

#### REFERENCES

1. GOST R 59617-2021. Dorogi avtomobilnie obshego polzovania. Pravila obsledovania fundamentov opor [GOST R 59617-2021. Public roads. Rules for inspection of foundations of supports]. Moscow, Russian Institute of Standardization publ., 2021, 28 p. (In Russ.)
2. GOST 33179-2014. Dorogi avtomobilnie obshego polzovania. Iziskania mostov I puteprovodov [GOST 33179-2014. Public roads. Surveys of bridges and overpasses. General requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2014, 36 p. (In Russ.)
3. Auzin A. A. Georadiolokacionnoe obsledovanie fundamentov mostovykh sooruzheniy [Ground Penetrating Radar (GPR) investigations of the foundations of bridge structures]. *Geotekhnika–Geotekhnika*, 2017, no. 6, pp. 58–77 (In Russ.)
4. Auzin A. A. Informacionnie vozmozhnosti georadiolokacionnogo metoda pri obsledovanii stroitelnykh obektov [Information capabilities of the georadiolocation method in the survey of construction sites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 54–62 (In Russ.)
5. Auzin A. A., Zatsepin S. A. Georadiolokacionnoe obsledovanie problemnykh ychastcov dorogno-transportnoi seti [Ground Penetrating Radar (GPR) investigations of problem areas of the road transport network]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2012, no. 2, pp. 242–246 (In Russ.)
6. Auzin A. A., Karataev D. D. Georadiolokacionnoe obsledovanie mostovykh sooruzheniy: voprosy metodiki provedeniya polevykh issledovaniy, obrabotky i interpretatsii materialov. Chast 1 – massivnie fundamenty mostovykh opor [Georadiolocation survey of bridge structures: issues of methodology of field research, processing and interpretation of materials. Part 2 – the piles foundations of bridge supports]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 106–112 (In Russ.)
7. Starovojtov A. V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* [Interpretation of ground penetrating radars data]. Moscow, MGU publ., 2006, 192 p. (In Russ.)
8. Ground Penetrating Radar. 2nd edition. Ed. Daniels D. J. IEE Press, London 2004, 726 p.
9. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Ed. Jol H.M. Elsevier, Amsterdam, 2009, 544 p.

---

*Аузин Андрей Альбертович*, д.т.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: AAuzin@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3043-3726

*Каратаев Дмитрий Дмитриевич*, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ddk1997@yandex.ru; ORCID 0009-0003-8451-4710

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

---

*Andrey Al. Auzin*, Dr. habil. in Tech., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: AAuzin@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3043-3726

*Dmitriy D. Karataev*, Post-Graduate Student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ddk1997@yandex.ru; ORCID 0009-0003-8451-4710

*Authors have read and approved the final manuscript.*

## Возможности определения магнитуды *MD* техногенных сейсмических событий, вызванных промышленными взрывами на территории Воронежского кристаллического массива

©2024 С. П. Пивоваров<sup>✉</sup>, М. А. Ефременко, Р. С. Пивоваров

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН»,  
Университетская пл. 1, 394018, Воронеж, Российская федерация

### Аннотация

*Введение:* Кратко изложены типы регистрируемых сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Отмечено, что представленная работа является продолжением цикла работ, посвященных определению энергетических характеристик сейсмических событий, произошедших на территории ВКМ.

*Методика исследований:* Описаны основные методики определения энергетических характеристик сейсмических событий, произошедших на региональных расстояниях применяемые в различных регионах России. Показана практическая значимость определения магнитуды сейсмического события по длительности. Рассмотрены различные методики определения длительности сейсмических записей.

*Результаты исследования и обсуждение:* Впервые предложена экстраполированная зависимость величины магнитуды *MD* от длительности записи менее одной минуты. Произведено сравнение соотношения магнитуд *MD* и *MS*, определённых для одного и того же события с эпицентральным расстоянием около 7 км. Установлено достаточно хорошее соотношение между этими магнитудами, разброс составляет менее 0.2 ед. *M*. Для удалённых карьеров, при одновременном наложении записей различной природы применение магнитуды *MD* нецелесообразно. Показана возможность определения магнитуды *MD* для сейсмических событий импульсного типа.

*Выводы:* В геологических условиях ВКМ при обработке и интерпретации записей импульсных событий неясной природы, не осложнённых наложением случайных помех, для определения энергетической характеристики рекомендуется использовать магнитуду по длительности записи *MD*.

**Ключевые слова:** Воронежский кристаллический массив, сейсмические события, промышленный взрыв, энергетический класс, магнитуда.

*Источник финансирования:* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

*Для цитирования:* Пивоваров С. П., Ефременко М. А., Пивоваров Р. С. Возможности определения магнитуды *MD* техногенных сейсмических событий, вызванных промышленными взрывами на территории Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 1. С. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/111-117>

### Введение

На территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) регистрируются сейсмические события различной природы и длительности. В настоящей работе рассматриваются только техногенные

события, вызванные промышленными взрывами в различных карьерах и события импульсного типа неясной природы.

В ранее проведенных работах [1, 2], показана возможность и целесообразность определения магни-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Пивоваров Сергей Павлович, e-mail: [serg@geophys.vsu.ru](mailto:serg@geophys.vsu.ru)

туды MS для сейсмических событий, произошедших в карьерах. Представленная работа является продолжением исследований в области определения энергетических характеристик сейсмических событий, в тех случаях когда традиционный метод (энергетический класс  $K_p$ ) не работает или получаемые значения являются некорректными.

Длительность записи техногенных событий существенно зависит от массы заряда, количества одновременно подрываемых блоков и эпицентрального расстояния.

За время работы Воронежской сети сейсмических наблюдений накоплен достаточный объем волновых форм событий импульсного типа. Эти события представляют собой короткие по времени ( $<5$  с) и достаточно высокочастотные записи, при интерпретации которых невозможно разделить сейсмические фазы и соответственно определить эпицентрального расстояние до источника [3, 4]. Энергию таких событий без известного эпицентрального расстояния определить традиционным способом не представляется возможным. Но эти события записаны двумя близко расположенными сейсмическими станциями и соответственно не являются случайными помехами. Для таких событий предлагается определять магнитуду по длительности записи (MD).

Накоплены также записи волновых форм техногенных сейсмических событий, вызванных промышленными взрывами, на малых эпицентральных расстояниях. Для этих событий определены энергетические классы  $K_p$  и магнитуды MS [1, 2], что позволяет оценить взаимную точность оценки магнитуд MD и MS (MLV), в геологических условиях ВКМ, на близких эпицентральных расстояниях.

#### Методика исследования

Для определения энергетических характеристик сейсмических событий на региональных расстояниях применяются различные методы, в которых используются амплитуды и периоды продольных или поперечных волн (mb, ML) [5, 6]. Сумма максимальных амплитуд продольных и поперечных волн применяется при определении энергетического класса (по Т. Г. Раутиан [7], С. Л. Соловьеву, О. Н. Соловьевой [8], С. А. Федотову [9], Ф. Ф. Аптикаеву [10]). Возможность определения MS (MLV), по поверхностным волнам техногенных сейсмических событий, в геологических условиях Воронежского кристаллического массива (ВКМ) подробно рассмотрена в работах [1, 2].

В настоящее время определение магнитуды MD

применяется для оценки энергетических характеристик местных и локальных сейсмических событий. В то же время эта магнитуда является вспомогательной функцией в тех случаях, когда нет возможности определить другие энергетические характеристики из-за того, что запись события очень короткая и высокочастотная, нет возможности выделить сейсмические фазы и соответственно точно определить эпицентрального расстояние. Также эта магнитуда определяется в тех случаях, когда запись «зашкалена» или наоборот, амплитуды полезного сигнала очень малы и невозможно достоверно замерить их величину [5].

Существует несколько способов определения магнитуды MD. Основной способ заключается в том, что измеряется время события от первого вступления волн до тех пор, когда амплитуда сигнала не будет превышать двойную амплитуду сейсмического фона [5]. В других работах предлагается использовать длительность колебаний отдельных волн или их коды, «ширину импульса» [11], а также спектральный образ записи с применением вейвлет-преобразования [12].

В настоящей работе мы используем основной способ, предложенный в [5].

К сожалению, программный комплекс WSG, используемый в лаборатории сейсмического мониторинга ВКМ (ЛСМ ВКМ), не позволяет автоматически определять магнитуду по длительности записи (MD) [13, 14], и такие вычисления приходится делать вручную, что значительно замедляет процесс обработки и увеличивает трудозатраты.

#### Результаты исследования и обсуждение

Локальной сетью сейсмических станций, работающих в центральной части ВКМ, регистрируются импульсные события не ясной природы. Записаны они, чаще всего, двумя станциями. Эпицентрального расстояния не превышают пяти километров. В связи с тем, что эпицентры этих сейсмических событий находятся близко от регистрирующих станций, основные объемные волны еще не успевают разделиться. Определить динамические характеристики объемных волн не представляется возможным, соответственно рассчитать энергетический класс, который определяется по сумме максимальных амплитуд продольных и поперечных волн так же не возможно.

Значения магнитуды MD, приведённые в работе [5], имеют градиацию времени равную одной минуте, была произведена экстраполяция этих значений для первых секунд записи. Результат представлен на рис. 1.

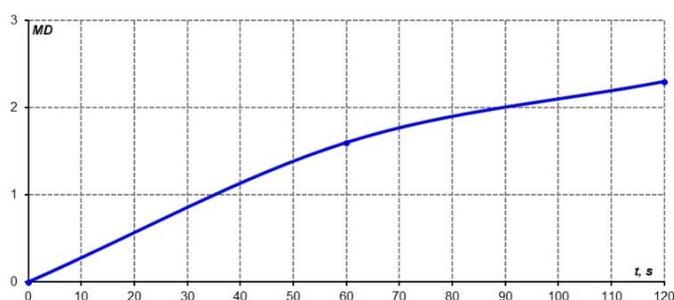


Рис. 1. Пример экстраполяции величины магнитуды MD для первых секунд записи сейсмических событий. [Fig. 1. Example of extrapolation of MD magnitude for the first seconds of recording seismic events.]

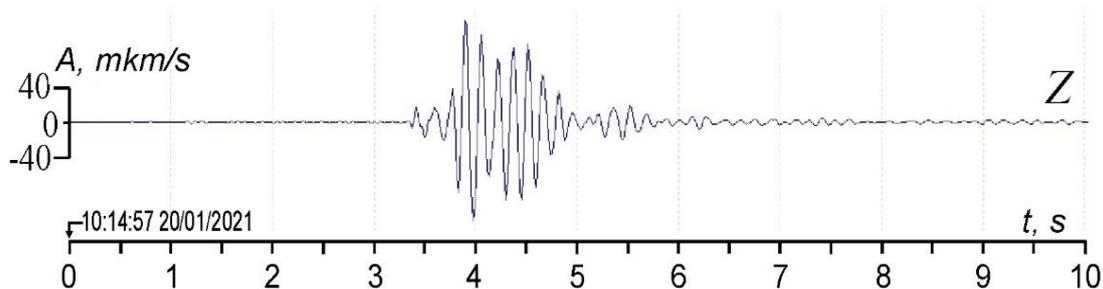


Рис. 2. Пример записи события импульсного типа.  
[Fig. 2. An example of recording a pulse type event.]

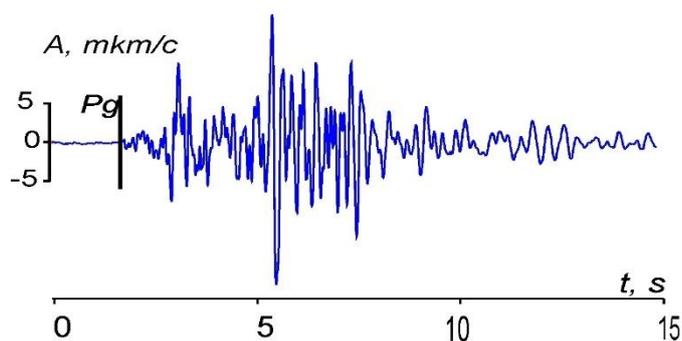


Рис. 3. Записи промышленного взрыва в карьере «Хмелинец».  
[Fig. 3. Recording of an industrial explosion in the «Khmelinets» quarry.]

Магнитуда по длительности записи импульсных событий, замеренная на сейсмических станциях Воронежской сети наблюдений, лишь в отдельных случаях превышает 0.5, основная масса импульсных событий имеет магнитуду MD, близкую к 0.2. На рис. 2 представлен пример записи одного из импульсных событий.

Как было сказано выше, кроме событий импульсного типа неизвестной природы, в регионе регистрируется большое количество техногенных сейсмических событий, вызванных проведением буровзрывных работ в различных карьерах [15].

Были рассмотрены и проанализированы способы и возможности определения магнитуды MD техногенных сейсмических событий, произошедших в различных промышленных карьерах. На рис. 3 представлен пример записи промышленного взрыва, произведённого в карьере «Хмелинец». Этот карьер расположен на расстоянии около шести километров от регистрирующей станции, основные сейсмические волны уже начинают четко регистрироваться, соответственно есть возможность определения энергетических характеристик событий, произошедших в этом карьере. Записи промышленных взрывов, произведённых в этом карьере, достаточно короткие, в тоже время они обработаны в полном объёме, для них определены все требуемые характеристики, такие, как эпицентральное расстояние, время в очаге, координаты, энергетический класс KP и магнитуда MS.

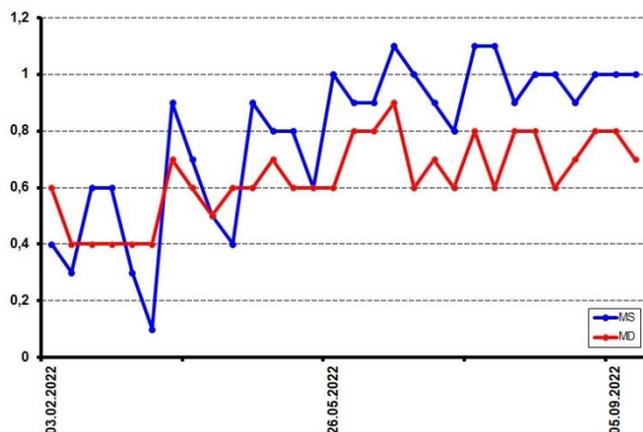
Произведено сравнение магнитуд MD и MS рассчитанных для сейсмических событий, возникших в результате промышленных взрывов в Хмелинецком карьере. В целом получено достаточно хорошее

согласование между этими магнитудами, максимальный разброс составил 0.2. На рис. 4 показаны графики распределения магнитуд MD и MS рассчитанных для одних и тех же сейсмических событий, коэффициент взаимной корреляции составляет 0.75.

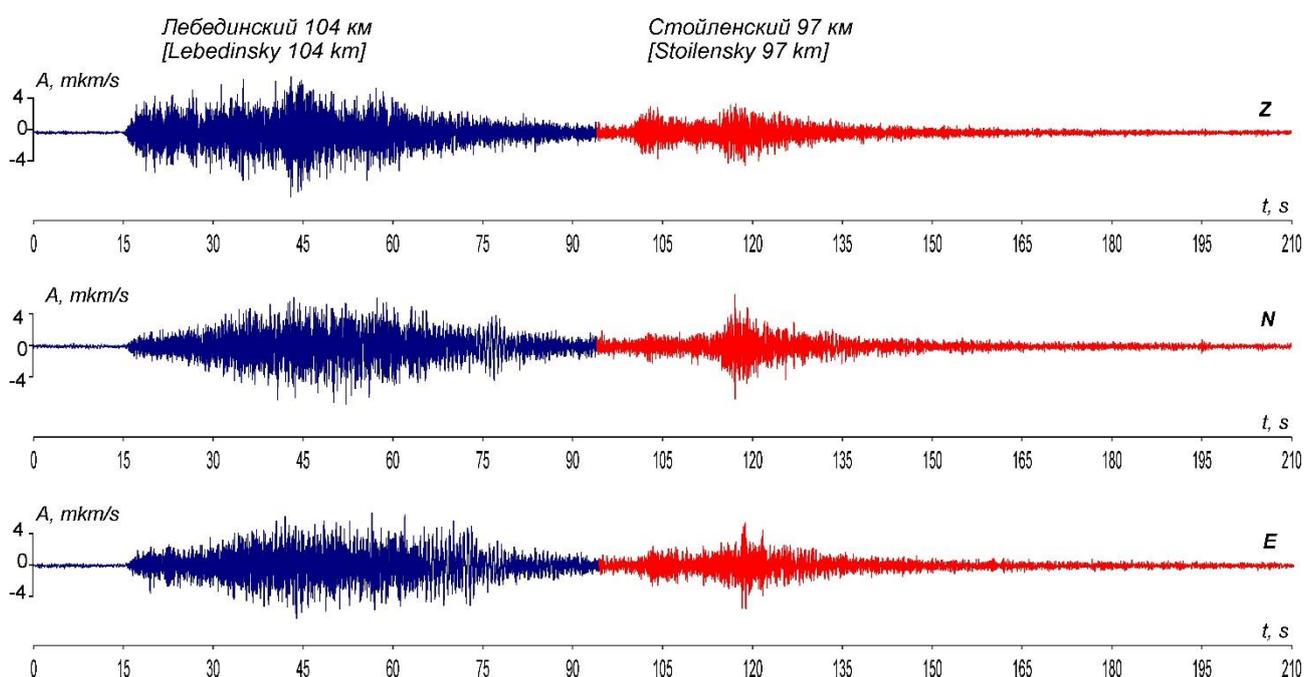
Для проверки возможности определения магнитуды MD техногенных сейсмических событий, зарегистрированных на значительных эпицентральных расстояниях от источника, были рассмотрены записи промышленных взрывов, произведённых в различных карьерах. Сразу столкнулись с определёнными трудностями, такими, как наложение записей телесеизмических землетрясений, техногенных событий, произошедших в других карьерах, местных тектонических землетрясений или случайных помех. Было установлено, что магнитуду по длительности записи для удалённых карьеров достоверно определять, возможно, только не более чем в 50 % случаев.

На рис. 5 представлены фрагменты записей промышленных взрывов, произведённых практически одновременно в различных карьерах. Достоверно определить начало и конец записи для определения магнитуды MD каждого конкретного сейсмического события не представляется возможным.

В карьере «Лебединский» массовые промышленные взрывы производятся практически одновременно (с разницей во времени менее 10 с) подрывом нескольких блоков, из-за этого сейсмическая запись становится существенно растянутой, что не позволяет выделить начало и конец записи одного блока. Наложение записей промышленных взрывов, произведённых одновременно в различных карьерах, также не позволяет достоверно определять магнитуду MD.



**Рис. 4.** Графики распределения магнитуд  $MD$  и  $MS$  ( $MLV$ ) в карьере «Хмелинец».  
**[Fig. 4.** Distribution graphs for magnitudes  $MD$  and  $MS$  ( $MLV$ ) in the «Khmelinets» quarry.]



**Рис. 5.** Пример наложения записи промышленных взрывов в карьерах «Лебединский» и «Стойленский».  
**[Fig. 5.** An example of overlapping the recording of industrial explosions in the «Lebedinsky» and «Stoilensky» quarries.]

### Выводы

В геологических условиях ВКМ для техногенных сейсмических событий с эпицентрными расстояниями до 10 км, не осложнённых наложением случайных помех, магнитуду  $MD$  рекомендуется определять наравне с энергетическим классом  $KP$  и магнитудой  $MS$  для набора статистики соответствия между их значениями.

При обработке и интерпретации записей импульсных событий неясной природы, не осложнённых наложением случайных помех, для определения энергетической характеристики рекомендуется использовать магнитуду по длительности записи  $MD$ .

В связи с тем, что примерно в 50 % случаев при регистрации техногенных сейсмических событий имеется наложение различных записей, невозможно достоверно определить начало и конец событий. Программа обработки не позволяет автоматически определять магнитуду  $MD$  по длительности записи, и это

значительно увеличивает трудозатраты интерпретаторов. В связи с этим рекомендуется определять указанную магнитуду в ограниченном объёме, если нет возможности оценить энергию другим способом. В тоже время дополнительный энергетический параметр, определённый для техногенных сейсмических событий, в будущем может позволить уточнить степень затухания сейсмического сигнала в различных азимутальных направлениях.

Для уменьшения трудозатрат при обработке сейсмических событий различной природы, необходимо автоматизировать определение магнитуды по длительности записи  $MD$ , с учетом необходимости отсева наложенных событий.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пивоваров С. П., Ефременко М. А., Пивоваров Р. С. Опыт практического применения шкалы *MS* для определения магнитуд техногенных сейсмических событий на территории воронежского кристаллического массива. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*: материалы XV Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 69.
2. Пивоваров С. П., Ефременко М. А., Пивоваров Р. С. Возможность определения магнитуды *MS* техногенных сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива // *Российский сейсмологический журнал*. 2022. Т. 4. № 2. С. 33–39.
3. Надёжка Л. И., Сафронич И. Н., Орлов Р. А., Пивоваров С. П. Воронежский кристаллический массив // *Землетрясения Северной Евразии в 2000 году*. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 193–196.
4. Надёжка Л. И., Пивоваров С. П., Пивоваров Р. С., Семёнов А. Е., Ефременко М. А., Калинина Э. В., Семенов А. М., Колесников И. М., Савенков А. В. Некоторые результаты сейсмических наблюдений на территории Воронежского кристаллического массива за 2013–2015 гг. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*: материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 224–227.
5. Кондорская Н. В., Аранович З. И., Соловьева О. Н., Шебакин Н. В. (отв. сост.). Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука, 1981. 272 с.
6. Михайлова Н. Н., Неверова Н. П. Калибровочная функция  $\sigma(\Delta)$  для определения магнитуды *MPVA* землетрясений северного Тянь-Шаня // *Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне*. Алма-Ата: Издательство «Наука» Казахской ССР, 1986. С. 41–48.
7. Раутиан Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // *Экспериментальная сейсмика*. Тр. ИФЗ АН СССР; № 32(199). М.: Наука, 1964. С. 88–93.
8. Соловьев С. Л., Соловьева О. Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1967. № 2. С. 13–22.
9. Федотов С. А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
10. Аптикаев Ф. Ф. Энергетическая палетка для Северного Тянь-Шаня // *Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана*. № 2–4. Душанбе: Дониш, 1975. С. 82–87.
11. Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
12. Силкин К. Ю. Оценка длительности короткозамедленного взрыва по результатам вейвлет-анализа его записи // *Российский сейсмологический журнал*. 2022. Т. 4. № 1. С. 53–62.
13. Красилов С. А., Коломиец М. В., Акимов А. П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*: материалы Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77–83.
14. Акимов А. П., Красилов С. А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.
15. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России. Под ред. В. В. Адушкина, А. А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.

## Magnitude determination capabilities *MD* man-made seismic events, caused by industrial explosions on the territory of the Voronezh crystalline massif

© 2024 S. P. Pivovarov<sup>✉</sup>, M. A. Efremenko, R. S. Pivovarov

*Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences", Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** The types of recorded seismic events on the territory of the Voronezh crystalline massif (VCM) are briefly outlined. It is noted that the presented work is a continuation of a series of works devoted to determining the energy characteristics of seismic events that occurred on the territory of the VCM.

**Research methodology:** The main methods for determining the energy characteristics of seismic events that occurred at regional distances, used in various regions of Russia, are described. The practical significance of determining the magnitude of a seismic event by duration is shown. Various methods for determining the duration of seismic recordings are considered.

**Research results and discussion:** An extrapolated dependence of the *MD* magnitude on a recording duration of less than one minute was proposed for the first time. We compared the ratio of *MD* and *MS* magnitudes determined for the same event with an epicentral distance of about 7 km. The ratio established between these magnitudes was fairly good, and the difference was less than 0.2 un. *M*. Using the *MD* magnitude was not reasonable for remote quarries with simultaneous overlapping of recordings of various nature. It was shown that the *MD* magnitude could be determined for pulse-type seismic events.

**Conclusion:** In the geological conditions of the VCM, when processing and interpreting records of pulsed events of unclear nature, not complicated by the imposition of random interference, it is recommended to use the magnitude based on the duration of the *MD* record to determine the energy characteristics.

**Keywords:** Voronezh crystalline massif, seismic events, industrial explosion, energy class, magnitude.

**Funding:** The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (within the framework of state assignment No. 075-00682-24). The data used in the work were obtained with large-scale research facilities «Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world».

**For citation:** Pivovarov S. P., Efremenko M. A., Pivovarov R. S. Magnitude determination capabilities *MD* man-made seismic events, caused by industrial explosions on the territory of the Voronezh crystalline massif // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/111-117>

**Conflict of interests:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Sergey P. Pivovarov, e-mail: [serg@geophys.vsu.ru](mailto:serg@geophys.vsu.ru)