

УДК 550.34

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

^{1, 2)} Дубянский А.И., ¹⁾ Ефременко М.А., ¹⁾ Пивоваров С.П.

¹⁾ Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Воронеж, Россия

²⁾ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Приведены результаты анализа распределений величины энергетического класса техногенных сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива. Установлено, что для одних и тех же событий величина энергетического класса варьирует в зависимости от расстояния. Диапазон изменений энергетического класса составляет 2 порядка и зависит в основном от амплитуд поперечных волн.

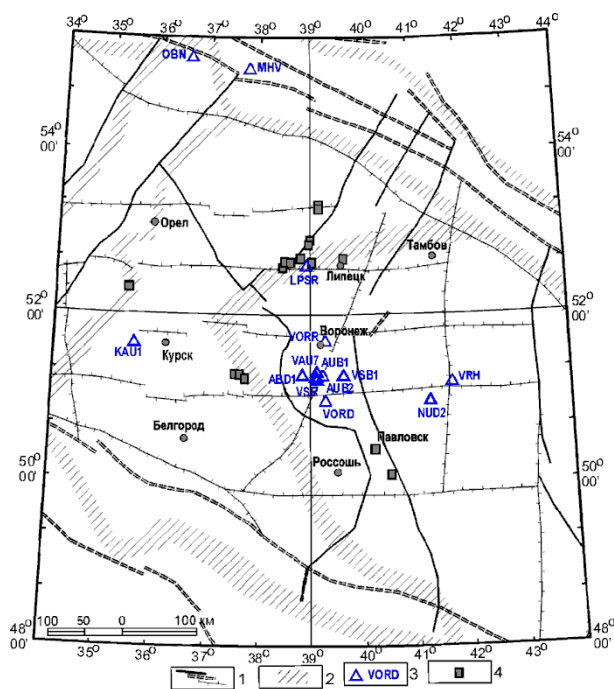
Одним из важнейших параметров сейсмических событий, таких, как промышленные и иные взрывы большой мощности, является их количественная энергетическая характеристика, которая определяется энергетическим классом (K_p) или магнитудой. Оценка этих характеристик особенно актуальна для территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ), где активно функционируют крупные карьеры по добыче железной руды, гранитов, известняков и доломитов, и где за год производится, в общей сложности, более 400 взрывов.

об оценке факторов, влияющих на характер динамических параметров волн, в дальнейшем используемых при определении K_p . Попытка решения этой задачи осуществлялась на основе записей карьерных взрывов в общей сложности за 10 лет, полученных сетью, состоящей из 14 сейсмических станций, расположение которых показано на рисунке 1.

При определении энергетического класса техногенных сейсмических событий, таких как карьерные взрывы, было обнаружено, что значение K_p , как правило, увеличивается с увеличением эпицентрального расстояния. Это отмечается при регистрации как достаточно мощных взрывов (на железорудных и гранито-добывающих карьерах), так и относительно малых зарядов (на карьерах по добыче доломитов). Для получения общей зависимости энергетического класса событий от эпицентрального расстояния построены распределения значений K_p по записям каждой из сеймостанций при взрывах в разных карьерах. В качестве примера на рисунке 2 приведено распределение значений K_p , полученных по записям промышленных взрывов в Железногорском карьере.

В ряде случаев отмечается двуmodalный характер распределения, что связано, главным образом, со взрывами, или в осадочных, или в кристаллических породах. Следует отметить, что суммарный вес используемых зарядов, как показано в [1, 2], не может существенно влиять на энергетическую характеристику сейсмического события, так как регистрируемое волновое поле формируется взрывами на первых нескольких ступенях при практически постоянном объеме взрывчатого вещества. Незначительные изменения веса заряда каждой ступени и времени активизации каждой из них не могут существенно отразиться на амплитуде регистрируемых сейсмических волн. Моделирование замедленного промышленного взрыва показало, что на первый импульс оказывает влияние столько последующих взрывов, сколько их происходит за длительность генерируемого сейсмического импульса [1, 2].

Проведено осреднение значений K_p , полученных по каждой станции и построена зависимость K_p от эпицентрального расстояния (рисунк 3).



1 – разломы различного ранга; 2 – граница геоблоков;
3 – сейсмическая станция; 4 – промышленный карьер

Рисунок 1. Пространственное положение сейсмических станций и карьеров

Оценка энергетического класса с использованием рекомендаций, разработанных для тектонических событий, в ряде случаев оказывается некорректной из-за специфических особенностей сейсмограмм карьерных взрывов. В связи с этим ставится задача

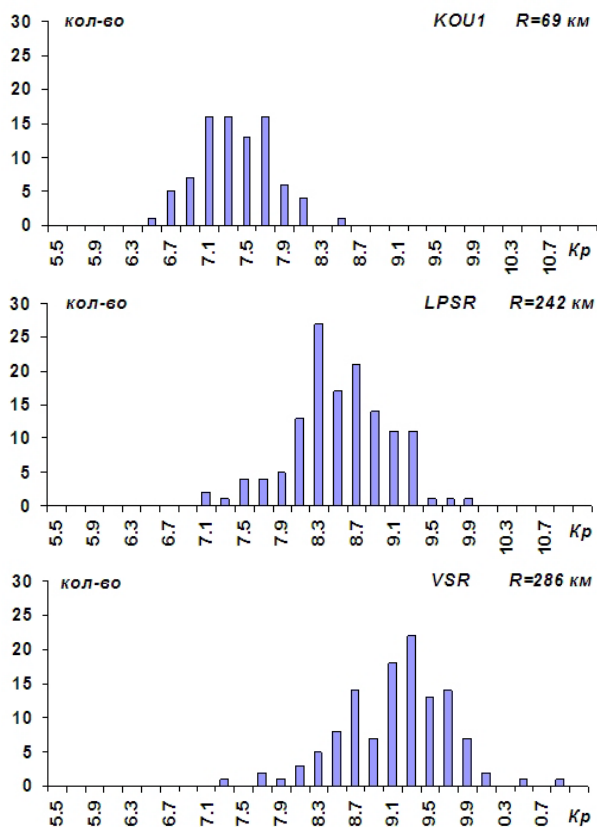


Рисунок 2. Распределение значений K_p в зависимости от эпицентрального расстояния R

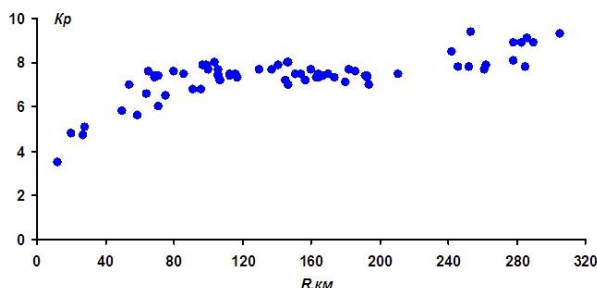


Рисунок 3. Зависимость средних значений K_p от эпицентрального расстояния

Из рисунка 3 видно, что можно выделить три интервала расстояний с однотипным характером зависимости. В первом из них (5–60 км) отмечается резкое увеличение значений K_p при увеличении эпицентрального расстояния, во втором (60–230 км) значения K_p практически одинаковы и изменяются от 7 до 8, в третьем (230–305 км) значения K_p имеют большой разброс и возрастают от 7,7 до 8,4 в начале интервала до 9,0–9,5 при максимальных расстояниях (до 320 км). Следует отметить область регулярного уменьшения значения K_p от 8 до 7,3 в интервале расстояний 100–120 км, а затем увеличение от 7,7 до 8 на удалениях 130–145 км с последующим спадом до 7,5. В целом отмечается увеличение энергетического класса с увеличением эпицентральных расстоя-

ний. Наиболее характерна эта закономерность для взрывов в Железнодорожном и Павловском карьерах. В первом случае (Железнодорожный карьер) на удалении 54 км энергетический класс составляет 7,0, а на расстоянии 305 км – 9,5. При взрывах в Павловском карьере значение K_p при минимальном удалении (52 км) составляет 6,9, а при максимальном (260 км) – 7,7. На фоне общего увеличения K_p выделяются интервалы с различным горизонтальным градиентом изменения этого параметра. Наиболее резкое увеличение K_p при взрывах в Железнодорожном карьере отмечается в интервалах 54–86 км и 240–305 км, а при взрывах в Павловском карьере – в интервале 91–146 км.

Основной причиной увеличения K_p в интервале расстояний 90–140 км является смена типа волн в первых вступлениях, где при удалении от источника вместо динамически слабой рефрагированной волны приходят интенсивные отраженные волны от границ в земной коре. При удалениях свыше 200 км повышенные значения K_p связаны с большими амплитудами Sg -волн, которые связаны с интерференционным характером сигнала закритических отражений от раздела Мохо и коровых границ. Особенно резко это проявляется в интервале расстояний до 100 км. Вероятнее всего, для условий ВКМ необходимо рассчитать корректировочную функцию, которая будет учитывать мощность осадочной толщи и может быть различной при анализе записей взрывов в разных карьерах [3].

Были рассмотрены возможные причины, определяющие характер изменения значений K_p с расстоянием. Значение K_p определяется из известного соотношения:

$$K_p = 1,84(\lg(A_p + A_s) + \sigma(R)),$$

где A_p и A_s – амплитуды продольных и поперечных волн, $\sigma(R)$ – калибровочная функция, зависящая от эпицентрального расстояния R [4]. По записям с высоким соотношением сигнал/помеха на нескольких станциях, с близкими эпицентральными расстояниями от карьеров, были определены значения амплитуд Pg - и Sg -волн. Значения амплитуды Pg -волн закономерно уменьшаются в среднем от 0,02 до 0,007 с увеличением расстояния от 70 до 300 км. Для Sg -волн наблюдается обратная картина, при этом, разброс значений амплитуды значительно выше: от 0,02 на расстоянии 70 км до 0,1 на расстоянии 300 км (рисунок 4).

Такое увеличение значений амплитуды, возможно, связано с двумя причинами. Во-первых, в указанном интервале расстояний происходит смена типа волн, формирующих область первых вступлений. Как показали глубинные сейсмические исследования на территории ВКМ, рефрагированная волна P_0 прослеживается в первых вступлениях до расстояний примерно 90–100 км, ее амплитуда закономерно уменьшается, но при больших удалениях от пункта

взрыва в первые вступления выходят интенсивные отраженные волны от верхних границ в земной коре (K_1 , K_2). Аналогичная ситуация имеет место и в области регистрации S-волн [5]. Во-вторых, отмеченное регулярное увеличение значений энергетического класса на записях при взрывах в карьерах, в какой-то мере, коррелируется с увеличением мощности осадочного чехла, что не противоречит известным соотношениям приращения балльности в зависимости от мощности и свойств осадочных образований [6].

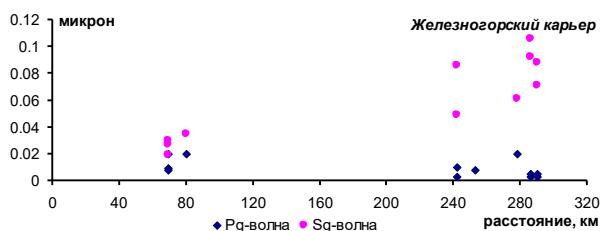


Рисунок 4. Зависимость амплитуд Pg- и Sg-волн от эпицентрального расстояния

Полученные результаты отчетливо показывают, что основной вклад в характер изменений K_p с расстоянием вносит амплитуда Sg-волны. Отмеченные изменения энергии как Pg-, так и Sg-волны, связаны с изменением их природы на различных удалениях от пункта взрыва. В частности, при эпицентральных расстояниях до 25 км в первые вступления выходит рефрагированная волна, которая из-за наличия волновода или уменьшения градиента скорости в верхней части коры, имеет предельную точку регистрации, и ее продолжением в первых вступлениях является слабая дифрагированная волна, которая, в свою очередь, на удалениях порядка 150 км сменяется интенсивной отраженной волной от верхнекоревой границы [1]. В рассматриваемом интервале расстояний аналогичный характер, по-видимому, имеют вступления Sg-волны, амплитуда которых существенно больше, чем амплитуда продольных колебаний. Закритические ветви отраженных волн от верхнекоревых границ образуют первые вступления Pg-волны и вступления Sg-колебаний, имеющие относительно стабильные амплитуды до удалений около 250 км. При больших расстояниях в области вступлений Sg-волны формируется, как правило, сложная интерференционная запись, ответственная за суще-

ственное возрастание амплитуд и, соответственно, значений энергетического класса сейсмических событий.

Определенную роль в уровне значений K_p играет использование калибровочной функции $\sigma(R)$. В целом, асимптотическая часть этой функции приводит к увеличению значений K_p примерно в 3 раза и усиливает и без того аномальные значения энергетического класса в интервале расстояний 220–305 км. При регистрации заведомо слабых взрывов на эпицентральных расстояниях от 12 км до 75 км отмечается (при использовании $\sigma(R)$) увеличение значений K_p от 3 до 6,5, хотя значения K_p практически одинаковы без учета $\sigma(R)$. В рассматриваемом примере значения K_p без калибровочной функции на удалениях 160–200 км отличаются примерно на единицу от зарегистрированных при меньшем удалении. В тоже время значения K_p с учетом $\sigma(R)$ увеличиваются до 7–8. Вероятно, что использование калибровочной функции, рассчитанной для тектонических сейсмических событий, не достаточно корректно при интерпретации техногенных событий. Это, в свою очередь, требует расчета калибровочной функции, учитывающей региональные особенности глубинного строения, для определения энергетического класса техногенных сейсмических событий в условиях ВКМ.

Выполненный анализ показал, что аномальное увеличение значений энергетического класса при увеличении эпицентрального расстояния от 220 км до 305 км определяется, главным образом, аномально высокими значениями амплитуды поперечных волн, что делает некорректным использование калибровочной функции, которая при меньших удалениях играет положительную роль. Характер зависимости амплитуды Sg-волны от расстояния в интервале до 200 км в какой-то мере, но с большим размахом, аналогичен характеру поведения амплитуды Pg-волны. Это указывает на влияния акустических особенностей скоростных моделей Pg- и Sg-волн в верхней части земной коры. Учитывая, что амплитуда Pg-волны закономерно уменьшаются с увеличением расстояния, необходимо выполнить дополнительный анализ причин аномального возрастания амплитуды Sg-волны на больших удалениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубянский, А.И. Глубинные сейсмические исследования на территории ВКМ / А.И. Дубянский // Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / Главн. ред. Н.М. Чернышов. – Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2012. – 330 с.
2. Надежка, Л.И. Сейсмические эффекты крупномасштабных взрывов в Воронежском регионе и их геоэкологические следствия / Л.И. Надежка, С.П. Пивоваров, А.Е. Семенов, О.М. Ипполитов // Месторождения природного и техногенного минерального сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поисков, экологическая геология // Сб. ВГУ. – Воронеж. – 2008. – С. 326–329.

3. Дубянский, А.И. О некоторых особенностях энергетических характеристик сейсмических событий на территории Воронежского кристаллического массива / А.И. Дубянский, С.П. Пивоваров, М.А. Ефременко // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С.151–154.
4. Раутиан, Т.Г. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений / Т.Г. Раутиан // Труды ТИСС АН Тадж.ССР, 1960. – №7. – С.41–96.
5. Дубянский, А.И. Сейсмический разрез земной коры по профилю Павловск-Сторожевое / А.И. Дубянский // Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы: Материалы XVI Международной конференции. – Воронеж, 2010. – С. 247–250.
6. Павленко, О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / О.В. Павленко. – Научный Мир. – 2009. – 260 с.

ВОРОНЕЖ КРИСТАЛЛ МАССИВИ ЖАҒДАЙЫНДА ТЕХНОГЕНДІ СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒАЛАРДЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ КЛАССЫН БАҒАЛАУ

^{1, 2)} Дубянский А.И., ¹⁾ Ефременко М.А., ¹⁾ Пивоваров С.П.

¹⁾ *«Ресей ғылыми академиясының Бірыңғай геофизикалық қызметі» федераль зерттеу орталығы, Воронеж, Ресей*
²⁾ *Воронеж мемлекеттік университеті, Воронеж, Ресей*

Воронеж кристалл массиві аумағындағы техногенді сейсмикалық оқиғалардың энергетикалық классының мәндері таралуын талдау нәтижелері келтірілген. Бір оқиғалардың энергетикалық классының мәндері қашықтығына байланысты өзгерілетіні анықталған. Энергетикалық классы өзгерілу ауқымы 2 ретін құрайды да негізінде көлденең толқындардың амплитудаларына тәуелді.

ESTIMATION OF THE POWER CLASS OF TECHNOGENIC SEISMIC EVENTS IN THE CONDITIONS OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

^{1, 2)} A.I. Dubyanskiy, ¹⁾ M.A. Efremenko, ¹⁾ S.P. Pivovarov

¹⁾ *Federal Research Centre “Integrated Geophysical Service of the Russian Academy of Science”, Voronezh, Russia*
²⁾ *Voronezh State University, Voronezh, Russia*

The analysis results of power class value distributions of technogenic seismic events in the territory of the Voronezh crystalline massif are given in work. It is established that for the same events the value of a power class varies depending on distance and can differ in hundreds of times. The major influencing factor is generally amplitudes of transverse waves.