

УДК 550.34

Возможность определения магнитуды M_S техногенных сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива

© 2022 г. С.П. Пивоваров, М.А. Ефременко, Р.С. Пивоваров

ФИЦ ЕГС РАН, г. Воронеж, Россия

Поступила в редакцию 04.05.2022 г.

Аннотация. Для территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) впервые предложены эмпирические формулы, устанавливающие соотношения между магнитудой (M_S) техногенных сейсмических событий и величиной энергетического класса (K_p). Для исследования использовались каталоги сейсмических событий, зарегистрированных на территории ВКМ. Полученные формулы могут быть использованы при составлении сводных каталогов местных сейсмических событий, произошедших на территории ВКМ, в тех случаях, когда непосредственные определения величины энергетического класса из-за трудностей выделения поперечных волн на записях невозможны.

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

Для цитирования: Пивоваров С.П., Ефременко М.А., Пивоваров Р.С. Возможность определения магнитуды M_S техногенных сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.2.03>. EDN: IHFDLM

Введение

На территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) функционирует более 20 промышленных карьеров, в которых добыча полезных ископаемых ведётся с применением буровзрывных работ [Взрывы и землетрясения ..., 2013], мощность одновременно подрываемых зарядов и сама методика производства работ в каждом из карьеров различны.

Инструментальный сейсмологический мониторинг территории ВКМ ведётся с 1996 г. совместными усилиями ФИЦ ЕГС РАН и Воронежского государственного университета. Ежегодно регистрируется более 350 сейсмических событий, вызванных взрывными работами в промышленных карьерах. В то же время, в регионе фиксируются тектонические землетрясения различных энергетических классов [Надёжка и др., 2006; 2016; 2018].

Обработка и интерпретация волновых форм в лаборатории сейсмического мониторинга ВКМ (ЛСМ ВКМ) производится с использованием программного комплекса WSG, разрабо-

танного в ФИЦ ЕГС РАН [Красилов и др., 2006; Акимов, Красилов, 2020]. Стандартные процедуры интерпретации сейсмических событий включают: выделение всех зарегистрированных волн, динамические замеры максимумов этих волн (период, амплитуда), определение эпицентральных расстояний и времени в очаге, вычисление координат эпицентра [Кондорская и др., 1981]. При обработке локальных и местных сейсмических событий в ЛСМ ВКМ для зарегистрированных сейсмических событий используется номограмма Раутиан для определения энергетического класса K_p [Раутиан, 1964]. В процессе работы обнаружилось расхождение величины значений энергетических классов одного и того же техногенного сейсмического события, зарегистрированного различными станциями на разных расстояниях от эпицентра [Санина и др., 2009; Дубянский и др., 2018; Золототрубова и др., 2019]. В отдельных случаях величина энергетического класса для одного и того же техногенного сейсмического события отличается на разных станциях (в зависимости от эпицентрального расстояния) до двух единиц (рис. 1).

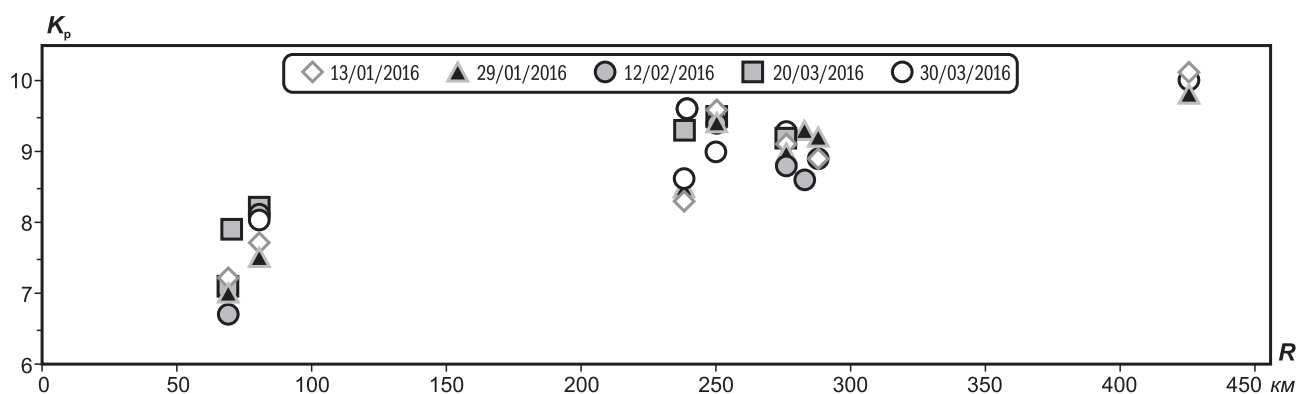


Рис. 1. Зависимость величины значений K_p одного и того же техногенного сейсмического события от эпицентрального расстояния

При обработке и интерпретации записей техногенных сейсмических событий в геологических условиях Воронежского кристаллического массива чётко выделяются продольные и поверхностные волны, поперечные волны имеют относительно маленькую амплитуду или совсем не регистрируются. В этой связи была впервые предпринята попытка использовать магнитуду по поверхностной волне R_g для определения энергетических характеристик техногенных сейсмических событий.

Результаты исследования и обсуждение

Тектонические землетрясения являются одноактными событиями, при возникновении которых формируются все основные типы объёмных сейсмических волн, как продольных, так и поперечных. Промышленные взрывы в основной своей массе являются короткозамедленными, с различным количеством ступеней и массой заряда взрывчатых веществ (ВВ) в разных скважинах, количеством одновременно подрываемых блоков. При добыче полезных ископаемых с использованием буровзрывных работ основной целью является отрыв и дробление взрывающегося блока для последующего извлечения как добываемого сырья, так и вмещающей породы. Основные задачи персонала, проводящего взрывные работы, состоят в обеспечении безопасности, а также снижении сейсмического эффекта взрывных работ, так как максимальные воздействия вызывают поперечные волны. Соответственно необходимо понизить их максимальную амплитуду. Это достигается применением короткозамедленного подрыва, чтобы последующие заряды не увеличивали амплитуду колебаний, а наоборот гасили друг друга [Взрывы и землетрясения ..., 2013]. Таким образом, при форми-

ровании волнового поля, вызванного промышленными взрывами, поперечные волны практически не формируются или они очень слабые, а при определении K_p величина амплитуды этих волн является определяющей.

В настоящее время нет единой методики определения энергетических характеристик техногенных сейсмических событий для всех регионов Российской Федерации. Так, в отдельных районах определяется энергетический класс (по Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1964], С.Л. Соловьёву и О.Н. Соловьёвой [Соловьёв, Соловьёва, 1967], С.А. Федотову [Федотов, 1972]), в других обрабатывающих центрах определяются различные магнитуды (по продольным или поперечным волнам).

Были рассмотрены и проанализированы методики определения энергетических характеристик сейсмических событий в различных регионах, как расположенных в складчатых областях, так и в пределах древних платформ [Федотов, 1972; Кондорская и др., 1981; Михайлова, Неворова, 1986; Морозов, 2008]. Все эти методики в условиях ВКМ не дают устойчивых результатов, разброс значений определённых энергетических параметров существенно отличается как для одного сейсмического события, так и для одной регистрирующей станции [Дубянский и др., 2018].

В ранее опубликованных работах [Взрывы и землетрясения ..., 2013] было показано, что на территории ВКМ при регистрации техногенных сейсмических событий чётко выделяются поверхностные волны типа Релея. Было сделано предположение, что для оценки энергетических характеристик сейсмических событий, вызванных промышленными взрывами, можно использовать магнитуду, определяемую по поверхностной волне на вертикальной компоненте

M_S [Ливоваров и др., 2021]. Значения калибровочной функции, позволяют получать величину этой магнитуды, начиная с 20 км от эпицентра [Кондорская и др., 1981]. В то же время, для определения магнитуды M_S имеются свои ограничения — она предназначена для использования динамических замеров, полученных на аппаратуре типа В и С. В нашем регионе только четыре сейсмические станции отвечают этим требованиям, так как на них установлены широкополосные сейсмоприёмники СМ-3ОС. Основная масса сейсмических станций сети имеет короткопериодную аппаратуру СМ-3КВ. Для получения достоверных данных на начальном этапе при расчёте магнитуды мы использовали замеры, полученные только на широкополосных станциях. Одна из этих четырёх станций укомплектована двумя типами сейсмоприёмников: широкополосные СМ-3ОС и короткопериодные СМ-3КВ. При обработке записей техногенных сейсмических событий, записанных на этой станции, динамические замеры производились по всем каналам. В результате были получены замеры магнитуды по двум типам датчиков. На рис. 2 представлены записи вертикальной компоненты двух типов сейсмоприёмников промышленного взрыва в Павловском карьере в диапазоне частот 0.4–0.8 Гц. Значения магнитуды M_S , определённые по замерам на этих каналах, отличаются на одну сотую, что позволяет, по нашему мнению, использовать записи короткопериодных приборов для определения магнитуды M_S .

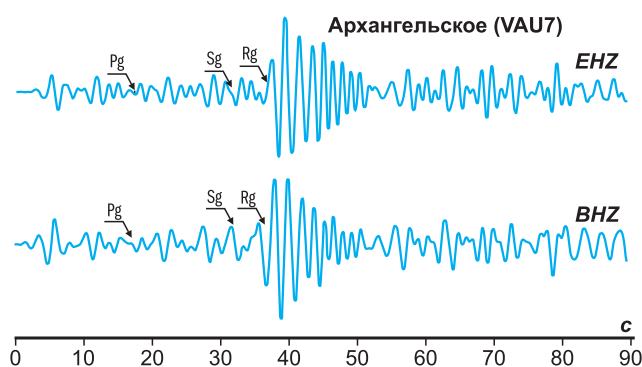


Рис. 2. Записи промышленного взрыва станцией VAU7, каналы EHZ и BHZ

В геологических условиях ВКМ при надлежном проведении буровзрывных работ поперечные волны S_g практически не регистрируются или имеют аномально низкие амплитуды, не позволяющие достоверно определять энергетический класс техногенных сейсмических событий.

На рис. 3 представлен пример трёхкомпонентной записи промышленного взрыва, произведённого в Павловском карьере, на исходном сигнале и отфильтрованные в трёх диапазонах частот, полученные на различных сейсмических станциях. Из рисунка видно, что продольные (P_g) и поверхностные (R_g) волны хорошо выделяются даже на исходном сигнале и в соответствующих фильтрах на записях всех сейсмических станций. Поперечные (S_g) волны, как на исходном сигнале, так и в соответствующих фильтрах выделяются не на всех станциях, а на тех станциях, где эта волна выделяется, амплитуды сопоставимы с амплитудами продольных волн.

При интерпретации сейсмических событий для уверенной идентификации сейсмических волн в ЛСМ ВКМ регулярно производятся построения графиков движения частиц грунта (рис. 4). Движение частиц грунта в группе продольных волн, имеющее практически линейный вид с максимальными амплитудами в вертикальной плоскости, показывает чёткий азимут на эпицентр события. При движении частиц грунта в группе поперечных волн наблюдается более сглаженная форма графика с максимальными амплитудами в горизонтальной плоскости, при этом азимут на эпицентр события перпендикулярный. Движение частиц грунта в группе поверхностных волн имеют форму чёткого эллипса с обратным азимутом на эпицентр [Ефременко и др., 2020].

При определении локальной магнитуды M_L , определяемой по динамическим замерам поперечных волн, мы также не получили устойчивых решений, но столкнулись с определёнными трудностями. Необходимо указывать максимальную магнитуду, полученную на каждой конкретной станции. Так как горизонтальные каналы равнозначны, то в зависимости от азимута прихода сейсмического сигнала амплитуды на этих каналах могут существенно различаться. Максимальные фазы поперечной волны обычно отмечаются в разное время, поэтому возникает неоднозначность принятия решения. В то же время магнитуда M_S определяется только по вертикальному каналу, соответственно, выделение максимальной фазы не вызовет затруднений при интерпретации.

На рис. 5 представлены сейсмические записи вертикальной компоненты в диапазоне частот 0.4–0.8 Гц этого же промышленного взрыва, полученные на десяти станциях, расположенных на различных эпицентральных расстояниях от центра карьера. Поверхностные волны хорошо регистрируются даже на значительных удалениях

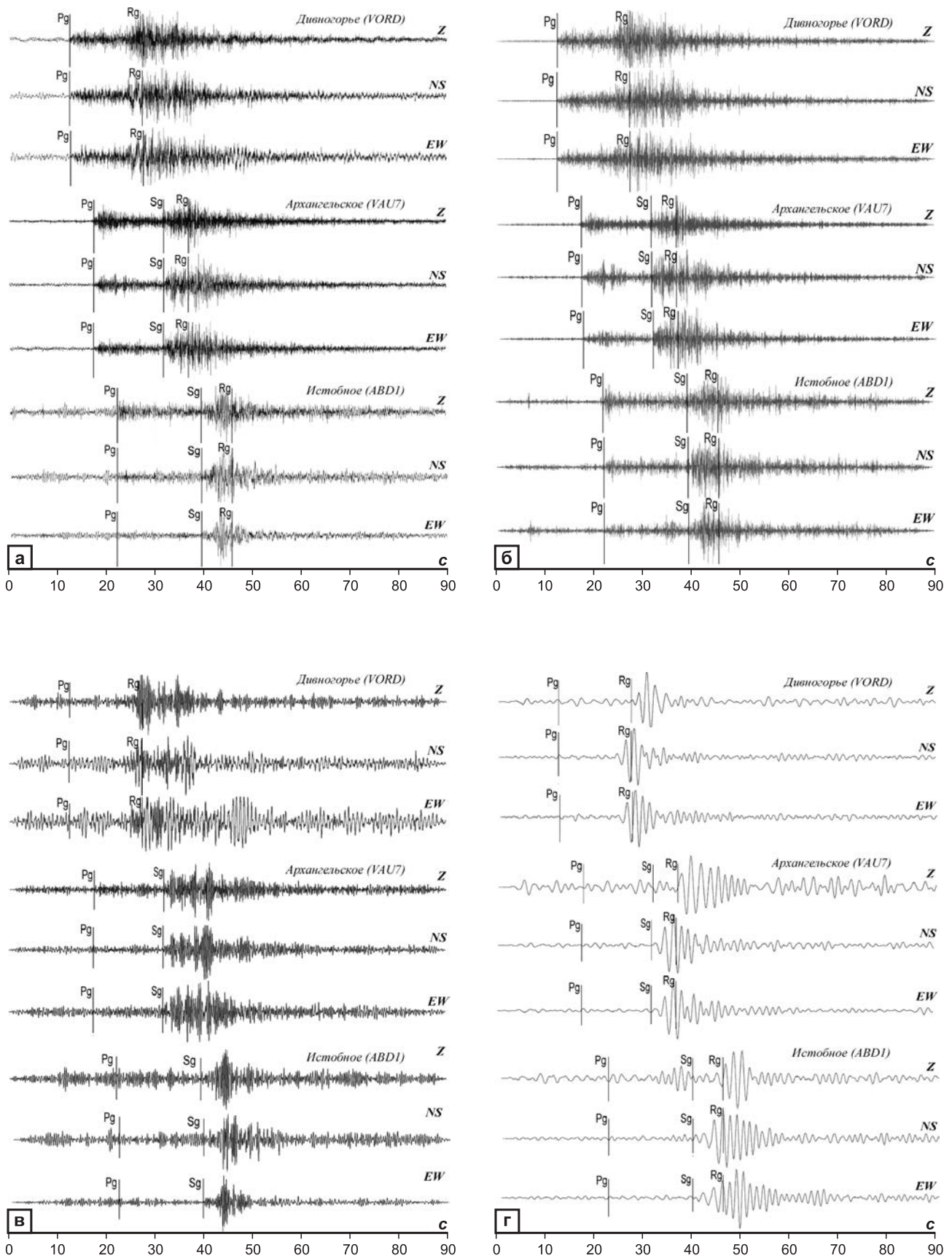


Рис. 3. Трёхкомпонентные записи промышленного взрыва, полученные на разных станциях:

а – исходный сигнал; после фильтрации в диапазонах частот:

б – 8.0–20.0 Гц; в – 1.0–4.0 Гц; г – 0.4–0.8 Гц

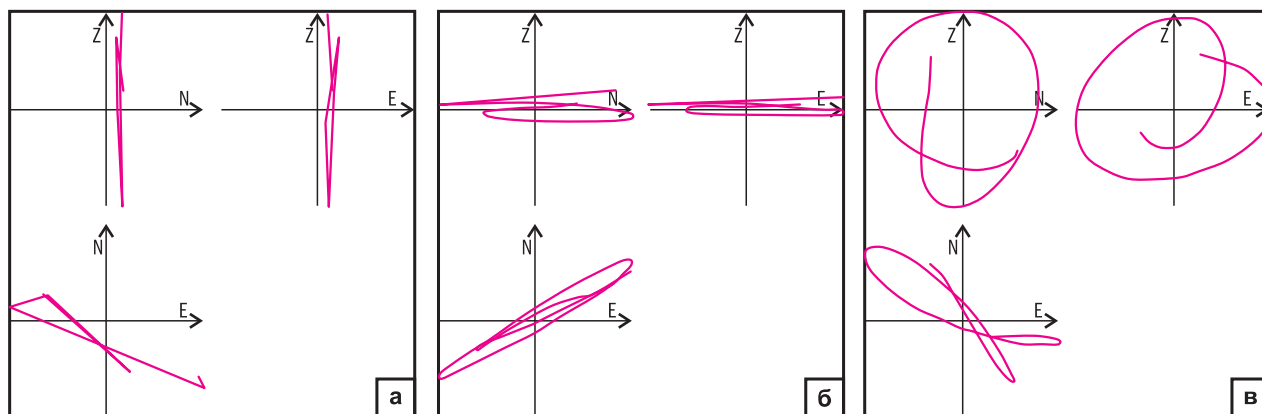


Рис. 4. Движение частиц грунта основных сейсмических волн при записи техногенного сейсмического события: а – для P_g ; б – для S_g ; в – для R_g

и, зная эпицентральные расстояния, можно определять значения магнитуды M_S на большем количестве станций, тем самым повышая устойчивость определяемого параметра или, при необходимости, получать станционную поправку.

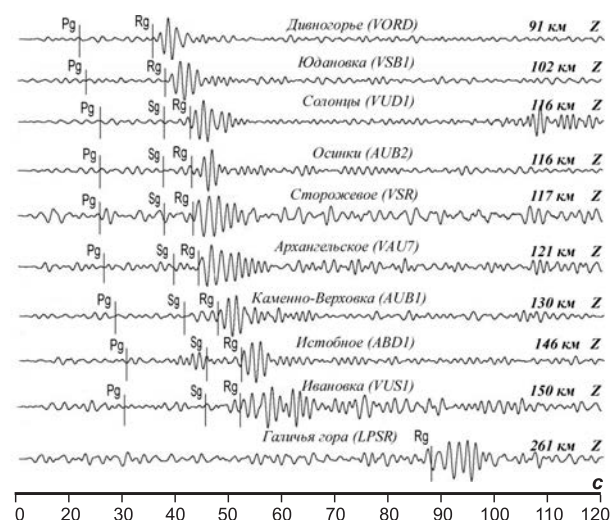


Рис. 5. Вертикальные компоненты записи промышленного взрыва в диапазоне частот 0.4–0.8 Гц

Определены максимальные периоды для вычисления магнитуды на эпицентральных расстояниях от 5 до 450 км. Результаты представлены в табл. 1. Были произведены экспериментальные определения магнитуды M_S для техногенных сейсмических событий, записанных на различных эпицентральных расстояниях.

Таблица 1. Максимальные периоды, соответствующие максимальной амплитуде поверхностной волны для различных эпицентральных расстояний

Δ , км	5–10	10–50	50–180	180–450
T , с	0.4	0.7	1.8	2.2

Одновременно при определении магнитуды M_S для этих же событий определялся энергетический класс по номограмме Т.Г. Раутиан. Построен график взаимного распределения величин энергетического класса и магнитуд M_S (рис. 6).

На графике соотношения магнитуды и энергетического класса (рис. 6) выделяются три области: первая – магнитуды 0.4–1.0 и энергетический класс 2.0–4.0 – связана с промышленными взрывами на эпицентральных расстояниях меньше 20 км; вторая – энергетический класс 4.4–6.6 – связана с большим количеством промышленных взрывов на эпицентральных расстояниях до 40 км; третья область имеет нормальный наклон.

При построении графика соотношения величин энергетического класса и магнитуд M_S нами были получены формулы связи K_p и M_S для различных диапазонов. В практике составления сводных каталогов сейсмических событий различной природы, публикуемых в ежегодниках «Землетрясения России» [Расчёт магнитуды ..., 2022], для пересчёта магнитуды из величины энергетического класса используются следующие формулы [Раутиан, 1964]:

$$M = (K_p - 1.3) / 3 \quad (\text{при } M < 1.8);$$

$$M = (K_p - 4) / 1.8 \quad (\text{при } M \geq 1.8),$$

где K_p – энергетический класс и M – магнитуда землетрясений из работы [Раутиан, 1964]. В табл. 2 приведены значения соотношений величины энергетического класса и магнитуд, рассчитанных по формуле Т.Г. Раутиан и по экспериментальным формулам для условий ВКМ.

Рассчитана разница между магнитудами M (по Т.Г. Раутиан) и M_S (для ВКМ) в процентах. В целом наблюдается достаточно хорошее совпадение между этими значениями, максимальное расхождение составляет 12%. Возможно, это связано

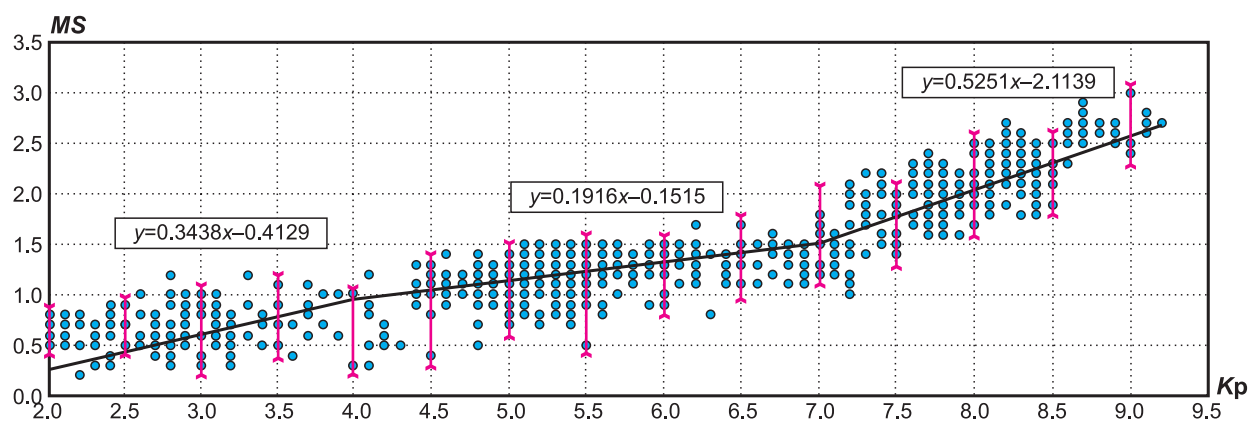


Рис. 6. Соотношение между магнитудой MS и энергетическим классом K_p

Таблица 2. Значения соотношений величины K_p и магнитуд, рассчитанных по формуле Т.Г. Раутиан и по экспериментальным формулам для условий ВКМ

K_p	M (по Т.Г. Раутиан)	MS (для ВКМ)	% M/MS
2	0.23	0.27	8.5
3	0.56	0.62	9.0
4	0.90	0.96	9.4
5	1.23	1.11	11.0
6	1.57	1.30	12.0
7	1.90	1.56	12.0
8	2.20	2.09	10.5
9	2.78	2.61	10.6

с тем, что магнитуда по Т.Г. Раутиан представляет собой осреднённое значение без привязки к определённому региону, а магнитуда MS получена в конкретных геологических условиях территории ВКМ.

Полученные зависимости могут быть использованы при составлении сводных каталогов местных сейсмических событий, произошедших на территории ВКМ в тех случаях, когда непосредственные определения величины энергетического класса, из-за отсутствия на записях поперечных волн, невозможны.

Выводы

В геологических условиях ВКМ, при надлежащем проведении буровзрывных работ, поперечные волны S_g практически не регистрируются или имеют аномально низкие амплитуды, не позволяющие достоверно определять энергетический класс техногенных сейсмических событий.

Поверхностные волны чётко регистрируются практически на всех записях промышленных взрывов даже на значительных удалениях от эпи-

центра подрыва. Это позволяет, зная координаты эпицентра, получать дополнительные значения магнитуды.

С целью определения магнитуды рассчитаны максимальные периоды поверхностной волны для эпицентральных расстояний от 5 до 450 км.

Построен график взаимного распределения величин зарегистрированных энергетических классов и магнитуд.

Получены формулы связи K_p и MS для различных диапазонов.

При обработке и интерпретации техногенных сейсмических событий в геологических условиях ВКМ для определения энергетических характеристик целесообразно использовать шкалу магнитуды MS .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) 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».

Литература

- 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.
- Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под. ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. — М.: ГЕОС, 2013. — 384 с.
- Дубянский А.И., Ефременко М.А., Пивоваров С.П. Оценка энергетического класса техногенных сейсмических событий в условиях Воронежского кристаллического массива // Вестник НЯЦ РК. — 2018. — № 2. — С. 125–128.
- Ефременко М.А., Золототрубова Э.И., Ежова И.Т., Пивоваров С.П. Влияние геологических условий на

характер записей волновых форм промышленных взрывов // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов : материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Шукинской конференции / Под ред. Л.И. Надёжка, Т.Б. Силкиной. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 131–136.

Золототрубова Э.И., Ежова И.Т., Надёжка Л.И., Ефременко М.А., Калинина Э.В. Особенности записей сейсмических событий в районах с разным геологическим строением // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 46.

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.

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.

Михайлова Н.Н., Неверова Н.П. Калибровочная функция $\sigma(\Delta)$ для определения магнитуды M_{PVA} землетрясений северного Тянь-Шаня // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Издательство «Наука» Казахской ССР, 1986. – С. 41–48.

Морозов А.Н. Метод идентификации взрывной сейсмичности на территории Архангельской области // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2008. – Вып. 11, № 1. – С. 177–184.

Надёжка Л.И., Пивоваров С.П., Ефременко М.А. Оценка регистрационных возможностей сети сейсмических станций на территории Воронежского кристаллического массива // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 466–470.

Надёжка Л.И., Пивоваров С.П., Пивоваров Р.С., Семёнов А.Е., Ефременко М.А., Калинина Э.В., Семёнов 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 / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 224–227.

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.

Пивоваров С.П., Ефременко М.А., Пивоваров Р.С. Опыт практического применения шкалы M_S для определения магнитуд техногенных сейсмических событий на территории воронежского кристаллического массива // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 69.

Расчёт магнитуды M (MLH , MS) [Электронный ресурс] // База данных «Землетрясения России» [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. – URL: http://eqru.ggras.ru/files/Calc-magnitude_S_2003-2020.pdf, свободный.

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.

Санина И.А., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Куликов В.И., Волосов С.Г., Надёжка Л.И., Дубянский А.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П. Скоростная модель и особенности записей взрывов из Елец-Липецкой зоны // Геологические опасности: Материалы XV Всероссийской конференции с международным участием / Отв. ред. Ф.Н. Юдахин. – Архангельск: ИЭП Севера АНЦ УРО РАН, 2009. – С. 396–400.

Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1967. – № 2. – С. 13–22.

Федотов С.А. Энергетическая классификация курилокамчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 116 с.

Сведения об авторах

Пивоваров Сергей Павлович, науч. сотр. лаб. сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива (ЛСМ ВКМ) Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Воронеж, Россия. E-mail: serg@geophys.vsu.ru

Ефременко Марина Алексеевна, канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник ЛСМ ВКМ ФИЦ ЕГС РАН, г. Воронеж, Россия. E-mail: 2880@mail.ru

Пивоваров Роман Сергеевич, инженер-исследователь ЛСМ ВКМ ФИЦ ЕГС РАН, г. Воронеж, Россия. E-mail: serg@geophys.vsu.ru

The possibility of determining magnitude MS of technogenic seismic events in the Voronezh Crystalline Massif territory

© 2022 S.P. Pivovarov, M.A. Efremenko, R.S. Pivovarov

GS RAS, Voronezh

Received May 4, 2022

Abstract For the territory of the Voronezh crystalline massif (VCM), formulas are proposed that establish the ratios between the magnitude (MS) of technogenic seismic events and the dimension of the energy class (KR). For research, catalogs of seismic events registered in the territory of the VCM were using. The obtained ratios can be used in the compilation of consolidated catalogs of local seismic events that occurred in the territory of the VCM, in cases where the direct definitions of the energy class, due to the absence of transverse waves on the records of transverse waves, is not possible.

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

For citation Pivovarov, S.P., Efremenko, M.A., & Pivovarov, R.S. (2022). [The possibility of determining magnitude MS of technogenic seismic events in the Voronezh crystalline massif territory]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(2), 33-41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.2.03>. EDN: IHFDLM

References

- Adushkin, V.V., & Malovichko, A.A. (Eds.). (2013). *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropeiskoi chasti Rossii* [Explosions and earthquakes on the European territory of Russia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 384 p. (In Russ.).
- Akimov, A.P., & Krasilov, S.A. (2020). [WSG software package “Seismic data processing system”]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020664678. (In Russ.).
- Dubyansky, A.I., Efremenko, M.A., & Pivovarov, S.P. (2018). [Estimation of the energy class of technogenic seismic events in the conditions of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik NIATs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 125-128. (In Russ.).
- Efremenko, M.A., Zolototrubova, E.I., Ezhova, I.T., & Pivovarov, S.P. (2020). [Influence of geological conditions on the nature of recordings of waveforms of industrial explosions]. In *Struktura, veshchestvennyi sostav, svoistva, sovremennaya geodinamika i seismichnost' platformennykh territorii i sopredel'nykh regionov: materialy XXII Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi Shchukinskoi konferentsii. Pod red. L.I. Nadezhka, T.B. Silkinoi* [Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions: materials of the XXII All-Russian scientific and practical Shchukin conference. Eds. L.I. Nadezhka, T.B. Silkina] (pp. 131-136). Voronezh, Russia: VSU Publishing House. (In Russ.).
- Fedotov, S.A. (1972). *Energeticheskaya klassifikatsiya kurilo-kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitud* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 116 p. (In Russ.).
- Kondorskaya, N.V., Aranovich, Z.I., Solov'yeva, O.N., & Shebalin, N.V. (1981). *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seismicheskikh stantsiyakh Yedinoi sistemy seismicheskikh nablyudeniy SSSR* [Instructions on the production and processing of observations on the production and processing of observations procedure at seismic stations of a Unified system of seismic observations of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 272 p. (In Russ.).
- Krasilov, S.A., Kolomiyets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of processing of digital seismological data using the WSG software package]. In *Materialy Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly “Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh”* [Proceedings of the International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”] (pp. 77-83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Mikhailova, N.N., & Neverova, N.P. (1986). [Calibration function $\sigma(\Delta)$ for determining the magnitude MPVA of earthquakes in the northern Tien Shan]. In *Kompleksnye issledovaniya na Alma-Atinskoy prognosticheskoy poligone* [Comprehensive research at the Alma-Ata prognostic range] (pp. 41-48). — Alma-Ata, Kazakhstan: Nauka Publ. House of the Kazakh SSR. (In Russ.).

- Morozov, A.N. (2008). [Explosive seismicity identification method in the Arkhangelsk region]. *Vestnik Kamchatskoi regional'noi organizatsii Uchebno-nauchnyi tsentr. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences], 11(1), 177-184.
- Nadezhka, L.I., Pivovarov, S.P., & Efremenko, M.A. (2018). [Assessment of the registration capabilities of a network of seismic stations on the territory of the Voronezh crystalline massif]. *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes of the Northern Eurasia], 21(2012), 466-470. (In Russ.).
- Nadezhka, L.I., Pivovarov, S.P., Pivovarov, R.S., Semenov, A.E., Efremenko, M.A., Kalinina, E.V., Semenov, A.M., Kolesnikov, I.M., & Savenkov, A.V. (2016). [Some results of seismic observations on the territory of the Voronezh crystalline massif for 2013–2015]. In *Materialy XI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"*. Otv. red. A.A. Malovichko [Proceedings of the XI International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data". Ed. A.A. Malovichko] (pp. 224-227). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Nadezhka, L.I., Safronich, I.N., Orlov, R.A., & Pivovarov, S.P. (2006). [Voronezh crystalline massif]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2000 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia in 2000] (pp. 193-196). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Pivovarov, S.P., Efremenko, M.A., & Pivovarov, R.S. (2021). [Experience in the practical application of the MS scale for determining the magnitudes of technogenic seismic events in the territory of the Voronezh crystalline massif]. In *Materialy XV Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"*. Otv. red. A.A. Malovichko [Proceedings of the XV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data". Ed. A.A. Malovichko] (p. 69). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Raschet magnitudy M (MLH, MS) [Calculation of magnitude M (MLH, MS)] (2022). *Database "Earthquakes of Russia"*. Available at: http://eqru.gsras.ru/files/Calc-magnitude_S_2003-2020.pdf (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspperimental'naya seismika. Trudy IFZ AN SSSR N 32(199)* [Experimental seismic. Proceedings of the IPE AS USSR N 32(199)] (pp. 88-93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Sanina, I.A., Nesterkina, M.A., Konstantinovskaya, N.L., Kulikov, V.I., Volosov, S.G., Nadezhka, L.I., Dubyansky, A.I., Safronich, I.N., & Pivovarov, S.P. (2009). [Velocity model and peculiarities of recordings of explosions from the Yelets-Lipetsk zone]. In *Geologicheskie opasnosti: Materialy XV Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Otv. red. F.N. Iudakhin* [Geological hazards: Proceedings of the XV All-Russian Conference with international participation. Ed. F.N. Yudakhin] (pp. 396-400). Arkhangelsk, Russia: IEP of the North ASC UB RAS Publ. (In Russ.).
- Solovyov, S.L., & Solovieva, O.N. (1967). [Relationship between the energy class and magnitude of the Kuril earthquakes]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth], 2, 13-22. (In Russ.).
- Zolototrubova, E.I., Ezhova, I.T., Nadezhka, L.I., Efremenko, M.A., & Kalinina, E.V. (2019). [Features records of seismic events in areas with different geological structure]. In *Tezisy XIV Mezhdunarodnoi seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"*. Otv. red. A.A. Malovichko [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XIV International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (p. 46). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Information about authors

Pivovarov Sergey Pavlovich, Researcher of the Laboratory of Seismic Monitoring of the Voronezh Crystalline Massif (LSM VCM) of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Voronezh, Russia. E-mail: serg@geophys.vsu.ru

Efremenko Marina Alekseevna, PhD, Researcher of the LSM VCM GS RAS, Voronezh, Russia. E-mail: 2880@mail.ru

Pivovarov Roman Sergeevich, Research Engineer of the LSM VCM GS RAS, Voronezh, Russia. E-mail: serg@geophys.vsu.ru