

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 550.348 (470, 477)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Поступило в редакцию 08.01.2019
Received 08.01.2019

Г. А. Аронов

Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
В СОЛИГОРСКОМ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ**

(Представлено членом-корреспондентом Р. Е. Айзбергом)

Аннотация. По установленным данным о сейсмических событиях в Солигорском горнопромышленном регионе за 1983–2017 гг. исследованы особенности их распределения по энергетическим характеристикам, в пространстве и во времени. На основе картографических схем эпицентров и графиков суммированных численных значений землетрясений определены периоды и площади представительной регистрации землетрясений для каждого энергетического класса $K = 5, 6, 7, 8$. Построен нормированный график повторяемости сейсмических событий.

Ключевые слова: месторождение, мониторинг, сейсмическая станция, землетрясение, магнитуда, энергетический класс, эпицентр

Для цитирования. Аронов, Г. А. Особенности пространственно-временной сейсмической активности в Солигорском горнопромышленном регионе / Г. А. Аронов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 216–222. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Genady A. Aronov

Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**FEATURES OF THE SPACE-TIME DISTRIBUTION OF THE SEISMIC ACTIVITY
WITHIN THE SOLIGORSK MINING REGION**

(Communicated by Corresponding Member Romma Ye. Aizberg)

Abstract. Data on the earthquakes recorded in the Soligorsk mining area during the years 1983–2017 were used to investigate their distribution features both in the energy, and space-time characteristics. Based on the sketch maps of the epicenters and the graphs of the accumulated numerical values of the earthquakes the periods and areas of the representative earthquakes were determined for each energy class $K = 5, 6, 7, 8$. A normalized graph of the earthquake recurrence was created.

Keywords: deposit, monitoring, seismic station, earthquake, magnitude, energy class, epicenter

For citation: Aronov G. A. Features of the space-time distribution of the seismic activity within the Soligorsk mining region. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 216–222 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Введение. Солигорский горнопромышленный регион характеризуется аномально высоким уровнем техногенной нагрузки на недра. Здесь расположено уникальное, крупнейшее в Европе, Старобинское месторождение калийных солей, которое было открыто в 1949 г. и разрабатывается с начала 1960-х годов [1; 2].

Объектами исследования являются сейсмические события, происходящие в Солигорском горнопромышленном регионе. В связи с этим организация и качество сейсмических наблюдений должны соответствовать задачам, которые решают службы сейсмологического мониторинга.

К основным опасностям, возникающим при проведении подземных шахтных работ, относится возникновение индуцированной сейсмичности. Как правило, для оценки и прогноза степени сейсмической опасности в районе месторождения организуется регулярный мониторинг сейсмической обстановки. Риск возникновения индуцированной сейсмичности вызывается активизацией разломов в горнопромышленном регионе, где вследствие разработки месторождения осадочных руд происходят изменения тектонических напряжений в подземных горизонтах. Пространственное развитие геодинамического процесса в виде проявления сейсмической активности выходит за пределы шахтных полей, охватывая территории, примыкающие к району непосредственных горных работ. Осредненные характеристики сейсмичности слабо зависят от особенностей технологии проведения выемок пород, и, в первую очередь, определяются геометрией разломов в регионе и характером региональных тектонических напряжений. В связи с этим возникает актуальная задача выявить закономерности взаимосвязи пространственно-временного распределения сейсмической активности с возникающими напряжениями земной коры в районах разработки месторождений полезных ископаемых [3].

Материалы и методы исследования. Основными исходными данными для сейсмологических исследований являются результаты непрерывных круглосуточных наблюдений на сейсмических станциях; эти работы в регионе были начаты в 1983 г. Для определения пространственно-временных и энергетических параметров очагов сейсмических событий в районе месторождения была создана Солигорская локальная сеть сейсмических станций, которая в настоящее время имеет в составе 8 пунктов наблюдений: «Волоты» (код (VOL), «Тесово» (TES), «Устронь» (UST), «Чижевка» (CHJ), «Копачевичи» (КАР), «Новый луг» (NVL), «Махновичи» (МАН), «Листопадковичи» (LST). Локальная сеть представляет собой автоматизированную цифровую систему наблюдений в режиме реального времени, технические средства которой состоят из измерительного оборудования – сейсмометров, фиксирующих движения почвы, возникающие в результате распространения сейсмических волн; регистрирующего оборудования – аппаратуры, обеспечивающей запись сигналов от сейсмометров; средств связи для передачи данных в центр сбора и обработки данных; управляющих микропроцессорных модулей; системы энергообеспечения. Все цифровые станции работают в режиме on-line с непрерывной передачей информации через мобильную сеть в центр сбора информации в Минске. Обработка данных о сейсмических событиях осуществлялась с помощью пакета компьютерных программ «UniViewer», «IdSeism», «IdSeism», «EmulEq», «Hyposat», «Seisan».

На этой основе была проведена идентификация сейсмических событий, в том числе выделение региональных и местных (локальных) землетрясений, промышленных взрывов, источников природных и техногенных шумов. Интерпретация данных о сейсмических событиях позволила определить время развития события в очаге, координаты эпицентра, глубины очага и его энергетический уровень. Таким образом, в итоге многолетних наблюдений и обработки сейсмических данных были получены инструментальные записи местных землетрясений, установлены их кинематические и динамические параметры, составлены соответствующие бюллетени и каталоги. Первичная фактографическая информация и результаты ее обработки (сейсмологические бюллетени и каталоги землетрясений) системно размещены в специально созданных базах данных.

Результаты и их обсуждение. Результаты обработки сейсмических данных о всех зафиксированных землетрясениях рассмотрим посредством анализа разных сечений поля эпицентров – во времени, в пространстве и по энергетическим характеристикам. За период наблюдений с 1983 г. по настоящее время зарегистрировано и обработано более 1500 сейсмических событий в Солигорском горнопромышленном регионе и окружающей его территории. Зафиксировано 5 землетрясений, которые имели ощутимый характер: 1978 г. (д. Кулаки, магнитуда $M = 3,0$, интенсивность $I_0 = 4-5$), 1983 г. (г. п. Повстынь, $M = 2,8$, $I_0 = 4-5$), 1985 г. (г. Глуск, $M = 3,1$, $I_0 = 3-4$), 1998 г. (п. Погост, $M = 1,9$, $I_0 = 4-5$ и $M = 0,8$, $I_0 = 2-3$) [4; 5]. На рис. 1 приведена картографическая схема эпицентров сейсмических событий, размер радиуса отражает относительную величину магнитуды землетрясения. Особенностью пространственного распределения землетрясений в Солигорском горнопромышленном регионе является проявления сейсмичности за пределами зоны подземных промышленных выработок.

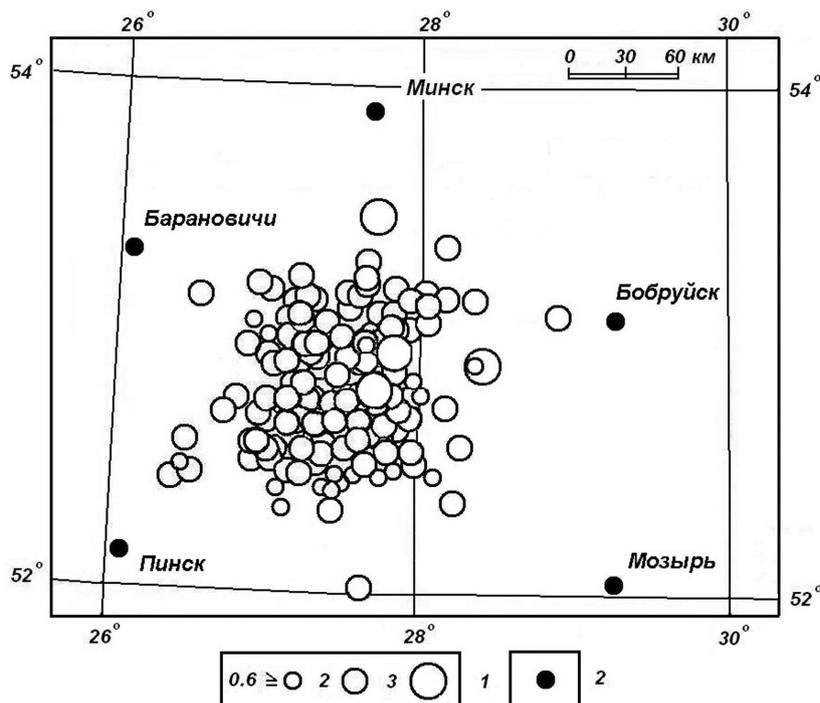


Рис. 1. Картографическая схема эпицентров сейсмических событий в Солигорском горнопромышленном регионе и на сопредельной территории: 1 – магнитуда землетрясений; 2 – город

Fig. 1. Sketch maps of the epicenters of seismic events in the Soligorsk mining area and in the neighboring territory: 1 – magnitudes of earthquakes; 2 – city

Количественное распределение всех $N(K)$ землетрясений разных энергетических классов отражено в табл. 1. Самое сильное землетрясение произошло 17 октября 1985 г. в 01.32 по Гринвичу в 10 км к западу от г. Глуск и в 70–80 км к северо-востоку от г. Солигорск.

Таблица 1. Количественное распределение землетрясений по энергетическим классам K за период 1983–2017 гг.

Table 1. Quantitative distribution of earthquakes in energy classes K during the years 1983–2017

K	4	5	6	7	8	9	N_{Σ}
$N(K)$	5	182	447	516	396	5	1551

Для исследования численных значений представительных периодов наблюдений и оценки представительных энергетических классов землетрясений использованы графики распределения землетрясений разных классов за весь период наблюдений (рис. 2).

Представленные графики позволяют достаточно надежно определить, с какого конкретно года угол наклона стал максимальным, с одной стороны, и стабильным – с другой. Начиная с наиболее сильных событий с $K = 8$ (рис. 2, *d*), угол наклона графика, характеризующий среднюю за год повторяемость возникновения таких сейсмических событий, практически одинаков первые 17 лет наблюдений, с 1983 по 1999 г., со средним значением 18 землетрясений в год. Но начиная с 2000 по 2014 г. повторяемость событий уменьшилась, со средним значением 4 землетрясения в год. Возможно, это связано с естественными процессами высвобождения сейсмической энергии, увеличением числа землетрясений меньшего энергетического класса. Последние три года (2015–2017 гг.) произошло увеличение повторяемости, со средним значением 12 землетрясений в год. Следовательно, время представительной регистрации землетрясений 8 класса составляет $\Delta T = 35$ лет. Для землетрясений 7 класса (рис. 2, *c*) стабильно возрастающий угол наклона графика установился с 1983 г. с повторяемостью 15 землетрясений в год. Но с 2010 по 2012 г. эта повторяемость уменьшилась, со средним значением 5 землетрясений в год. За период с 2013

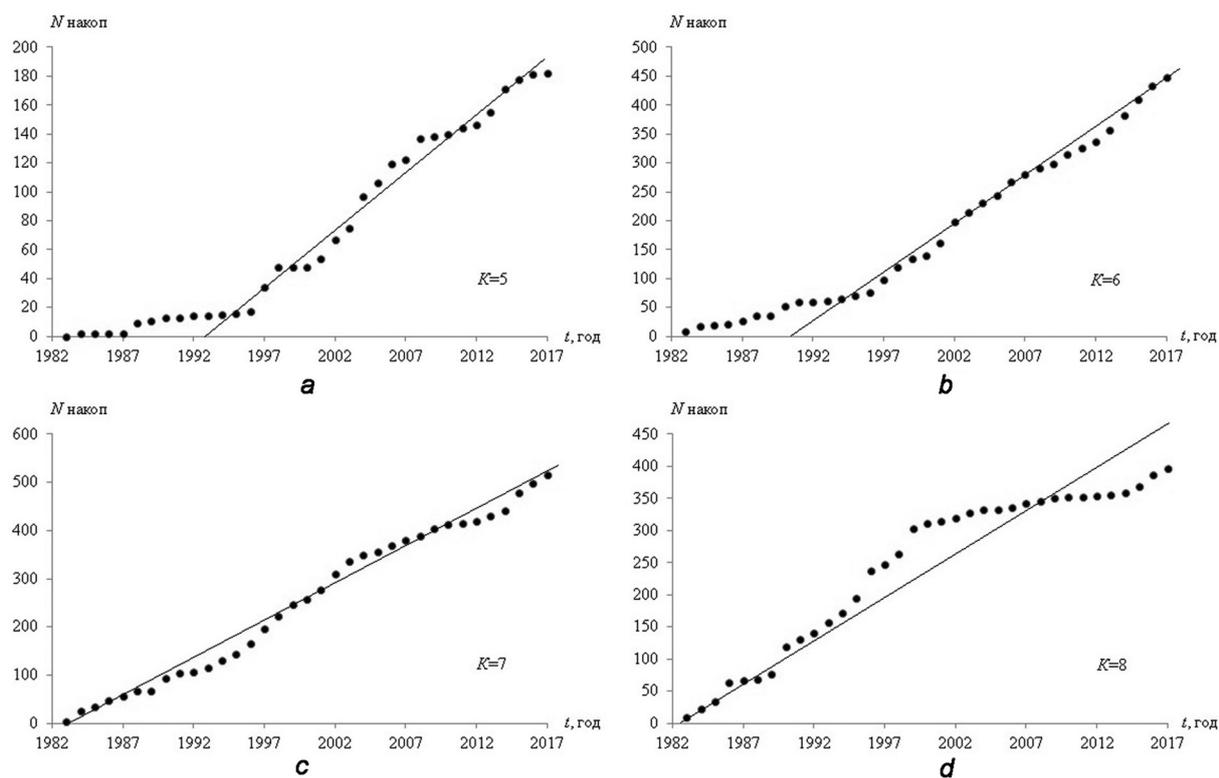


Рис. 2. Графики распределения землетрясений разных энергетических классов $K = 5-8$ за период наблюдений: N – количество накопленных землетрясений, K – класс землетрясения

Fig. 2. Graphs of distribution of earthquakes of different energy class $K = 5-8$ for the observation period: N – number of accumulated earthquakes, K – earthquake class

по 2017 г. произошло увеличение повторяемости, со средним значением 19 землетрясений в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 7$ составляет $\Delta T = 35$ лет. Для землетрясений 6 класса (рис. 2, *b*) наблюдается медленный рост угла наклона графика за период с 1983 по 1996 г. с повторяемостью 5 землетрясений в год. Но начиная с 1997 по 2017 г. эта повторяемость увеличилась, со средним значением 18 землетрясений в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 6$ составляет $\Delta T = 21$ год. Для землетрясений 5 класса (рис. 2, *a*) наблюдается медленный рост угла наклона графика с 1983 по 2000 г. с повторяемостью 3 землетрясения в год. Но начиная с 2001 по 2014 г. эта повторяемость увеличилась, со средним значением 9 землетрясений в год. Последние три года (2015–2017 гг.) произошло снижение повторяемости, со средним значением 4 землетрясения в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 5$ составляет $\Delta T = 17$ лет. Для землетрясений $K = 5-6$ пониженные значения числа событий в период с 1983 по 1996 г. связаны с тем, что регистрация землетрясений проводилась одной сейсмической станцией «Солигорск» с небольшим максимальным увеличением (V_{\max}) на каналах сейсмометров ($Z, N-S, E-W$). Дальнейшее изменение роста числа зарегистрированных слабых землетрясений ($K = 5-6$) напрямую связано с ростом значений максимального увеличения (V_{\max}) и с развитием сети наблюдений (увеличение количества сейсмических станций в районе исследований). Все периоды и длительности уверенной регистрации отражены в табл. 2.

Далее оценим размеры площадей представительной регистрации землетрясений разных энергетических классов с помощью соответствующих покласовых картографических схем расположения эпицентров, изображенных кружками одинакового размера. Затем на этих схемах эпицентров разных энергетических классов были определены контуры предельной и уверенной области регистрации землетрясений. На картографических схемах наблюдается увеличение площади ареала рассеивания эпицентров землетрясений в соответствии с увеличением их энергетического класса $K = 5-8$. Схемы землетрясений $K = 4$ и $K = 9$ содержат максимальное количество

Т а б л и ц а 2. Интервалы и длительности периодов представительных наблюдений за землетрясениями разных энергетических классов

Table 2. Intervals and duration of representative observations of earthquakes of different energy class

K	5	6	7	8
Годы наблюдений	2001–2017	1997–2017	1983–2017	1983–2017
ΔT , лет	17	21	35	35

событий – по пять каждого энергетического класса. Ввиду небольшого числа землетрясений с $K = 4$ (5), этот энергетический класс не является представительным для периода наблюдений 1983–2017 гг. Таким образом, были установлены площади представительной регистрации землетрясений разных классов. Пример реализации этой процедуры приведен для поля эпицентров землетрясений с $K = 8$. Здесь максимальная площадь, включающая все эпицентры, равна $S_{\Sigma} = 14730 \text{ км}^2$, а представительная – $S_{\Sigma} = 6480 \text{ км}^2$. Аналогичная процедура была реализована для землетрясений других классов и все эти данные совмещены на одной плоскости. Построенная картографическая схема K_{\min} ареалов представительной регистрации землетрясений с $K = 5, 6, 7$ и 8 , изображенная на рис. 3, имеет важную особенность – совпадение простираения изолиний разных энергетических классов на юго-восточной периферии региона. Ареал оконтуривания землетрясений с $K = 7$ имеет расширение в северном направлении. Зона оконтуривания землетрясений с $K = 8$ имеет наибольшее расширение в юго-западном и северо-восточном направлениях. Эпицентры землетрясений с $K = 9$ не выходят за пределы выше указанных областей и находятся в выделенных зонах.

В итоге были найдены все исходные данные для построения нормированного графика повторяемости сейсмических событий. Сведения о числе землетрясений (N_{Σ}) разных классов за представительные интервалы наблюдений $\Delta T = f(K)$ и на представительных площадях $\Delta S = f(K)$ отражены в табл. 3. Проведен расчет нормированного числа землетрясений (N^*) и определен его логарифм ($\lg N^*$).

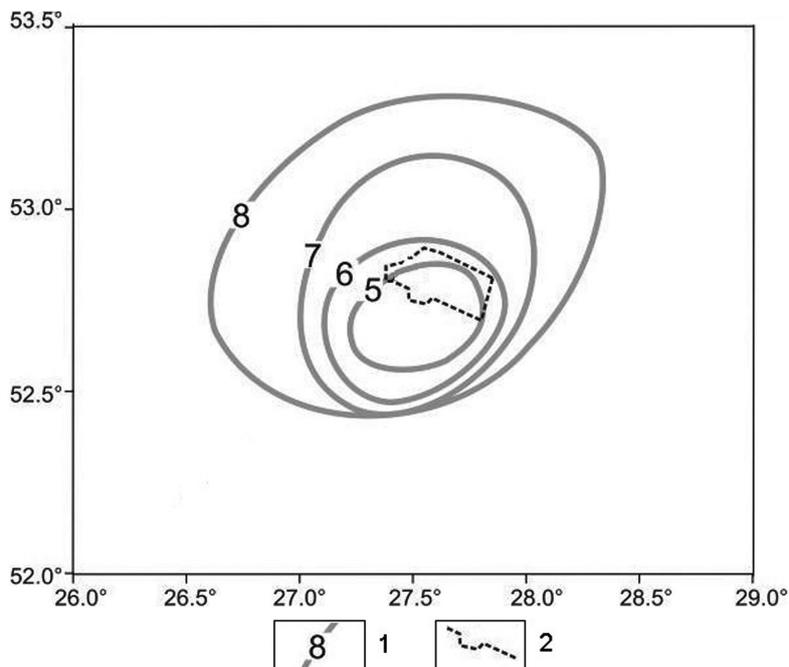


Рис. 3. Картографическая схема K_{\min} ареалов представительной регистрации землетрясений исследуемого региона: 1 – контуры ареалов землетрясений с $K = 5, 6, 7, 8$; 2 – границы шахтных полей

Fig. 3. Sketch map K_{\min} of areals of representative recording of earthquakes of the examined region: 1 – areal contours of earthquakes with $K = 5, 6, 7, 8$; 2 – borders of mine fields

Таблица 3. Исходные данные для построения нормированного графика повторяемости землетрясений на территории Солигорского горнопромышленного региона

Table 3. Initial data for constructing a normalized graph of recurrence of earthquakes in the territory of the Soligorsk mining area

К	Годы наблюдений	ΔT	N_{Σ}	ΔS_{\min} , тыс. км ²	N^*	$\lg N^*$
5	2001–2017	17	134	0,881	8,9471	0,9517
6	1997–2017	21	372	1,603	11,0507	1,0434
7	1983–2017	35	516	4,207	3,5044	0,5446
8	1983–2017	35	396	6,482	1,7455	0,2419

Нормированный график повторяемости землетрясений, построенный по данным табл. 3, изображен на рис. 4.

Параметры графика повторяемости, рассчитанные для диапазона энергетических классов $K = 6–8$, имеют вид

$$\lg N = 3,4151 - 0,4007K.$$

Величина достоверности аппроксимации равна $R^2 = 0,9804$. Угол наклона нормированного графика повторяемости землетрясений составил по модулю $\gamma = |0,40|$, т. е. эта величина является средним долговременным значением для изучаемого региона. На графике наблюдается «левый загиб» для более слабых землетрясений с $K = 5$, который можно объяснить отсутствием достаточной представительности слабых событий. Доминирующим фактором здесь является длительная регистрация землетрясений одной сейсмической станцией (1983–2006 гг.). В регионах с невысоким уровнем сейсмической активности в подобных случаях вопрос о представительности землетрясений с низким энергетическим классом также остается открытым [6; 7]. Изменение угла наклона нормированного графика повторяемости связано с увеличением слабой сейсмичности в области «подготовки» будущего более сильного землетрясения.

Вывод. Изучение энергетических пространственно-временных особенностей сейсмического режима позволяет использовать их при оценке степени сейсмической опасности в исследуемом Солигорском горнопромышленном регионе. Можно констатировать, что оценка периодов и площадей представительной регистрации землетрясений разных энергетических классов позволила построить эмпирическую картографическую схему K_{\min} и график повторяемости с углом наклона $\gamma = |0,40|$. Величина максимального зафиксированного землетрясения для исследуемого региона составила $K_{\max} = 9,5$. На основе изменения угла наклона графика повторяемости можно установить важные данные о процессе «подготовки» более сильного землетрясения.

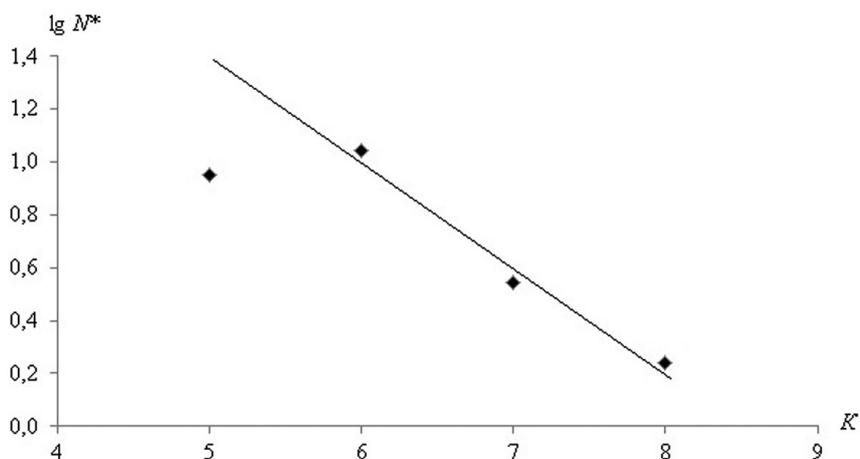


Рис. 4. Нормированный график повторяемости землетрясений Солигорского горнопромышленного региона за 1983–2017 гг.: $\lg N^*$ – логарифм нормированного числа землетрясений, K – энергетический класс сейсмического события

Fig. 4. Normalized graph of recurrence of earthquakes of the Soligorsk mining area for the years 1983–2017: $\lg N^*$ – logarithm of the normalized number of earthquakes, K – energy class of the seismic event

Проявление сейсмических событий за пределами зоны промышленных выработок служит признаком того, что с определенного времени сейсмический процесс, первоначально инициированный подземными горнопромышленными работами, связан с особенностями региональных геодинамических факторов и характеризуется расширением ареала сейсмичности. Произошедшие землетрясения послужили мощным толчком для развития целенаправленных исследований и работ в Солигорском горнопромышленном регионе по совершенствованию системы геодинамической безопасности.

Список использованных источников

1. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.]. – Минск, 2001. – 815 с.
2. Месторождения калийных солей Беларуси: геология и рациональное недропользование / Э. А. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2003. – 264 с.
3. Аронов, Г. А. Динамика миграции зон группирования эпицентров землетрясений в северо-западной части Припятского прогиба / Г. А. Аронов // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата – ГЕОРИСК-2018: материалы X Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Москва, 2018. – Т. 1. – С. 262–267.
4. Aronov, A. G. Seismicity of Belarus / A. G. Aronov, R. R. Seroglazov, T. I. Aronova // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. – 2010. – Vol. 45, N 3. – P. 324–339. <https://doi.org/10.1556/ageod.45.2010.3.7>
5. Aronov, A. G. Stress state of the earth's crust and seismicity in a potassium salt mining region in Belarus / A. G. Aronov, Sh. A. Mukhamediev, T. I. Aronova // *Acta Geodaetica et Geophysica*. – 2014. – Vol. 49, N 2. – P. 125–134. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0042-z>
6. Ризниченко, Ю. В. Проблемы сейсмологии: избр. тр. / Ю. В. Ризниченко. – М., 1985. – С. 34–40.
7. Рейснер, Г. И. Сейсмоструктурные методы решения проблем общего сейсмического районирования / Г. И. Рейснер // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1984. – № 4. – С. 3–16.

References

1. Makhnach A. S., Garetsky R. G., Matveyev A. V. [et al.]. *Geology of Belarus*. Minsk, 2001. 815 p. (in Russian).
2. Vysotsky E. A., Gubin V. N., Smychnik A. D., Shemet S. F., Yashin I. A. *Potassium salt deposits of Belarus: geology and efficient management of mineral resources*. Minsk, 2003. 264 p. (in Russian).
3. Aronov G. A. Dynamics of migration of the earthquake epicenter grouping zones in the northwestern part of the Pripyat Trough. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata – GEORISK-2018: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 t.* [Analysis, forecast and management of natural risks taking into account global climate change – GEORISK-2018: materials of the X International Scientific and Practical Conference: in 2 vol.]. Moscow, 2018, vol. 1, pp. 262–267 (in Russian).
4. Aronov A. G., Seroglazov R. R., Aronova T. I. Seismicity of Belarus. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 324–339. <https://doi.org/10.1556/ageod.45.2010.3.7>
5. Aronov A. G., Mukhamediev Sh. A., Aronova T. I. Stress state of the earth's crust and seismicity in a potassium salt mining region in Belarus. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2014, vol. 49, no. 2, pp. 125–134. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0042-z>
6. Riznichenko Yu. V. *Seismology problems: Selected Works*. Moscow, 1985, pp. 34–40 (in Russian).
7. Reisner G. I. Seismotectonic methods for solving problems of general seismic zoning. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli = Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1984, no. 4, pp. 3–16 (in Russian).

Информация об авторе

Аронов Геннадий Аркадьевич – директор. Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 1/3, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: aronovg@tut.by.

Information about the author

Aronov Genady Arkadievich – Director. Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus (1/3, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aronovg@tut.by.