,70	2,30	9	0,26
2011	286	4,00	7,30	3,30	9	0,37
2012	205	4,40	7,70	3,30	9	0,37
2013	274	4,20	7,50	3,30	9	0,37
2014	256	4,00	6,20	4,20	9	0,24
2015	233	4,20	6,90	2,70	9	0,30
2016	252	4,00	7,10	3,10	9	0,34
2017	296	4,00	6,50	2,50	9	0,28
2018	206	4,40	7,90	3,50	9	0,39
2019	278	4,00	6,30	2,30	9	0,26
2020	242	4,40	7,80	3,40	9	0,38
2021	265	3,40	6,10	2,70	9	0,30

\* Составлено автором по данным: Volcano Discovery : Official Web Site / Volcano Adventures Inc. URL: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/alaska/archive/2020.html#quakeTable>.

Для расчета количества интервалов группирования использовалось правило Стёрджеса — эмпирическое правило определения оптимального количества интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диапазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности ее распределения [8]. По данному правилу количество интервалов рассчитывается по формуле (2):

$$k = 1 + \log_2 n, \quad (2)$$

где  $n_i$  — количество наблюдений, вошедших в  $i$ -й интервал.

Все расчеты проводились с помощью встроенного пакета анализа в табличном процессоре MS Excel и для каждого года отдельно, что обусловлено тем, что выборки различных периодов

отличаются друг от друга (см. табл. 1 столбец минимум), соответственно объединить их в один ряд данных не представляется возможным.

Таблица 2

Данные, сгруппированные по годам за период с 2010–2021гг.

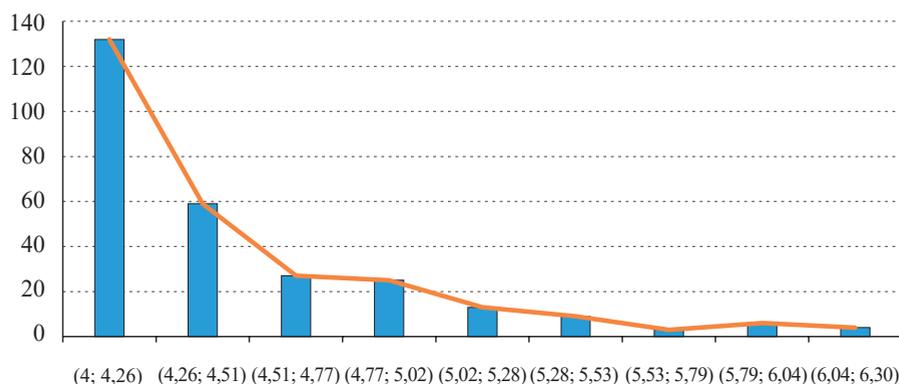
2010г.		2011г.		2012г.		2013г.	
Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$
(4,4; 4,66)	146	(4; 4,37)	119	(4,4; 4,77)	130	(4,2; 4,57)	135
(4,66; 4,91)	66	(4,37; 4,73)	101	(4,77; 5,13)	56	(4,57; 4,93)	73
(4,91; 5,17)	28	(4,73; 5,1)	31	(5,13; 5,5)	6	(4,93; 5,3)	36
(5,17; 5,42)	23	(5,1; 5,47)	20	(5,5; 5,87)	8	(5,3; 5,67)	15
(5,42; 5,68)	9	(5,47; 5,83)	11	(5,87; 6,23)	1	(5,67; 6,03)	10
(5,68; 5,93)	4	(5,83; 6,2)	2	(6,23; 6,6)	3	(6,03; 6,4)	2
(5,93; 6,19)	2	(6,2; 6,57)	0	(6,6; 6,97)	0	(6,4; 6,77)	1
(6,19; 6,44)	3	(6,57; 6,93)	1	(6,97; 7,33)	0	(6,77; 7,13)	1
(6,44; 6,7)	3	(6,93; 7,3)	1	(7,33; 7,7)	1	(7,13; 7,5)	1

2014		2015		2016		2017	
Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$
(4; 4,24)	92	(4,2; 4,5)	100	(4; 4,34)	123	(4; 4,28)	110
(4,24; 4,49)	60	(4,5; 4,8)	48	(4,34; 4,69)	46	(4,28; 4,56)	72
(4,49; 4,73)	48	(4,8; 5,1)	38	(4,69; 5,03)	48	(4,56; 4,83)	48
(4,73; 4,98)	22	(5,1; 5,4)	22	(5,03; 5,38)	19	(4,83; 5,11)	32
(4,98; 5,22)	18	(5,4; 5,7)	14	(5,38; 5,72)	10	(5,11; 5,39)	14
(5,22; 5,47)	4	(5,7; 6)	5	(5,72; 6,07)	3	(5,39; 5,67)	11
(5,47; 5,71)	7	(6; 6,3)	2	(6,07; 6,41)	2	(5,67; 5,94)	6
(5,71; 5,96)	3	(6,3; 6,6)	1	(6,41; 6,76)	0	(5,94; 6,22)	2
(5,96; 6,2)	2	(6,6; 6,9)	3	(6,76; 7,1)	1	(6,22; 6,5)	1

2018		2019		2020		2021	
Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$	Интервалы	$ni$
(4,4; 4,79)	112	(4; 4,26)	132	(4,4; 4,78)	118	(3,4; 3,7)	110
(4,79; 5,18)	65	(4,26; 4,51)	59	(4,78; 5,16)	74	(3,7; 4)	67
(5,18; 5,57)	13	(4,51; 4,77)	27	(5,16; 5,53)	28	(4; 4,3)	41
(5,57; 5,96)	3	(4,77; 5,02)	25	(5,53; 5,91)	16	(4,3; 4,6)	15
(5,96; 6,34)	5	(5,02; 5,28)	13	(5,91; 6,29)	3	(4,6; 4,9)	14
(6,34; 6,73)	6	(5,28; 5,53)	9	(6,29; 6,67)	1	(4,9; 5,2)	8
(6,73; 7,12)	1	(5,53; 5,79)	3	(6,67; 7,04)	0	(5,2; 5,5)	6
(7,12; 7,51)	0	(5,79; 6,04)	6	(7,04; 7,42)	0	(5,5; 5,8)	2
(7,51; 7,9)	1	(6,04; 6,3)	4	(7,42; 7,8)	2	(5,8; 6,1)	2

На основе анализа сгруппированных данных можно сделать вывод о том, что частоты в каждом последующем интервале меньше, нежели в предыдущем. Рассмотрим данные 2019 г., представленные в графическом виде.

На графике видно, что гипотеза  $H_0$  (по годам): случайная величина  $X$  — толчки земной коры распределены по показательному



**Рис. 2. Гистограмма частот, составленная на основе данных 2019 г.**

закону с параметром  $\lambda$ .  $\lambda = \frac{1}{\bar{x}}$ , где  $\bar{x}$  — взвешенная средняя, подсчитанная для каждого года отдельно.

Особенностью показательного закона является то, что  $x_{min} = 0$ . Поэтому все исходные данные были нормированы к  $x_{min} = 0$  по формуле  $z_i = x_i - x_{min}$ . Для нормированных данных был вычислен параметр  $\lambda$  и применен критерий Хи-квадрат. Рассмотрим данные о результатах применения критерия, представленные в табл. 3.

Таблица 3

**Критические значения для разных уровней значимости  $\alpha$**

$\alpha$	0,01	0,05	0,10
$\chi^2_{крит}$	18,48	14,07	12,02

Гипотеза принимается, если наблюдаемое значение критерия  $\chi^2_0$  меньше критической точки (ответ ДА), в противном случае отвергается (ответ НЕТ). Рассмотрим результаты проверки гипотезы, представленные в табл. 4.

Таблица 4

**Проверка гипотезы**

Год		0,01	0,05	0,10
2010	12,41	Да	Да	Нет
2011	20,76	Нет	Нет	Нет
2012	26,65	Нет	Нет	Нет
2013	3,18	Да	Да	Да
2014	7,94	Да	Да	Да
2015	7,43	Да	Да	Да
2016	13,69	Да	Да	Нет
2017	4,37	Да	Да	Да
2018	23,10	Нет	Нет	Нет

Окончание табл. 4

Год		0,01	0,05	0,10
2019	16,18	Да	Нет	Нет
2020	17,06	Да	Нет	Нет
2021	3,74	Да	Да	Да

### Основные результаты

Исходя из выше изложенного можно сделать вывод о том, что в трех случаях (2011, 2012, 2018 гг.) подземные толчки не подчинялись показательному закону на всех уровнях значимости. В пяти случаях (2013–2015, 2017, 2021 гг. — частично) на всех уровнях значимости принимается показательное распределение подземных толчков в течение года. В остальные периоды распределение толчков по показательному закону принимается с вероятностью 0,90 или 0,95.

Полученные в процессе исследования результаты согласуются с результатами подобных исследований М.В. Родкина и В.Ф. Писаренко [3, 4] с достаточно высокой долей вероятности, по этой причине представляется возможным их дальнейшее прикладное использование. В частности, возможно рассмотрение совокупности полученных результатов в качестве одного из подходов к решению задач, связанных с решением задач сейсмической активности. В дальнейшем автором планируется провести аналогичные исследования по данным других сейсмически активных мест, в частности, Байкальской рифтовой зоны и района озера Хубсугул, расположенного у южного склона Восточных Саян.

### Благодарности

Результаты получены с использованием материалов, предоставленных геофизическим институтом университета Аляски в Фэрбенксе. URL: <https://www.gi.alaska.edu>. Я признателен профессору В.А. Пархомову за постановку задачи.

### Список использованной литературы

1. Собисевич Л.Е. Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере: аналитический анализ обсерваторских наблюдений / Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич, А.Г. Фатьянов. — Москва : ИФЗ РАН, 2020. — 228 с.
2. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология / Ч.Ф. Рихтер ; пер. с англ. В.Я. Барласа [и др.]. — Москва : Изд-во иностр. лит., 1963. — 671 с.
3. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений / М.В. Родкин, В.Ф. Писаренко, Нго Тхи Лы, Т.А. Рукавишникова. — DOI 10.5800/GT-2014-5-4-0161 // Геодинамика и тектонофизика. — 2014. — Т. 5, № 4. — С. 893–904.
4. Писаренко В.Ф. Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы ее применения в сейсмораионировании / В.Ф. Писаренко, М.В. Родкин, Т.А. Рукавишникова. — DOI 10.31857/S000233372001010X // Физика Земли. — 2020. — № 1. — С. 62–76.

5. Шерман С.И. Сейсмические пояса и зоны Земли: формализация понятий, положение в литосфере и структурный контроль / С.И. Шерман, О.Г. Злогодухова. — DOI 10.5800/GT-2011-2-1-0031 // Геодинамика и тектонофизика. — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 1–35.

6. Ruppert N.A. Seismicity, Earthquakes and Structure Along the Alaska Aleutian and Kamchatka Kurile Subduction Zones: a Review / N.A. Ruppert, J.M. Lees, N.P. Kozyreva. — DOI 10.1029/172GM12 // Geophysical Monograph Series. — 2007. — Vol. 172. — P. 129–144.

7. Sturges H. The Choice of a Class-Interval / H. Sturges. — DOI 10.1080/01621459.1926.10502161 // Journal of the American Statistical Association. — 1926. — Vol. 21, no. 153. — P. 65–66.

## References

1. Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Fatyanov A.G. *Long-Period Seismogravitational Processes in the Lithosphere: Analytical Analysis of Observatory Observations*. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences Publ., 2020. 228 p.

2. Richter Ch.F. *Elementary Seismology*. San Francisco, W.H. Freeman, 1958. 768 p. (Russ. ed.: Richter Ch.F. *Elementary Seismology*. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1963. 671 p.).

3. Rodkin M.V., Pisarenko V. F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T.A. On Potential Representations of the Distribution Law of Rare Strongest Earthquakes. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 893–904. (In Russian). DOI: 10.5800/GT-2014-5-4-0161.

4. Pisarenko V.F., Rodkin M.V., Rukavishnikova T.A. Stable Modification of Frequency–Magnitude Relation and Prospects for its Application in Seismic Zoning. *Fizika Zemli = Physics of the Earth*, 2020, no. 1, pp. 62–76. (In Russian). DOI: 10.31857/S000233372001010X.

5. Sherman S.I., Zlogodukhova O.G. Seismic Belts and Zones of the Earth: Formalization of Notions, Positions in the Lithosphere, and Structural Control. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 1–34. (In Russian). DOI: 10.5800/GT-2011-2-1-0031.

6. Ruppert N.A., Lees J.M., Kozyreva N.P. Seismicity, Earthquakes and Structure Along the Alaska Aleutian and Kamchatka Kurile Subduction Zones: a Review. *Geophysical Monograph Series*, 2007, vol. 172, pp. 129–144. DOI: 10.1029/172GM12.

7. Sturges H. The Choice of a Class-Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, no. 153, pp. 65–66. DOI: 10.1080/01621459.1926.10502161.

## Информация об авторе

**Казанцев Леонид Викторович** — старший преподаватель, кафедры математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: kazantsevlv@bgu.ru.

## Information about the Author

**Leonid V. Kazantsev** — Senior Lecturer, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: kazantsevlv@bgu.ru.

**Для цитирования**

Казанцев Л.В. Подходы к использованию показательного закона распределения в исследовании сейсмической активности / Л.В. Казанцев. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).56-65 // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2022. — Т. 4, № 1. — С. 56–65.

**For Citation**

Kazantsev L.V. Approaches to the Exponential Distribution Law Use Seismic Activity Study. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 56–65. (In Russian). DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(1).56-65.