

УДК 550.(34.(012:062):344.2)

Оценка длительности короткозамедленного взрыва по результатам вейвлет-анализа его записи

© 2022 г. К.Ю. Силкин

ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж, Россия

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

Аннотация. Рассмотрена проблема оценки значений короткозамедленного промышленного взрыва по записи их одиночным сейсмоприёмником. Показано, что спектральный образ записи такого взрыва несёт информацию как о величине задержки между отдельными ступенями взрыва, так и об общей его длительности. Сделано предположение о том, что результаты непрерывного вейвлет-преобразования для общей продолжительности процесса взрывания могут дать более точную и надёжную информацию. Описана методика оценки значения этого параметра на основании нескольких трансформаций первичной вейвлетограммы. Последовательный расчёт энергограммы, коррелограммы и хаарограммы позволяет выйти на визуализацию и измерение псевдоциклов перераспределения энергии сейсмических колебаний от короткозамедленного взрыва.

Ключевые слова: взрыв, короткозамедленный взрыв, длительность взрыва, карьер, рудник, вейвлет-анализ.

Для цитирования: Силкин К.Ю. Оценка длительности короткозамедленного взрыва на результатах вейвлет-анализа его записи // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.04>

Введение

Промышленные взрывы в крупных карьерах и рудниках производятся по довольно сложной схеме, позволяющей минимизировать сейсмическое воздействие на инфраструктуру самого горнодобывающего предприятия [Надёжка и др., 2018] и окружающие населённые пункты [Верхоланцев и др., 2019]. Главной особенностью этой схемы является разделение общей массы взрывчатого вещества (ВВ), которое предполагается использовать, на несколько, а иногда и множество, сравнительно небольших частей (ступеней), каждую из которых инициируют отдельно. При этом формируется регулярная последовательность таких ступеней, следующих через фиксированный промежуток времени (задержку), измеряемую обычно десятками миллисекунд. Поэтому такой взрыв называется короткозамедленным (КЗВ).

Кроме того, на действительно крупных карьерах реализуется циклическая последовательность ещё более высокого порядка, когда с шагом уже в секунды подрывается несколько блоков. При этом блоки могут находиться на разных бортах карьеров и различаться ещё как-нибудь между

собой [Адушкин, Спивак, 2013]. Например, один блок разрушает вскрышу, а другой – дробит вмещающую толщу. Разумеется, каждый блок реализуется по короткозамедленной схеме.

Все эти приёмы минимизируют сейсмический эффект взрывов, который, тем не менее, может распространяться на сотни километров [Силкин, 2021]. Одновременно они создают такую волновую картину, которая представляется на сейсмограммах значительно более сложной, чем не только одиночный взрыв, но и даже простая их сумма [Goforth et al., 2006].

Как правило, горнодобывающие предприятия крайне неохотно (ссылаясь на коммерческую или иную тайну) раскрывают детали применяемой в каждом конкретном случае схемы производства взрывных работ [Дубянский, Силкин, 2018]. Какова была общая масса ВВ, сколько было ступеней, с какой задержкой они выполнялись и какова была величина заряда в каждой из них?

Однако для корректной оценки величины сейсмического эффекта взрыва необходимо иметь возможность оценить эти параметры. Кроме того, данные сведения требуются для решения задач сейсмического зондирования недр, а также распознавания записей карьерных

взрывов и региональных землетрясений [Arrow-smith et al., 2007].

Чаще всего возникает потребность и возможность восстановить параметры КЗВ на основании сейсмограмм, зарегистрированных стационарными сейсмологическими станциями [Надёжка и др., 2009]. Более вероятно, что эти станции располагаются не в ближней зоне крупного карьера, а порой на таких расстояниях, которые переводят проблему в региональный масштаб. Иными словами, это расстояния в десятки и первые сотни километров.

В то же время исследователи, приступающие к целенаправленному изучению КЗВ, нередко предпочитают работать в локальном масштабе. Для обеспечения максимального контроля процессов взрыва, генерации сейсмических волн, их распространения, преобразования и регистрации переносные сейсмостанции устанавливаются не далее нескольких километров от карьера [Еманов, 1982], у его борта [Зуева, Лебедев, 2017] или даже прямо на его дне [Глазнев и др., 2009]. Полученные при этом результаты применимы к реальной ситуации в региональном масштабе лишь отчасти, так как при значительном удалении от карьера будет зарегистрирован совсем другой волновой состав колебаний.

Математическое моделирование, проверенное натурными наблюдениями, показывает [Еманов, 1982; Hedlin et al., 2007; Глазнев и др., 2009; Goforth et al., 2006], что спектр мощности сигнала КЗВ несёт в себе информацию как о величине задержки между ступенями, так и, возможно, об общей длительности всего взрыва.

Самым заметным эффектом является обогащение спектра Фурье сейсмограммы частотными составляющими, близкими к ритму подрыва ступеней. Чем точнее выдерживается равенство массы одиночных зарядов и постоянство задержки между ними, тем сильнее этот эффект [Глазнев

и др., 2009]. Кроме того, на спектрах наблюдается скаллопинг-эффект, цикличность которого может быть пропорциональна общей длительности взрыва [Goforth et al., 2006]. Однако коэффициент этой пропорциональности не определён и даёт простор для субъективизма. Кроме того, спектр содержит пики, связанные и с длительностью задержки. Поэтому возможны коллизии между этими эффектами, особенно при не очень большом числе ступеней.

Вероятно, поэтому интерес к данной теме у современных исследователей снизился. Но мы вернулись к ней в связи с новым результатом, полученным в ходе поиска средства дискриминации карьерных взрывов и землетрясений по изображениям вейвлет-анализа их записей одиноким сейсмоприёмником.

1. Данные

Для первого этапа были взяты записи станции «Апатитская сейсмическая группа» АР0 (Z-канал) взрывов в поверхностных карьерах и подземных рудниках Мурманской области (табл. 1). В Кировском руднике взрывы были подземными. Остальные взрывы поверхностные. Длительность инициации определена исходя из доступных априорных сведений о числе ступеней взрыва и величине задержки между ними.

На рис. 1 показано положение сейсмостанции АР0, Кировского рудника и карьеров, в которых производились взрывы.

2. Методы

Аналізу подвергаются результаты непрерывного вейвлет-преобразования записей событий, однако не непосредственно, а после двух дополнительных этапов трансформации [Силкин, 2020].

Таблица 1. Сводка событий промышленных взрывов

№	Дата, дд.мм.гггг	Время, чч.мм.сс	Место	Длительность, с	Масса ВВ, т
1	01.09.2002	04:16:39	Кировский	0.368	107
2	16.02.2003	03:08:56	Кировский	1.000	69
3	06.04.2003	02:58:40	Кировский	0.414	104
4	18.05.2003	02:50:09	Кировский	0.414	56
5	04.07.2003	07:45:22	Коашвинский	0.380	46
6	28.08.2003	07:08:03	Ньюркахкский	0.740	138
7	27.09.2003	10:15:21	Ковдорский	4.600	186
8	30.09.2003	08:32:47	Ньюркахкский	1.600	166

Сначала производится преобразование двумерного изображения вейвлетограммы в условно называемую «энергограмму», представляющую собой набор огибающих графиков для каждого фиксированного значения частоты на вейвлетограмме. Затем энергограмма участвует в расчёте значений взаимно-корреляционной функции (ВКФ) для каждого частотного среза энергограммы на данном времени с каж-

дым частотным срезом на всех остальных временах и получением в результате уже «коррелограммы». Последний шаг выполняется по аналогии с преобразованием сонограмм в [Асминг, Баранов, 2006].

Для примера возьмём запись взрыва № 1 (табл. 1, рис. 2).

В качестве материнского вейвлета был использован вейвлет Гаусса восьмого порядка (рис. 3).

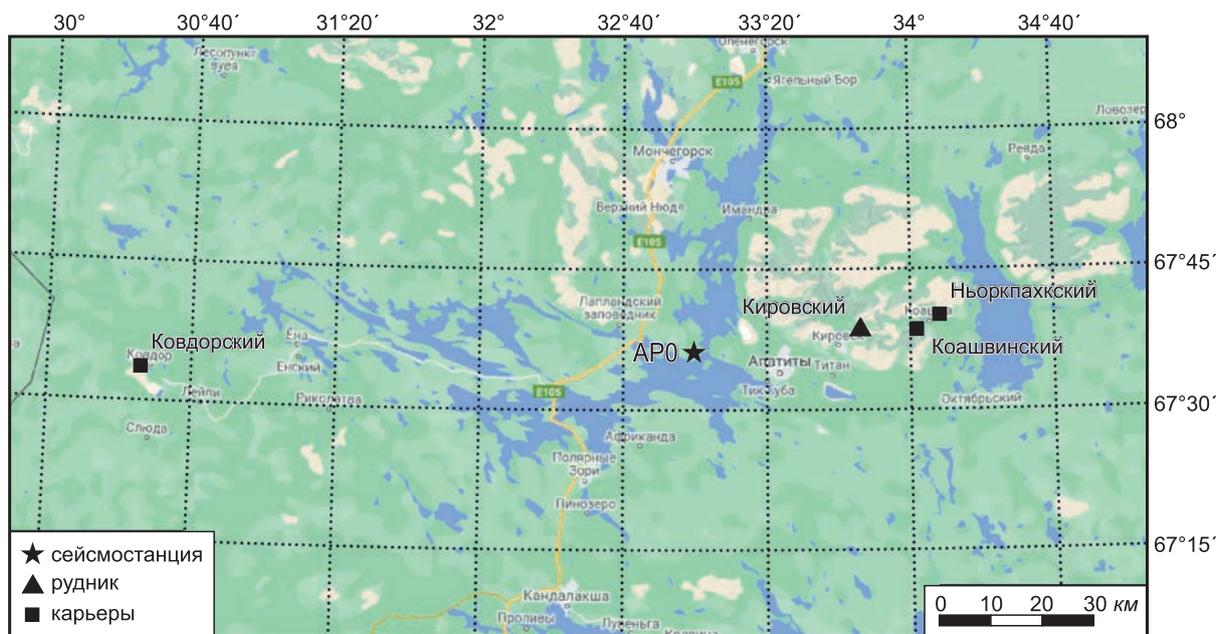


Рис. 1. Обзорная карта расположения горных выработок, в которых производились взрывы, зарегистрированные станцией AP0

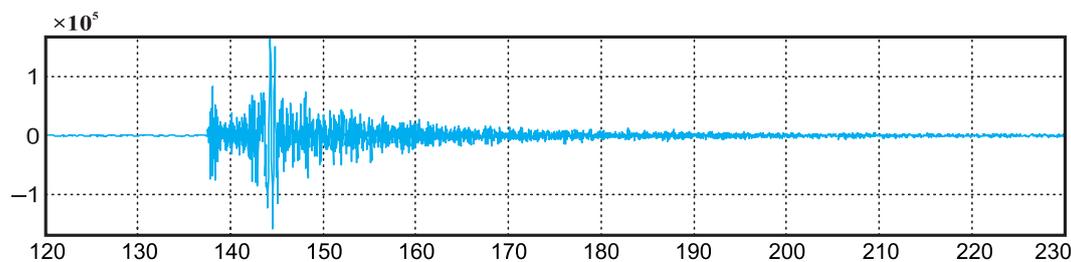


Рис. 2. Запись Z-канала станции AP0 для взрыва № 1.

По горизонтальной оси отложено условное время в с, по вертикальной – амплитуда в мкм/с

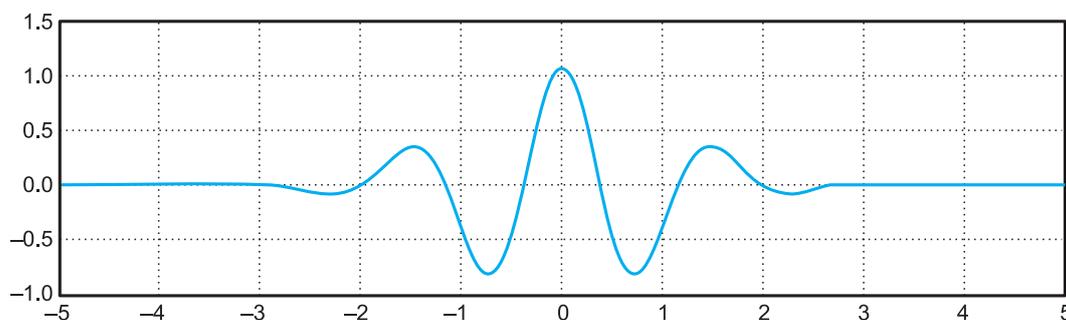


Рис. 3. Вейвлет Гаусса 8-го порядка

Если взять всю запись в исходном виде и рассчитать вейвлетограмму, то результат будет, как показано на рис. 4.

Энергограмма позволяет отвлечься от разнообразия значений и чередования знаков колебательного процесса и сосредоточиться на точной частотно-временной локализации волновых явлений (рис. 5).

Здесь чётко обозначаются высокочастотные объёмные волны, первые из которых интерпретируются тривиально, а следующие, видимо,

являются вторичными фазами, образовавшимися на каких-то границах раздела среды. В области низких частот, как и следовало ожидать, присутствует поперечная волна.

Рассмотрим, однако, только фрагмент записи, ограниченный справа началом интенсивного низкочастотного процесса, как показано на рис. 6. Ожидается, что здесь присутствуют продольные волны разной природы: прямая и некоторые вторичные волны.

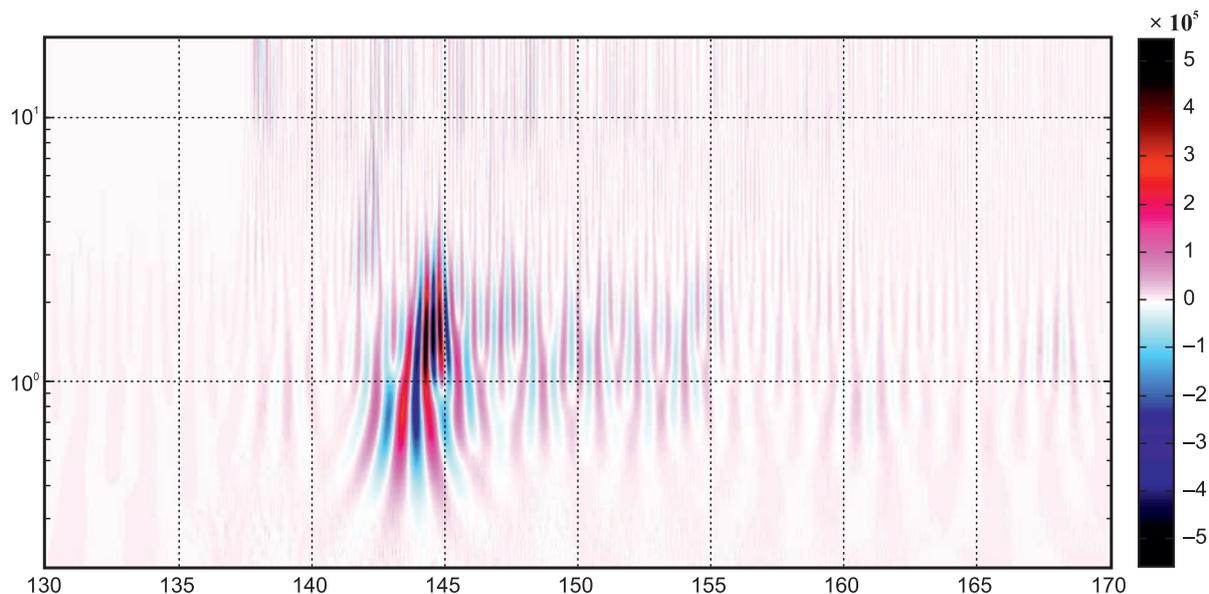


Рис. 4. Вейвлетограмма записи взрыва № 1.

По горизонтальной оси — условное время в с, по вертикальной — частота в Гц , на цветовой шкале — амплитуда в мкм/с

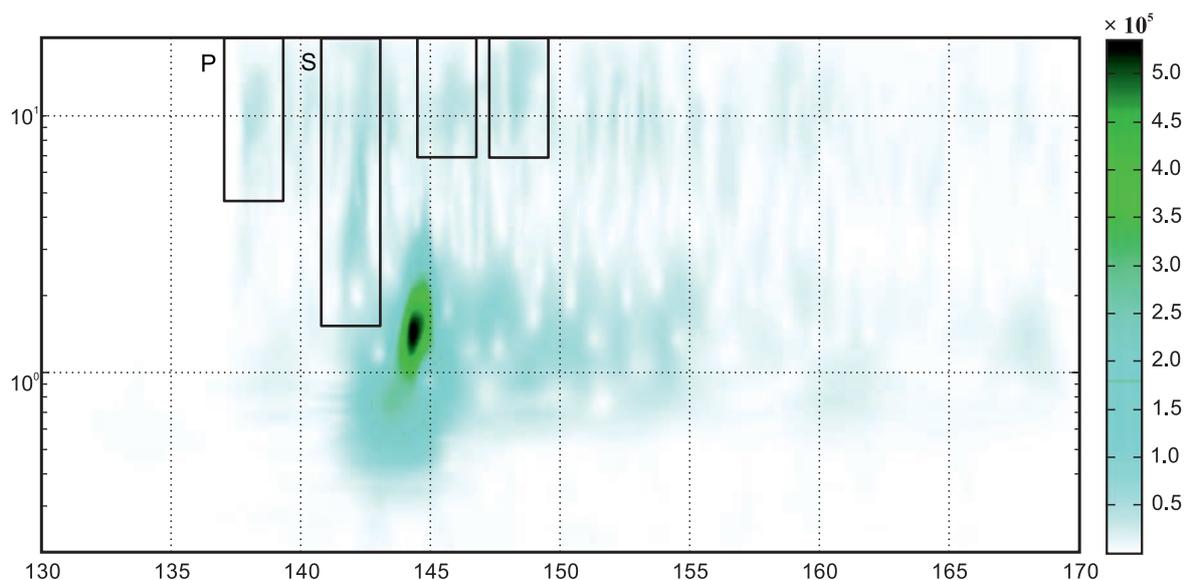


Рис. 5. Энергограмма записи взрыва № 1.

Рамками выделены некоторые фазы объёмных волн.
Единицы измерения координатных осей и цветовой шкалы аналогичны рис. 4

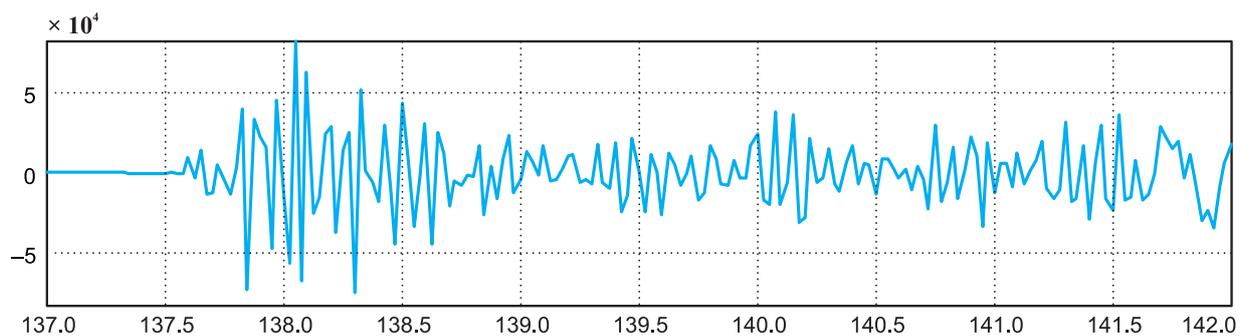


Рис. 6. Фрагмент записи до вступления поперечной волны.

Единицы измерения координатных осей аналогичны рис. 2

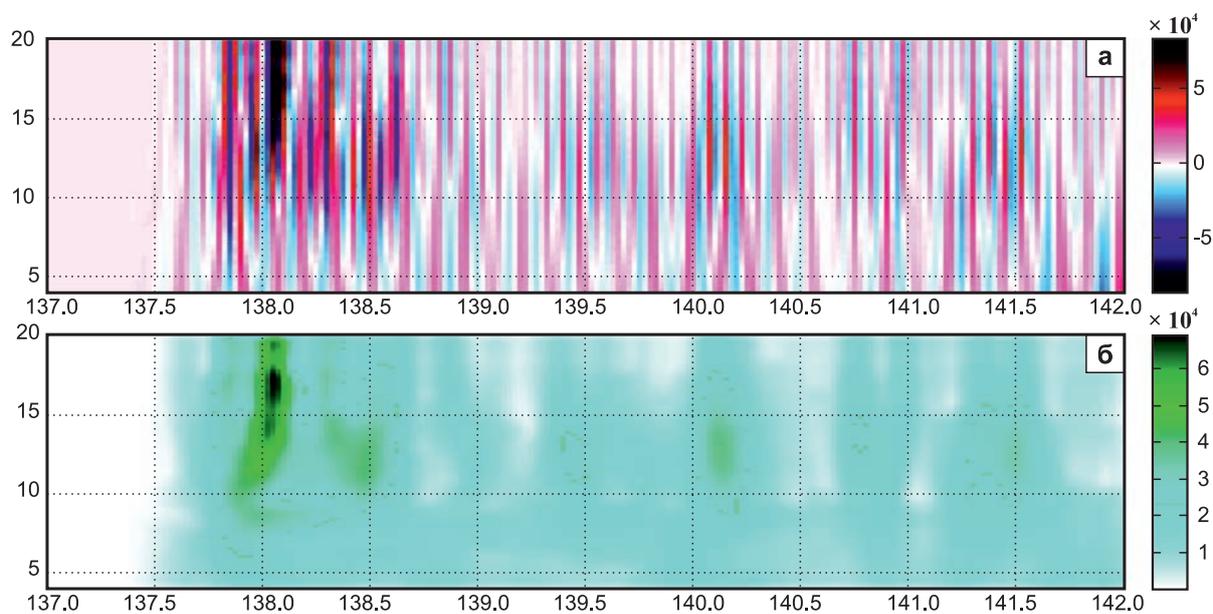


Рис. 7. Вейвлетограмма и энергограмма фрагмента записи продольных волн:

а – вейвлетограмма в высокочастотной части спектра; б – энергограмма по вейвлетограмме

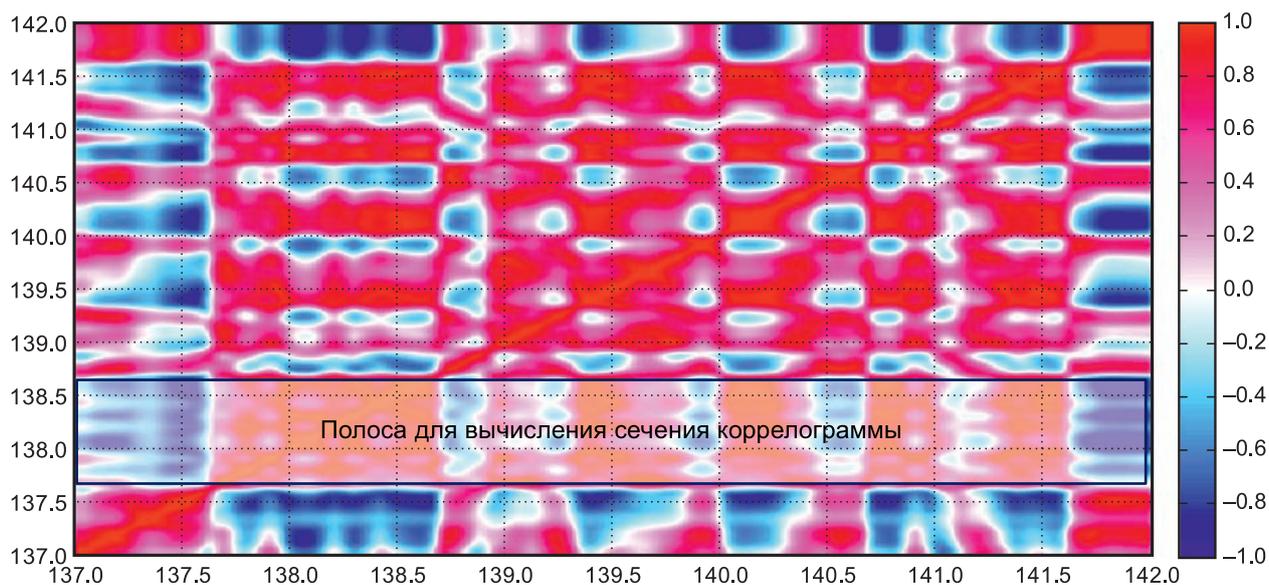


Рис. 8. Коррелограмма фрагмента записи продольных волн.

Единицы измерения координатных осей – условное время в с

На рис. 7 показаны результаты расчёта вейвлетограммы и энергограммы для этого фрагмента записи.

На вейвлетограмме можно увидеть, а на энергограмме рассмотреть ещё лучше, что энергия продольных волн, чей первый импульс длится около 1 с, поступает далее порциями. Коррелограмма (рис. 8) чётко демонстрирует, что длительность этих порций – 0.3–0.5 с, а перерывы между ними – 0.2 с.

Целесообразно подчеркнуть и детальнее изучить этот процесс с помощью поперечного сечения коррелограммы, которое в силу её симметричности можно сделать как по вертикали, так и по горизонтали. Для удобства изображения сделаем по горизонтали.

Чтобы исключить случайные флуктуации, возьмём среднее всех значений поперёк полосы шириной 1 с, расположенной начиная с отметки 137.7 с (после вступления *P*-волны). Иначе говоря, эта полоса по ширине лежит в интервале 137.7–138.7 с, а по длине протянулась на весь анализируемый интервал записи. Уместно так выбирать положение и ширину полосы для сечения коррелограммы, чтобы в поперечном ей направлении не наблюдалось большой дисперсии

значений и уж точно не было смены знака ВКФ. Тогда осреднение значений полосы даст обоснованную оценку характера процесса распределения по времени энергии волнового процесса (рис. 9). Для всех изученных событий ширина этой полосы в 1 с была достаточной.

Циклическая компонента, хорошо заметная на этом графике, требует отдельного изучения. Для этого также можно применить вейвлет-преобразование. Форма этой компоненты далека от синусоиды. Кроме того, природа её не имеет непосредственной связи с первичным колебательным процессом объёмных волн, а отражает более широкомасштабную пульсацию перераспределения сейсмической энергии. Поэтому для разложения этого графика в вейвлет-базисе использован самый простой материнский вейвлет Хаара (рис. 10).

Данное преобразование (результат которого условно назовём «хаарограммой», чтобы не путать его с обычной вейвлетограммой) хорошо отмечает наиболее сильные градиенты в разномасштабных циклических данных. Хаарограмма (рис. 11), для лучшего различения с вейвлетограммой, построена в зависимости (по вертикали) не от частот, а от периодов в диапазоне 0.2–2.0 с.

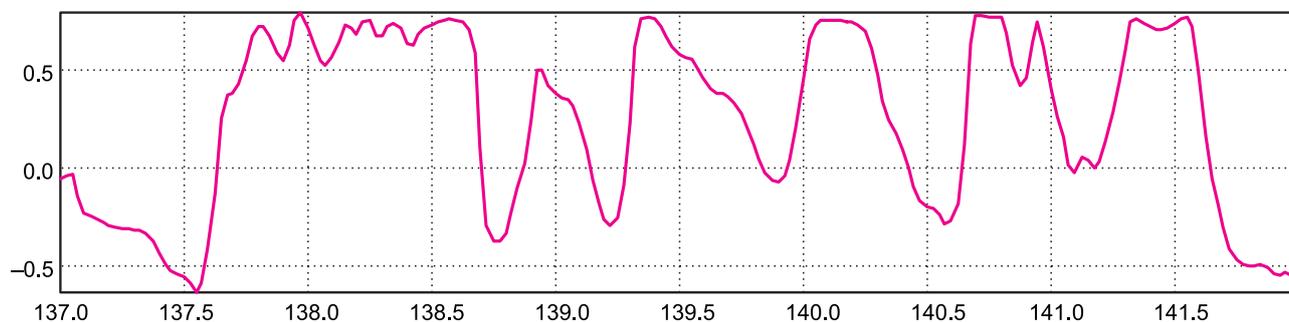


Рис. 9. График поперечного сечения коррелограммы в полосе 137.7–138.7 с

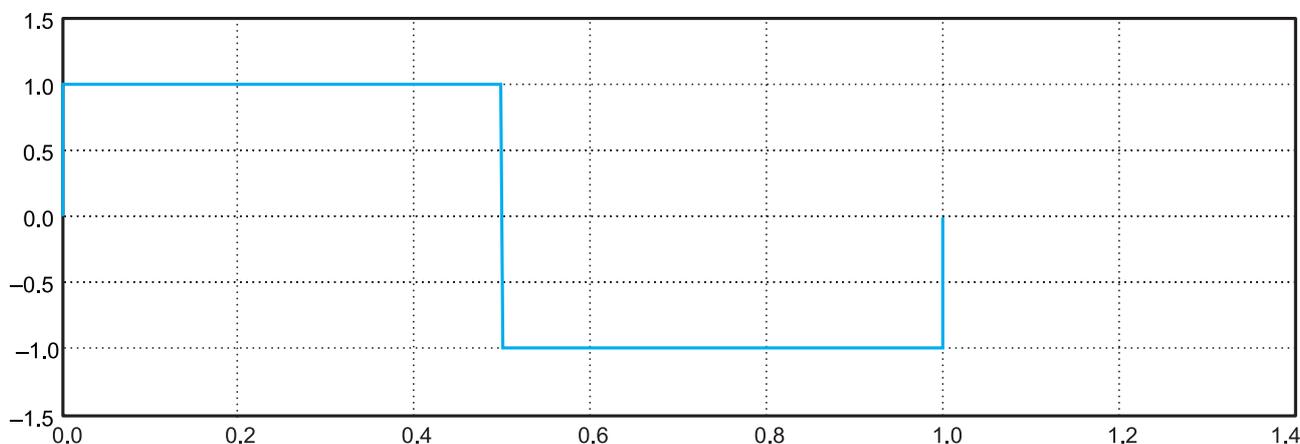


Рис. 10. Вейвлет Хаара

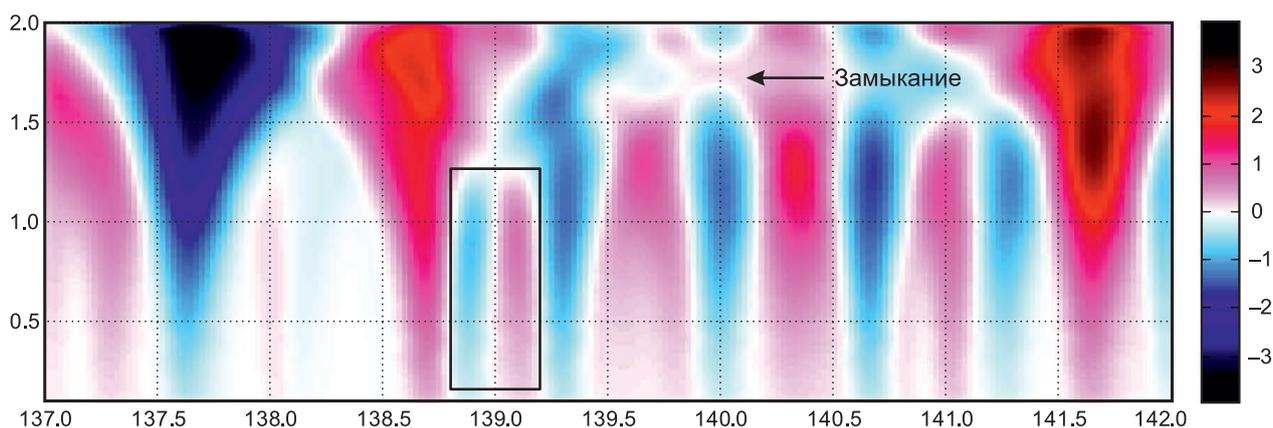


Рис. 11. Хаарограмма значений поперечного сечения коррелограммы.

По горизонтальной оси отложено время в с, по вертикальной – период циклической составляющей в с, цветовая шкала – условные значения интенсивности циклов

Для каждой хаарограммы целесообразно (это выяснено по результатам многочисленных опытов) брать верхнюю границу периодов такой, чтобы начали замыкаться экстремумы среднего масштаба. При этом экстремумы, охватывающие весь анализируемый диапазон, демонстрировали бы первые признаки стремления к замыканию. Конечно, если визуализация значений хаарограммы не предполагается, то можно продлить ось периодов вверх и до замыкания самых крупномасштабных экстремумов. Однако для создания человеко-читаемого изображения важно наглядно продемонстрировать малые значения хаарограммы в области коротких периодов. Нижний же предел оси периодов полезно делать в 10 раз меньше верхнего.

Обратим внимание на область этого изображения, следующую за первым сильным положительным экстремумом. Псевдоцикл, включённый в неё, имеет длительность около 0.4 с, что оказалось близко к значению продолжительности процесса взрывания (0.368 с).

3. Анализ

Далее по описанной выше методике были исследованы записи всех поверхностных и подземных взрывов. При анализе хаарограммы оценены значения ширины второго псевдоцикла δ . В табл. 2 приведено сравнение параметра δ и реальной длительности процесса взрывания Δ , полученной от непосредственных исполнителей взрывов.

Погрешность измерения δ близка к 0.05 с, что соответствует частоте Найквиста для использованных записей. При этом средняя относительная ошибка оценки δ по всем взрывам составила 11%, только по подземным взрывам – 9%.

Таблица 2. Сопоставление оценки длительности взрывания δ и его реального значения Δ

№	1	2	3	4	5	6	7	8
δ	0.326	0.921	0.456	0.385	0.455	0.537	4.551	1.574
Δ	0.368	1.000	0.414	0.414	0.380	0.740	4.600	1.600

Примечание: значения даны в с

При этом следует учесть, что значения Δ являются проектными. В действительности вполне может быть, что заявленная величина задержки между ступенями не выдерживалась с абсолютной идентичностью. По результатам многочисленных наблюдений [Верхоланцев и др., 2019] большая часть задержек отличается от номинала не сильнее, чем на 0.01 с. Однако, когда общее число ступеней измеряется десятками, в сумме это может сформировать заметный эффект, что даёт надежду предполагать более высокую точность метода.

Такое хорошее совпадение априорных и экспериментальных данных позволяет выдвинуть гипотезу о том, что длительность второго псевдоцикла на хаарограмме имеет непосредственную связь с полной длительностью КЗВ. По-видимому, выявленный эффект имеет общую природу с реверберацией, обнаруженной на спектрах в [Goforth et al., 2006], однако даёт ясный результат, не требующий дальнейшего истолкования.

Выводы

Поскольку представленные результаты были получены на ограниченной выборке, имеет смысл продолжить исследования с другими компонентами той же записи; с другими станциями, зарегистрировавшими эти же события; с другими

событиями; в другом районе. Мешает работать с другими событиями скрытность горняков, которые не спешат делиться с геофизиками параметрами производимых взрывов.

Тем не менее, если выдвинутая гипотеза верна, то она может стать удобным инструментом в изучении сейсмического эффекта крупных промышленных взрывов.

Автор выражает благодарность канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН В.Э. Асмингу за любезную помощь в подборе данных. Без ценных обсуждений с ним использованных методов и полученных результатов данная работа была бы невозможна.

Литература

- Адушкин В.В., Спивак А.А. Влияние трассы на затухание сейсмического сигнала от короткозамедленных карьерных взрывов // *Динамические процессы в геосферах*. – 2013. – № 4. – С. 118–126.
- Асминг В.Э., Баранов С.В. Использование спектрально- и частотно-временных вариаций сейсмических сигналов для различия землетрясений и взрывов в Евро-арктическом регионе // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 23–27.
- Верхоланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. и др. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау» // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2019. – № 2. – С. 59–69. doi: 10.15372/FTPRPI20190207
- Глазнев В.Н., Плаксин Д.О., Дручек Е.Ю. Стохастическая модель короткозамедленного карьерного взрыва // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Геология. – 2009. – № 2. – С. 140–149.
- Дубянский А.И., Силкин К.Ю. Расшифровка структуры промышленных взрывов с использованием вейвлет-анализа сейсмологических записей // *Современные проблемы и опыт гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследований на территории Центрально-Чернозёмного региона: Материалы региональной научно-практической конференции*. – Воронеж: Научная книга, 2018. – С. 70–75.
- Еманов А.Ф. Влияние короткозамедленного взрывания на сейсмограммы глубинного сейсмического зондирования // *Геология и геофизика*. – 1982. – Т. 23, № 9. – С. 81–89.
- Зуева И.А., Лебедев А.А. Характерные черты сейсмических записей промышленных взрывов на Костомукшском железорудном месторождении по данным станций Карельской сети // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Геология. – 2017. – № 2. – С. 133–141.
- Надёжка Л.И., Пивоваров С.П., Дубянский А.И. и др. Об энергетических оценках техногенных событий в геологических условиях воронежского кристаллического массива // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 166–169.
- Надёжка Л.И., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н. и др. Некоторые особенности сейсмического эффекта, создаваемого промышленными взрывами // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Геология. – 2009. – № 2. – С. 155–160.
- Силкин К.Ю. Использование вейвлет-анализа как дополнительного критерия при идентификации природы сейсмического события // *Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции* / Под ред. Л.И. Надёжка, Т.Б. Силкиной. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 328–334.
- Силкин К.Ю. Моделирование трансформации геофизической функции литосферы в результате горнодобывающей деятельности на территории Курской магнитной аномалии // VII Международная научно-практическая конференция «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» / Под ред. И.И. Косиновой. – Воронеж: АО «Воронежская областная типография», 2021. – С. 116–123.
- Arrowsmith S., Hedlin M., Arrowsmith M., Stump B. Identification of delay-fired mining explosions using seismic arrays: Application to the PDAR array in Wyoming, USA // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2007. – V. 97. – P. 989–1001. doi: 10.1785/0120060136
- Goforth T., Hetzer C., Stump B. Characteristics of regional seismograms produced by delay-fired explosions at the Minntac Iron Mine, Minnesota // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – V. 96. – P. 272–287. doi: 10.1785/0120050068
- Hedlin M., Minster B., Orcutt J. The time-frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosions recorded in Kazakhstan, USSR // *Geophysical Journal International*. – 2007. – V. 99. – P. 109–122. doi: 10.1111/j.1365-246X.1989.tb02019.x

Сведения об авторе

Силкин Константин Юрьевич, канд. геол.-мин. наук, доц. Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»), г. Воронеж, Россия. E-mail: const.silkin@ya.ru

Estimation of the delay-fired explosion's duration based on the wavelet analysis results of its seismogram

© 2022 K.Yu. Silkin

VSU, Voronezh, Russia

Received February 3, 2022

Abstract The article considers the problem of observing delay-fired industrial explosions using their single seismic receiver seismogram. It is shown that the seismogram's spectral image of a delay-fired explosion carries information about both the delay between individual explosion steps and its total duration. Assumption is made that the results of the continuous wavelet transform for the total duration of the blasting process can provide more accurate and reliable information. Technique for estimating the value of this parameter based on several transformations of the primary waveletogram is described. Sequential calculation of the energogram, correlogram and haarogram makes it possible to visualize and measure pseudo-cycles of the energy distribution of seismic signals from a delay-fired explosion.

Keywords Explosion, delay-fired explosion, explosion duration, quarry, mine, wavelet analysis.

For citation Silkin, K.Yu. (2022). [Estimation of the delay-fired explosion's duration based on the wavelet analysis results of its seismogram]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(1), 53-62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.04>

References

- Adushkin, V.V., & Spivak, A.A. (2013). [Influence of the path on the attenuation of the seismic signal from short-delayed quarry explosions]. *Dinamicheskie processy v geosferah* [Dynamic Processes in Geospheres], 4, 118-126. (In Russ.).
- Arrowsmith, S., Hedlin, M., Arrowsmith, M., & Stump, B. (2007). Identification of delay-fired mining explosions using seismic arrays: Application to the PDAR array in Wyoming, USA. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 989-1001. <https://doi.org/10.1785/0120060136>
- Asming, V.E., & Baranov, S.V. (2006). [Using spectral and time-frequency variations of seismic signals to distinguish earthquakes and explosions in the Euro-Arctic region]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the International Seismological Workshop] (pp. 23-27). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Dubjanskij, A.I., & Silkin, K.Yu. (2018). [Deciphering the structure of industrial explosions using wavelet analysis of seismological records]. In *Sovremennye problemy i opyt gidrogeologicheskikh, inzhenerno-geologicheskikh i jekologo-geologicheskikh issledovanij na territorii Central'no-Chernozemnogo regiona. Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern problems and experience of hydrogeological, engineering-geological and ecological-geological research on the territory of the Central Black Earth region. Proceedings of the regional scientific-practical conference] (pp. 70-75). Voronezh, Russia: Publishing and printing center "Scientific Book". (In Russ.).
- Emanov, A.F. (1982). [Influence of short-delay blasting on seismograms of deep seismic sounding]. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 23(9), 81-89. (In Russ.).
- Glaznev, V.N., Plaksin, D.O., & Druchek, E.Ju. (2009). [Stochastic model of a short-delayed career explosion]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology], 2, 140-149. (In Russ.).
- Goforth, T., Hetzer, C., & Stump, B. (2006). Characteristics of regional seismograms produced by delay-fired explosions at the Minntac Iron Mine, Minnesota. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 272-287. <https://doi.org/10.1785/0120050068>
- Hedlin, M., Minster, B., & Orcutt, J. (2007). The time-frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosions recorded in Kazakhstan, USSR. *Geophysical Journal International*, 99, 109-122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb02019.x>
- Nadezhka, L.I., Pivovarov, S.P., Dubjanskij, A.I. et al. (2018). [On energy estimates of technogenic events in the geological conditions of the Voronezh crystalline massif]. In *Sovremennye metody obrabotki*

i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (pp. 166-169). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Nadezhka, L.I., Pivovarov, S.P., Safronich, I.N. et al. (2009). [Some features of the seismic effect created by industrial explosions]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology], 2, 155-160. (In Russ.).

Silkin, K.Yu. (2020). [Using wavelet analysis as an additional criterion for identifying the nature of a seismic event]. In *Struktura, veshchestvennyi sostav, svoistva, sovremennaja geodinamika i seismichnost' platformnykh 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. Proceedings of the XXII All-Russian scientific and practical Shchukin conference with international par-

icipation. Eds. L.I. Nadezhka, T.B. Silkina] (pp. 328-334). Voronezh, Russia: VSU Publ. (In Russ.).

Silkin, K.Yu. (2021). [Modeling the transformation of the geophysical function of the lithosphere as a result of mining activities on the territory of the Kursk magnetic anomaly]. In *VII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija "Jekologicheskaja geologija: teorija, praktika i regional'nye problemy"* [VII International Scientific and Practical Conference "Ecological Geology: Theory, Practice and Regional Problems"] (pp. 116-123). Voronezh, Russia: JSC "Voronezh Regional Printing House". (In Russ.).

Verkholantsev, A.V., Dyagilev, R.A., Shulakov, D.Y. et al. (2019). Monitoring of Earthquake Loads from Blasting in the Shakhtau Open Pit Mine. *Journal of Mining Science*, 55, 2, 229–238. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20190207>

Zueva, I.A., & Lebedev, A.A. (2017). [Characteristic features of seismic records of industrial explosions at the Kostomuksha iron ore deposit according to the data of stations of the Karelian network]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology], 2, 133-141. (In Russ.).

Information about author

Silkin Konstantin Yurievich, PhD, Docent of the Environmental Geology Department, Voronezh State University (RAS), Voronezh, Russia. E-mail: const.silkin@ya.ru