

А. В. Анчугов^{1,2✉}, К. Л. Тарасенко³

Анализ экспериментальных данных на соответствие закону Омори для образцов керна горной породы при одноосном нагружении до разрушения: от лабораторных данных к сейсмическим закономерностям

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

²ООО Ситен Технологии, г. Новосибирск, Россия

³АО Геология, г. Новосибирск, Россия

e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается выполнение закона Омори для экспериментальных данных записей акустической эмиссии, полученных в 2-канальном режиме при одноосном нагружении до разрушения 55 образцов керна различной литологии. Сравниваются два варианта обработки данных, по результатам которой определяется время первых вступлений сигналов акустической эмиссии: с применением алгоритма Байера-Крадольфера - для автоматического выделения времени первого вступления и пороговым алгоритмом. Выполнен анализ временного ряда микрособытий. Эксперимент поставлен без нагрева, при комнатной температуре. Для регистрации ультразвуковых волн используется пьезоэлектрический преобразователь.

Ключевые слова: Алгоритм Байера-Крадольфера, ультразвуковой датчик, первые вступления, акустическая эмиссия, керн горной породы, закон Омори

A. V. Anchugov^{1,2✉}, K. L. Tarasenko³

Analysis of experimental data for compliance with the Omori law for core samples of rock under uniaxial loading before destruction: from laboratory data to seismic patterns

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²SciTen Technologies, Novosibirsk, Russia

³JSC Geologika, Novosibirsk, Russia

e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

Abstract. The article discusses the implementation of Omori's law for experimental data of acoustic emission records obtained in 2-channel mode with uniaxial loading before destruction of 55 core samples of various lithology. Two variants of data processing are compared, according to the results of which the time of the first arrivals of acoustic emission signals is determined: using the Bayer-Kradolfer algorithm - for automatic allocation of the time of the first arrival and the threshold algorithm. Microevent time series was analyzed. The experiment was performed without heating, at room temperature. A piezoelectric transducer is used to detect ultrasonic waves.

Keywords: Bayer-Kradolfer algorithm, ultrasonic receiver, first arrivals, acoustic emission, rock core sample, Omori's law

Введение

Как правило, записи акустической эмиссии на образцах керна горной породы при проведении в лаборатории различных экспериментов делаются в мно-

гоканальном режиме. Для этого применяются специализированные блоки сбора данных, со множеством датчиков, размещаемых на манжете (до 24), в которую помещается образец. Известны системы иностранного производства, такие как MTS (гидравлический пресс с 3-осной ячейкой нагружения, установленный в Сколково), где объём получаемых данных на диске даже в ходе одного нагружения образца до разрушения может достигать значительного объёма, существуют и отечественные многоканальные измерительные системы, используемые, к примеру, в Институте физики Земли, с помощью которых проводятся информативные подобные эксперименты. На протяжении последних десятилетий регулярно проводятся эксперименты по лабораторному моделированию процессов разрушения применительно к сейсмическому режиму, а акустическая эмиссия, наблюдаемая на образцах, рассматривается как модель естественной сейсмичности [3].

Несмотря на это, для проведения экспериментов по нагружению образцов до разрушения и сбора данных акустической эмиссии на установке для проведения геомеханических экспериментов можно использовать и простую двухканальную измерительную систему, когда активные датчики, которыми уже оборудована установка (с излучающей и приёмной продольно поляризованными пьезопластинами), переводятся в режим регистрации и подключаются ко входам двухканального усилителя сигналов. Какие задачи можно решать с помощью лишь двухканальной системы регистрации?

Описание выполненного эксперимента

Эксперимент по исследованию эффекта Кайзера проводится на более чем 50 образцах керна различной литологии размером 60х30 мм в одноосном режиме нагружения до разрушения. При этом используется гидравлически управляемый пресс и плиты нагружения (акустические плунжера) с установленными внутрь пьезопластинами с резонансной частотой 1 МГц. Скорость осевого нагружения составляет 60 МПа/мин, без обжимного давления. При этом ячейка стабилметра оборудована датчиками продольной и поперечной деформации образца и датчиком усилия на оси. Интервал записи данных о текущей деформации образца и его нагруженном состоянии составляет одну секунду.

Цель задуманного Калининым С.А. с коллегами эксперимента состоял в изучении эффекта Кайзера [8]. Для этого были специально подготовлены ориентированные образцы керна и собрана измерительная система для регистрации сигналов акустической эмиссии в двухканальном режиме, состоящая из датчиков, непосредственно контактирующих с образцом (они же передают нагрузку на образец), двухканального усилителя сигнала на 40 Дб, и регистратора Аурис В320 с управляющим компьютером, и проведены необходимые эксперименты. Запись данных на компьютер проводится с помощью специально разработанного М. Романютой программного обеспечения.

Частота дискретизации составляет 1 МГц, разрешение 10 бит, что позволило на имеющемся в наличии блоке регистрации собирать данные в непрерывном режиме, при этом все эксперименты заканчиваются разрушением образца в течение первых минут см. Рис. 2. Описание и результаты экспериментов по иссле-

дованию эффекта Кайзера представлены в публикации [5]. Здесь же рассматривается другой аспект: полученные данные анализируются с точки зрения сейсмологии, считая, что момент разрушения образца — это главное сейсмическое событие, а все сигналы акустической эмиссии, которые следуют после, — это афтершоки основного события, выполняется ли фундаментальный закон Омори для полученных в результате экспериментов данных.

Таким образом, **целью работы** является исследовать временную динамику АЭ до/после макроразрушения и её соответствие закону Омори.

Закон Омори для афтершоков сейсмических событий. Степенная аппроксимация эволюции афтершоков

В 1894 году Фусакичи Омори сформулирован закон, носящий его имя [9]. Законом Омори утверждается, что после сильного сейсмического события частота афтершоков, следующих за главным ударом, в среднем гиперболически уменьшается (рис.1) с течением времени:

$$n(t) = \frac{k}{c+t} \quad (1)$$

В сейсмологии при анализе наблюдений закон Омори, обычно заменяют степенной функцией известной как “закон Омори-Утсу”. Данная формула предложена Хирано в 1924 году [7].

$$n(t) = \frac{k}{(c+t)^p} \quad (2)$$

В работе [2] предложен подход, в котором дифференциальное уравнение (3) точнее аппроксимирует экспериментальные данные, чем алгебраическая формула Омори.

$$dn/dt + \sigma n^2 = 0, \quad (3)$$

где σ — т. н. коэффициент деактивации очага землетрясения.

Дифференциальная форма закона позволяет гибко моделировать эволюцию афтершоков.

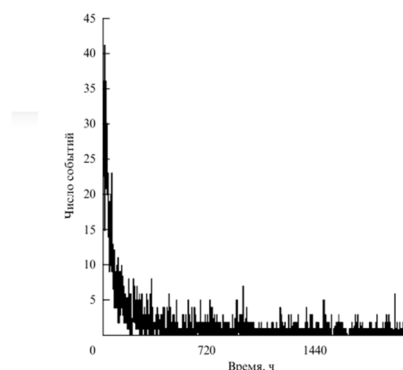


Рис. 1. Зависимость числа афтершоков от времени после главного удара 24.11.1987 в Калифорнии [2]

В общем случае σ зависит от времени вследствие изменчивости состояния горных пород в очаге, стабилизирующемся после главного удара. Общее решение же дифференциального уравнения (3) представлено в виде (4). Это решение с точностью до обозначений совпадает с формулой, предложенной Омори, только в том случае, когда $\sigma = \text{const}$.

$$n(t) = n_0 \left[1 + n_0 \int_0^t \sigma(t') dt' \right]^{-1}, \quad (4)$$

где n_0 — частота афтершоков в начальный момент времени.

В работе утверждается, что коэффициент деактивации $\sigma(t)$ изменяется с течением времени, отражая сложные процессы релаксации горных пород в очаге землетрясения [2].

Другой подход, учитывающий влияние релаксаторов на обобщённый механизм афтершоковой релаксации описан в работе [4].

Данные, рассмотренные авторами в данной статье, анализируются в классическом понимании закона Омори, то есть с использованием формул (1) и (2).

Результаты выполненного эксперимента

Исследовано 55 образцов различной литологии. Получены данные акустической эмиссии для 46 образцов в 2-канальном режиме. Для всех исследованных образцов выделено время каждого события, их максимальные амплитуды, а также отмечен момент разрушения образца.

- Диаметр образцов 30 ± 1.5 мм, длина 60 ± 1 мм.
- Образцы включали следующие литотипы: алевролит, аргиллит, песчаник с карбонатным цементом, песчаник среднезернистый, песчаник мелкозернистый, песчаник крупнозернистый.
- Плотность образцов варьировалась в диапазоне от 2.21 до 2.62 г/см³.
- Прочность образцов при одноосном сжатии менялась в диапазоне 42-198 МПа.
- События выделялись независимо двумя алгоритмами: Байера-Крадольфа и пороговым алгоритмом.
- Материалом для проведения экспериментальных работ послужили образцы керна Вертолётной площади с интервала глубин 2276–2604 м.

Результаты эксперимента по разрушению образца 16.1

На верхнем графике рисунка 2 отображена амплитуда записанного сигнала от времени начала нагружения в отсчётах АЦП. На нижнем графике синим цветом обозначено общее количество событий АЭ от времени, выделенных по пороговому детектору, красным обозначен график нагрузки на образец. Максимальное значение графика в верхней точке (в момент слома) соответствует 42.3 МПа.

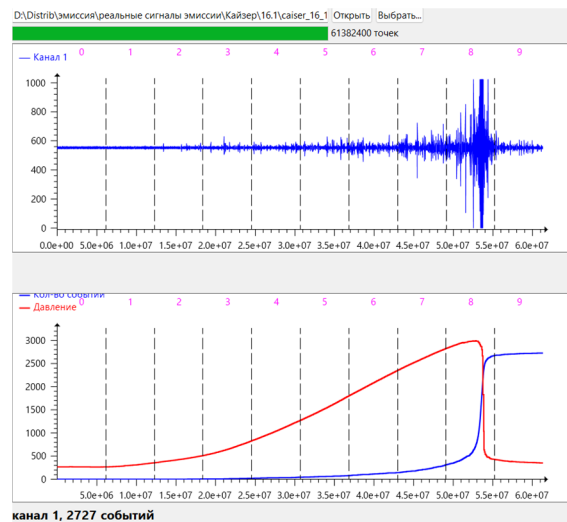


Рис. 2. Окно программы сбора данных АЭ, образец 16.1, автор Романюта М.

Для выделения первых вступлений и составления альманаха событий в обоих каналах, был использован алгоритм Байера-Крадольфера [6] (рис. 3), поскольку уже была его готовая реализация в виде программного пакета для поиска первых вступлений в записанных данных [1].

Так для образца 16.1 из крупнозернистого песчаника после слома (главного события) выделено 164 события в 1-ом канале (всего от начала нагружения 816) и 167 во 2-ом канале (всего от начала нагружения 761). Есть пропущенные события (рис. 3). В верхней части рисунка приведена часть записи после слома образца. В нижней части вся запись от начала нагружения длительностью 61.3 секунды.

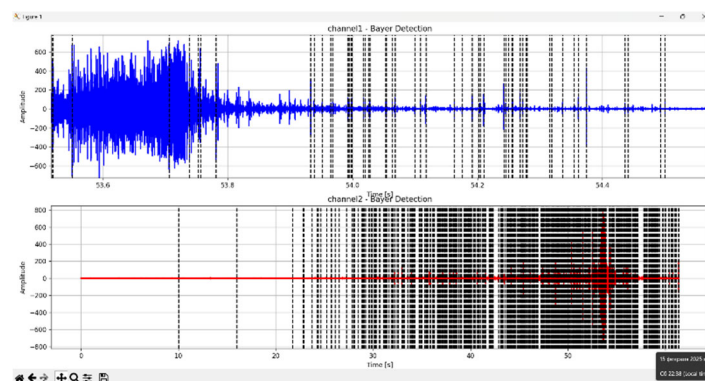


Рис. 3. Выделенные афтершоковые события с использованием алгоритма Байера-Крадольфера

Максимальное усилие слома составляет 42.3 МПа.

В 1-ом канале с помощью алгоритма Байера зарегистрировано 816 событий, по пороговому детектору – 2727 событий. Во 2-ом канале с помощью алгоритма Байера зарегистрировано 761 событие, по пороговому детектору – 2292 события.

Слом образца произошёл на 53.71 секунде. Событий после слома в 1-ом канале по порогу – 647, во 2-ом – 379.

Автоматический алгоритм Байера-Крадольфера универсален, однако, часть событий не распознаётся подобным алгоритмом. Возможно, это связано с большим динамическим диапазоном исходного сигнала и наличием событий разной амплитуды, для обнаружения которых нужно настраивать алгоритм специальным образом. Поэтому для сравнения и поиска событий в данных дополнительно используется простой пороговый алгоритм с установкой порога обнаружения на уровне не более двукратного превышения уровня шума в канале.

Анализ временных рядов событий

При сравнении работы разных алгоритмов установлено, что пороговый алгоритм выделил значительно больше событий чем алгоритм Байера-Крадольфера что в свою очередь помогает проследить выполнение закона Омори для событий акустической эмиссии на образцах керна. Количество афтершоков (и соответственно их частота) оценивается путем подсчета общего числа событий (магнитуд) в каждом временном интервале. Временные окна не фиксированы отдельно в программном коде, так как программа не разбивает данные на равные промежутки времени; вместо этого рассчитываются мгновенные значения частоты афтершоков на основании общей модели распределения. То есть график строится так, что каждое временное значение (каждый момент времени) сопоставляется с количеством зафиксированных событий, происходящих непосредственно в этот момент времени (рис. 4). Таким образом, оценка частоты афтершоков основана на общем наборе временных отметок, а не на разделении временного ряда на отдельные окна фиксированной ширины.

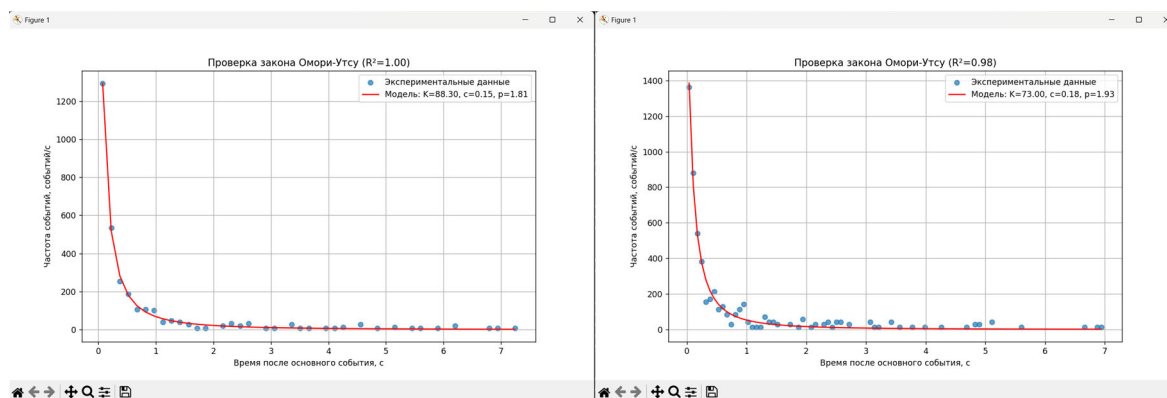


Рис. 4. Временной ряд выделенных с помощью порогового алгоритма афтершоков в 1-ом и 2-ом каналах для образца 16.1 из крупнозернистого песчаника

Обсуждение

Из анализа временных рядов данных следует что:

- Закон Омори применим к лабораторным данным (учитывая условия проведения эксперимента), записанным в 2-канальном режиме.

- Аналогии и различия в параметрах p , c между результатами, полученными при лабораторном эксперименте и природными сейсмическими явлениями, связаны с разными масштабами времени и энергии. В то же время прослеживается общность механизмов разрушения в разных масштабах. Одноосное нагружение образцов при простом эксперименте позволяет моделировать природные явления.

- Закон Омори можно использовать для прогноза устойчивости пород.

- Экспериментально подтверждена зависимость параметров p , c от типа породы, скорости нагружения, уровня напряжения.

- Образец имеет конечный размер, и не все события из одного канала также регистрируются в другом канале.

При проведении экспериментов не используется обжимное давление и не исследуется влияние температуры и насыщенности флюидами образцов горной породы, а эти факторы окажут влияние на поведение образца под нагрузкой, что следует учитывать при планировании последующих исследований. Достоинствами проведения подобных экспериментов является наиболее простая схема исследования – требуется только 2 датчика работающих в режиме регистрации, возможность использовать в качестве манжеты обычный термоусадочный рукав, без специальных посадочных мест под дополнительные датчики акустической эмиссии. Что в свою очередь упрощает крепление датчиков (на основе линейного дифференциального трансформатора) осевой и поперечной деформации на образце. Недостатком является то, что даже на образцах небольшого размера становится заметна неоднородность образца и вызванные ею различные количества событий в различных каналах. При исследованиях образцов больших типоразмеров – 38, 50 мм и более в диаметре, некоторая часть событий не будет отражена ни в 1-ом ни во 2-ом каналах. И для получения полной картины разрушения образца следует использовать большее количество датчиков, что в свою очередь повлечёт необходимость применить более сложную уже многоканальную систему регистрации и специальную манжету с посадочными гнездами для крепления датчиков.

Заключение

Возможности оборудования, разработанного авторами (датчики и измерительная система), позволяют решать различные задачи, встающие перед исследователями. Помимо исследования эффекта Кайзера на образцах горной породы и выполнения закона Омори для данных акустической эмиссии, полученных при лабораторных экспериментах, 2-канальный режим регистрации данных достаточен для проведения многостадийных тестов образцов и построения паспорта прочности горной породы.

Благодарности

Выражаем благодарность коллегам из компании Геологика за предоставленные экспериментальные данные. Отдельно выражаем благодарность д. ф.-м. н.

Сибирякову Б. П. за идею проверить полученные экспериментальные данные на выполнение закона Омори для событий афтершоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анчугов А. В. Применение алгоритма Бэра-Крадольтера для автоматического выделения первого вступления отражённой ультразвуковой волны, возбуждаемой излучателем и регистрируемой от границы вода-нефть в сепараторе / А. В. Анчугов // Сейсмические приборы. – 2023. – Т. 59. – № 43. – С. 5-17.
2. Гульельми А. В. Закон Омори (из истории геофизики) / А. В. Гульельми // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187. – № 3. – С. 343-348.
3. Смирнов В. Б. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга-Рихтера от напряжений / В. Б. Смирнов [и др.] // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 149-165.
4. Смирнов В. Б. О взаимосвязи параметров Омори и Гутенберга-Рихтера в афтершоковых последовательностях / В. Б. Смирнов [и др.] // Физика Земли. – 2020. – № 5. – С. 3-22.
5. Цветков С. С. Эффект Кайзера в осадочных горных породах на примере отложений вертолётной площади Томской области / С. С. Цветков, Ю. И. Колесников, Д. К. Жарасбаева // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2. – № 2. – С. 196-201.
6. Baer M. An automatic phase picker for local and teleseismic events / M. Baer, U. Kradolfer // Bull. Seism. Soc. Am. – 1987. – Vol. 77. – P. 1437-1445.
7. Hirano R. Investigation of aftershocks of the great Kanto earthquake at Kumagaya / R. Hirano // Kishoshushi. Ser. 2. – 1924. – Vol. 2. – P. 77-83.
8. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques / A. Lavrov // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – Vol. 40 (2). – P. 151-171.
9. Omori F.J. On the after-shocks of earthquakes / F. J. Omori // Coll. Sc. Imp. Univ. Tokyo. – 1894. – Vol. 7 (2). – P. 111

© А. В. Анчугов, К. Л. Тарасенко, 2025