

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Закон Омори (из истории геофизики)

А.В. Гульельми

В конце XIX в. японский сейсмолог Омори открыл первый закон физики землетрясений, согласно которому частота афтершоков убывает гиперболически с течением времени. За прошедшие годы накопилась обширная литература, посвящённая закону Омори. Всеми признаётся выдающееся значение открытия Омори. Вместе с тем существует глубокое разногласие относительно интерпретации закона. Одни утверждают, что Омори всего лишь предложил простую формулу для аппроксимации опытных данных, и заменяют формулу Омори степенной функцией с дробным отрицательным показателем степени. Другие пытаются увидеть в законе Омори физический смысл. Изложены история и суть открытия Омори, причём особое внимание уделено интерпретации закона. Показано, что оригинальная формулировка Омори вполне соответствует представлению о механизме разрушения горных пород в очаге землетрясения.

Ключевые слова: сейсмология, землетрясение, афтершок, тектонический разлом, рекомбинация, деактивация, релаксация

PACS number: 91.30. – f

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.01.038039>

Содержание

1. Введение. Предыстория и сущность открытия (343).
 2. Степенная аппроксимация эволюции афтершоков (344).
 3. Интерпретация закона Омори (345).
 4. Обобщённый закон эволюции афтершоков (346).
 5. Уравнение афтершоков в действии (346).
 6. Обсуждение (346).
 7. Заключение (347).
- Список литературы (348).

1. Введение.

Предыстория и сущность открытия

Описание выдающихся событий более чем столетней давности лучше всего начать издали. В 1850 г. в Ливерпуле родился Джон Милн, которому в будущем предстояло стать известным геофизиком, одним из основателей современной сейсмологии [1]. Милн получил образование в Лондоне, работал горным инженером в Ньюфаундленде, геологом на Синайском полуострове, а с 1875 по 1895 г. работал в Токио по приглашению правительства Японской империи. Любопытно, что в поисках приключений Милн добирался до Токио три месяца, в основном по суше (через Сибирь). В 1880 г. он создал горизонтальный маятниковый сейсмограф — первый удобный в обращении и достаточно чувствительный прибор для регистрации землетрясений.

В 1887 г. Милн избирают членом Королевского общества (The Royal Society of London). Ему удаётся убедить Общество выделить средства для создания мировой сети сейсмостанций, оборудованных его приборами. (Между прочим, три станции Милн решил разместить в России.) В Японии высоко оценили заслуги Милна перед страной и миром. Император Мэйдзи наградил его Орденом Восходящего Солнца и назначил ему пожизненную пенсию в размере 1000 иен. Токийский университет избрал его почётным профессором.

Фусакичи Омори был преданным учеником Джона Милна и пользовался ободряющей поддержкой учителя, как, впрочем, и все молодые японские сейсмологи того времени. 28 октября 1891 г. произошло землетрясение с магнитудой $M = 8$. Сейсмографы Милна зарегистрировали многочисленные афтершоки. Анализ этих афтершоков позволил Омори сформулировать в 1894 г. закон, носящий его имя [2]. Нелишне упомянуть, что ему тогда было 26 лет.

Закон Омори гласит, что после сильного землетрясения частота афтершоков, т.е. подземных толчков, следующих за главным ударом, в среднем гиперболически уменьшается с течением времени:

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

Здесь $k > 0$, $c > 0$, $t \geq 0$ [2]. Это был первый закон физики землетрясений, если иметь в виду хронологическую последовательность выдающихся открытий в сейсмологии. Вторым, несомненно, следует назвать закон Гуттенберга – Рихтера [3], описывающий распределение землетрясений по магнитудам (см., например, [4–7]). Но мы не будем останавливаться на этом, чтобы не отвлекаться от темы. Краткое описание пяти законов сейсмологии можно найти в статье [8].

Открытие было сделано Омори ровно 123 года тому назад. Это хотя и не круглая, но в определённом смысле

А.В. Гульельми. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская 10, 123995 Москва, Российская Федерация
E-mail: guglielmi@mail.ru

Статья поступила 30 июля 2016 г.,
после доработки 22 декабря 2016 г.

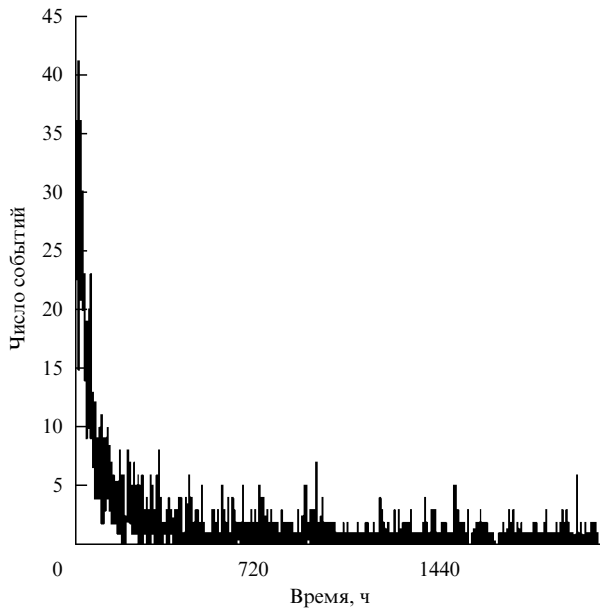


Рис. 1. Зависимость от времени числа афтершоков после главного удара 24.11.1987 в Калифорнии [9].

знаменательная, по-своему красивая дата — ряд один-два-три. Свообразие текущего момента состоит в том, что следующая дата такого рода, которая вновь могла бы послужить формальным поводом вспомнить об открытии, наступит лишь ещё через 1111 лет. Трудно представить, что тогда будет с физикой Земли вообще и с сейсмологией в частности. Поэтому разумно, не откладывая в долгий ящик, воспользоваться случаем и поговорить о законе Омори. Тем более что у нас есть и другая причина обратиться именно теперь к истории, проанализировать сущность закона (1), обсудить отклонения от него и т.д.

Дело обстоит следующим образом. За прошедшие годы накопилось колоссальное количество литературы, посвящённой закону Омори. Частично она отражена в обзоре [10], который был опубликован в связи со 100-летним юбилеем открытия. Выдающееся значение открытия никогда и никем не подвергалось сомнению. Но вместе с тем, и это может показаться странным, до сих пор остаётся не вполне ясным вопрос об интерпретации закона. Более того, в последние годы в геофизическом сообществе наметилось серьёзное разногласие относительно сущности того, что сделал Омори. Одни считают, что Омори всего лишь использовал простую формулу (1) для аппроксимации опытных данных, и предлагают модифицировать её для улучшения аппроксимации. Другие же видят в законе Омори физический смысл и находят аргументы в пользу идеи о том, что именно оригинальная формула, предложенная 123 года тому назад, соответствует представлению о механизме разрушения горных пород в очаге землетрясения. Это разногласие и послужило основным стимулом для написания данной статьи.

Уместно здесь привести типичный пример эволюции афтершоков. На рисунке 1 показана серия афтершоков после главного удара с магнитудой $M = 6,6$, который произошёл 24.11.1987 в 13 ч 15 мин 56 с по мировому времени. Эпицентр главного удара располагался в Южной Калифорнии. Гипоцентр находился на глубине 10 км. В течение 90 сут после главного удара произошло 3553 афтершока в зоне радиусом $0,5^\circ$. Мы видим, что в среднем частота афтершоков монотонно убывает с течением времени. К анализу этого примера мы вернёмся в разделе 5.

2. Степенная аппроксимация эволюции афтершоков

В сейсмологии при анализе наблюдений закон Омори (1) обычно заменяют степенной функцией

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

Показатель степени p , вообще говоря, изменяется от места к месту и от случая к случаю в широких пределах. Например, по наблюдениям в Калифорнии p изменяется от 0,5 до 1,5, причём среднее значение заметно превышает единицу: $p = 1,08$ [11]. Утсу, много сделавший для внедрения в практику сейсмологических исследований выдающегося достижения Омори, предложил называть формулу (2) модифицированным законом Омори [12]. В литературе встречаются также названия "закон Омори-Утсу" и "степенной закон". В отличие от этого формулу (1) обычно называют гиперболическим законом Омори.

Формулу (2) предложил Хирано [13] в 1924 г. для аппроксимации активности афтершоков после Великого землетрясения Канто, которое в 1923 г. разрушило Токио и погубило несколько сотен тысяч человек. Фусакичи Омори узнал о катастрофе, когда находился на конференции в Австралии, и немедленно отбыл на родину. Во время морского путешествия его здоровье резко ухудшилось, и он умер вскоре по возвращении в Токио.

Итак, почти через 30 лет после открытия закона было предложено вместо формулы (1) использовать более гибкую формулу (2) для описания потока афтершоков. Вполне понятны эмпирические соображения, побуждающие сейсмологов широко использовать с тех пор (2) вместо (1). Однако, вероятно, а точнее — несомненно, что Омори не был бы доволен такой заменой. Доказать это невозможно, но давайте вспомним, что Омори был высокообразованным человеком и талантливым естествоиспытателем. Он окончил Токийский университет, после этого посетил научные центры Европы и вскоре стал известным профессором [1]. Предельно наивны и несправедливы слова одного известного сейсмолога о том, что Омори якобы недостаточно хорошо владел методами математической физики. У Омори, безусловно, хватило бы знаний и ума использовать (2) вместо (1) для того, чтобы затем подбирать параметр p отдельно для каждой серии афтершоков. Это очевидно и, более того, вполне подтверждается внимательным чтением оригинальной работы [2]. Но Омори этого не сделал. По нашему мнению, он сознательно выбрал именно гиперболическую зависимость (1), руководствуясь незаурядной физической интуицией. Интересно, что в 1938 г. выдающийся математик и геофизик Гарольд Джеффрис [14] намеревался использовать (2) для аппроксимации потока афтершоков после землетрясения 1927 г. в Танго (Япония) [15]. Джеффрис ввёл параметр $\delta = 1 - p$, однако в конце концов положил $\delta = 0$ без объяснения причин, т.е. просто вернулся к формуле Омори (1). Возможно, этот выбор ему подсказал немалый опыт физико-математического моделирования природных процессов.

Открытие Омори было высоко оценено его соотечественниками. Для интерпретации и популяризации закона Омори больше других сделал Утсу [10, 12, 16, 17]. В своих работах он использовал формулу (2) при $p = \text{const}$. (Заметим, что Хирано, напротив, считал возможным подбирать разные значения p для различных интервалов времени в пределах одной серии афтершоков.) В течение длительного времени Утсу оценивал параметр p почти исключительно по данным о японских землетрясениях.

Впервые оценка $p = 0,9 \pm 0,1$ для землетрясений за пределами Японии была сделана в 1963 г. [18]. После этого началось и продолжается до наших дней весьма широкое исследование афтершоков по методике Утсу. К настоящему времени параметр p измерен во всех сейсмоактивных регионах планеты. По ориентировочной оценке уже сделано не менее 300 тщательных измерений параметра p . И практически во всех случаях p заметно отличается от единицы. Отличие p от единицы зафиксировано не только для естественных, но и для искусственных землетрясений, вызванных химическими [19] и ядерными [20–22] взрывами.

При таких обстоятельствах возникает естественный вопрос: есть ли вообще основания обсуждать гипотезу о том, что гиперболическая зависимость (1) выражает фундаментальный закон, а степенная зависимость (2) представляет собой не более чем подгоночную формулу? Ссылка на авторитет Омори, который явно пренебрёг зависимостью (2), может заставить задуматься, но она, конечно, неубедительна в научном дискурсе, как, впрочем, неубедительна и ссылка на общественное мнение. Но можно подыскать подходящую аналогию в истории науки и провести соответствующие параллели.

Рассмотрим, например, гипотезу Кеплера об эллиптичности планетных траекторий. Гипотеза Кеплера непосредственно связана с законом всемирного тяготения Ньютона. Но форма траектории Меркурия явно отклоняется от эллипса. Тем не менее Лавуазье, исследуя данную проблему, не увидел ни малейшего повода усомниться в фундаментальном законе обратных квадратов. Эта история слишком хорошо известна, чтобы излагать её здесь подробно.

Давайте отбросим скептицизм, который может возникнуть в связи с очевидной несопоставимостью значений для физики законов Ньютона и Омори. Сосредоточим внимание на психологии исследования. Аналогия состоит в том, что в обоих случаях перед исследователем возникла одна и та же дилемма: отказаться от простой и по-своему красивой математической формы фундаментального закона или упорно искать причины, по которым наблюдения не вполне соответствуют ожиданиям. Это радикальный вопрос. Именно с этой точки зрения не исключено, что отказ от формулы (1) для описания потока афтершоков был преждевременным и, возможно, ошибочным.

3. Интерпретация закона Омори

Итак, вскоре после открытия Омори в сейсмологии сложилось и вот уже в течение многих десятилетий бытует мнение о том, что закон (1) является чисто эмпирическим, а если это так, то вполне разумно заменить (1) подгоночной формулой (2). Например, Карен Фельцер говорит со всей определённою: "Закон Омори является эмпирическим. Никто не в состоянии вывести его" [23]. Мы попытаемся убедить читателя, что оба эти суждения ошибочны. Другими словами, вслед за Омори [2] мы предположим, что, вопреки распространённому мнению, гиперболический закон (1) является фундаментальным и, более того, выведем его в рамках простой модели.

Начнём с переформулировки закона [24]. Во-первых, примем как постулат, что закон Омори представляет собой решение дифференциального уравнения, описывающего эволюцию афтершоков. Во-вторых, предположим, что формула (1) является точной в некотором идеальном смысле. Из этих двух предположений следует, что уравнение эволюции имеет вид

$$\frac{dn}{dt} + \sigma n^2 = 0. \quad (3)$$

В самом деле, решение уравнения (3)

$$n(t) = n_0(1 + \sigma n_0 t)^{-1} \quad (4)$$

совпадёт с (1), если положить $\sigma = k^{-1}$ и $n_0 = k/c$.

На первый взгляд уравнение (3) является не более чем другой формой гиперболического закона Омори, но только на первый. Надо принять во внимание, что при моделировании природных явлений эволюционное уравнение во многих случаях интерпретировать легче, чем совокупность его решений. В нашем случае представление закона Омори в виде уравнения (3) открывает интересную возможность дать физическое истолкование последовательности афтершоков, частота которых в среднем монотонно убывает со временем.

Форма уравнения (3) подсказывает нам аналогию между затухающей последовательностью афтершоков и понижением плотности ионосферной плазмы вследствие рекомбинации зарядов противоположных знаков. Напомним, что в ионосфере радиативная рекомбинация пар противоположно заряженных частиц протекает по следующей схеме:



Здесь O_2 — молекула кислорода, O_2^+ — ион кислорода, e^- — электрон, $\hbar\omega$ — фотон (см., например, [25]). Пара зарядов исчезает в результате рекомбинации, и возникают нейтральная молекула и фотон. Пусть n_+ (n_-) — плотность положительных (отрицательных) зарядов, $n = (n_+ + n_-)/2$. Тогда уравнение рекомбинации принимает вид

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma n_+ n_- \quad (6)$$

и практически полностью совпадает с (3) ввиду квазинейтральности плазмы ($n_+ \approx n_-$). Здесь σ — коэффициент рекомбинации.

Попытаемся углубить подмеченную нами формальную аналогию, для того чтобы интерпретировать закон Омори (1), т.е. перевести его на содержательный язык механики землетрясений. Для этого в земной коре надо найти "пару", подобную паре противоположно заряженных частиц в ионосфере. Наша гипотеза состоит в следующем: нет ничего более естественного, чем рассмотреть пару смежных бортов тектонического разлома в качестве подходящего объекта такого рода [26]. (Напомним, что землетрясение обычно возникает в результате быстрой подвижки горных пород вдоль разлома в земной коре [5, 6].)

Пусть символ $\uparrow\downarrow$ обозначает разлом, к бортам которого приложены касательные напряжения. Такой разлом будем называть активным. Пассивный разлом (без касательных напряжений) обозначим символом \parallel . Существует определённая вероятность того, что вдоль активного разлома произойдёт разрушение и возникнет землетрясение. По аналогии с реакцией (5) мы представим это символически:



Пусть n — количество активных разломов в эпицентральной зоне главного удара. По аналогии с уравнением рекомбинации (6) запишем:

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma n_1 n_1. \quad (8)$$

Отсюда сразу следует уравнение (3), поскольку вполне очевидно, что $n_1 = n_1$. Величину σ естественно назвать коэффициентом деактивации. Обратим внимание на то, что и рекомбинация электрических зарядов в ионосфере, и деактивация смежных бортов разлома в литосфере при-

водят к уравнению эволюции с квадратичной нелинейностью, решения которого гиперболически зависят от времени.

Итак, параметр Джеффриса $\delta = 0$ в силу того, что тектонический разрыв представляет собой двустороннюю поверхность. В этом смысле зависимость (1) является фундаментальной. Другими словами, с нашей точки зрения, гиперболичность потока афтершоков связана с парностью смежных бортов разлома, подобно тому как обратная квадратичность закона всемирного тяготения обусловлена трёхмерностью пространства [27, 28]. Аналогию мы видим в том, что оба указанных свойства являются топологическими.

4. Обобщённый закон эволюции афтершоков

Быть может, не стоило бы даже упоминать о том, что наши рассуждения неполны и мы построили всего лишь "игрушечную" модель (toy model) потока афтершоков. Модели такого рода часто используются на определённом этапе исследования в теоретической физике и астрофизике как своего рода паллиативы. И всё же, если считать гиперболическую зависимость (1) фундаментальным законом, а соотношение (2) — аппроксимирующей функцией, то как объяснить, что на опыте подгоночный параметр p заметно отклоняется от единицы? Оказывается, что наша модель (3) достаточно "жизнеспособна" для того, чтобы в её рамках можно было найти подход к решению этой проблемы. Повидимому, дело здесь в следующем. После главного удара в очаге землетрясения начинаются процессы релаксации. Образно говоря, очаг постепенно остывает. Многие тут ещё предстоит выяснить, но, так или иначе, афтершоки возникают в явно нестационарной геологической среде. В нашей гипотетической и предельно упрощённой модели (3) мы можем учесть нестационарность горных пород только одним способом. А именно, параметр σ , который мы до сих пор считали постоянным, следует заменить функцией $\sigma(t)$. Тогда вместо (4) мы получим следующее решение уравнения афтершоков:

$$n(t) = n_0 \left[1 + n_0 \int_0^t \sigma(t') dt' \right]^{-1}. \quad (9)$$

Обобщённый закон эволюции афтершоков (9) выведен нами в результате гипотетических, но правдоподобных рассуждений. В их основе лежит представление о деактивации смежных бортов тектонических разломов. Деактивация происходит либо вынужденно под воздействием внешних импульсов, либо спонтанно под воздействием внутренних флуктуаций. После сильного землетрясения система тектонических разломов в объёме очага претерпевает сложный процесс релаксации, одним из проявлений которого является затухающая последовательность афтершоков. Феноменологически эволюция афтершоков описывается нелинейным дифференциальным уравнением (3). Наблюдаемое отклонение затухания от строго гиперболического закона (1) объясняется нестационарностью геологической среды в объёме очага. В стационарной среде $\sigma = \text{const}$, и в этом идеальном случае (9) совпадает с (1).

5. Уравнение афтершоков в действии

Уравнение (3) даёт возможность на экспериментальной основе изучать процессы релаксации в очаге землетрясения, остывающем после главного удара. Здесь открываются интересные перспективы. Для конкретности поставим задачу об измерении на опыте коэффициента деактивации $\sigma(t)$ [9]. Введём вспомогательную функцию $g(t) =$

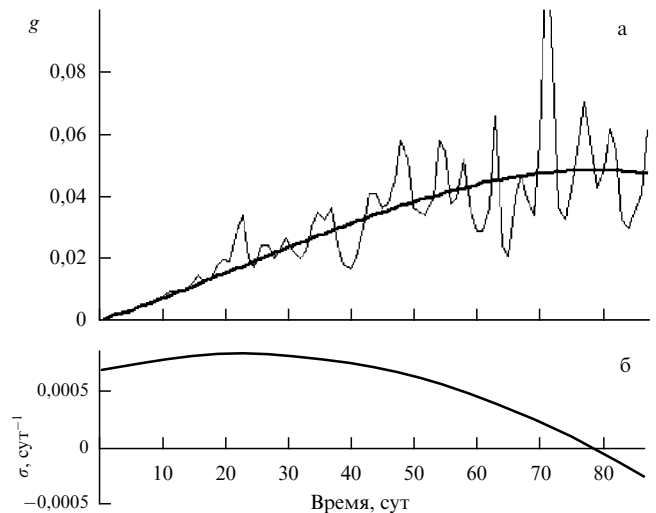


Рис. 2. Результат анализа афтершоков, показанных на рис. 1. (а) Зависимость от времени функции $g(t)$ до и после сглаживания (серая и чёрная линии соответственно). (б) Зависимость от времени коэффициента деактивации $\sigma(t)$.

$= \int_0^t \sigma(t') dt'$. Из решения (9) уравнения (3) следует, что

$$g(t) = \frac{1}{n(t)} - \frac{1}{n_0}. \quad (10)$$

С помощью (10) можно вычислить $g(t)$ по данным наблюдения $n(t)$, затем провести гладкую аппроксимацию и, наконец, вычислить σ по формуле $\sigma = dg/dt$.

Применим эту процедуру к серии афтершоков, представленной на рис. 1. На рисунке 2 показаны величины g и σ как функции времени. Мы видим, что квазистационарность очага в среднем сохраняется на протяжении примерно 45 сут после главного удара. На этом отрезке времени (естественно назвать его эпохой Омори) мы имеем приблизительно $\sigma \approx 7,8 \times 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$ или $k = 1/\sigma \approx 1300 \text{ сут}$. После этого σ начинает уменьшаться и убывает до нуля, в то время как флуктуации g быстро возрастают (см. серую линию на рис. 2).

Рассмотрим ещё одно событие, показанное на рис. 3. Оно интересно тем, что представляет собой дублет главных ударов. Первый удар произошёл 23.04.1992 в 04 ч 50 мин 23 с (магнитуда $M = 6,1$, глубина гипоцентра 12 км), а второй — 28.06.1992 в 11 ч 57 мин 34 с (магнитуда $M = 7,3$, глубина гипоцентра 1 км). Эпицентры главных ударов располагались примерно в 30 км один от другого. Соответствующие функции $g(t)$ и $\sigma(t)$ показаны на рис. 4.

Итак, уравнение (3) и его решение (9) дают нам возможность по-новому подойти к обработке данных об афтершоках, а результат обработки указывает на интересную перспективу ввести в сейсмологию новый методический приём, а именно классификацию очагов землетрясений по виду релаксации потока афтершоков. Например, рис. 2 и 4 демонстрируют два существенные различных вида релаксации. Если отвлечься от деталей, то в первом событии наблюдается убывающая функция $\sigma(t)$, а во втором — две возрастающих функции $\sigma(t)$. Мы предполагаем, что в дальнейшем анализ функций $\sigma(t)$ даст возможность провести более тонкую классификацию и обнаружить связь между видом релаксации и геологической структурой очага.

6. Обсуждение

Закон Омори (1) мы представили в виде дифференциального уравнения (3) и рассмотрели правдоподобную интерпрета-

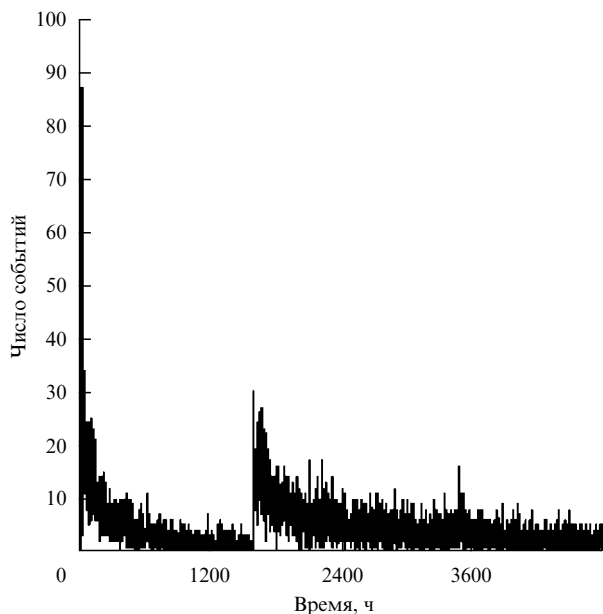


Рис. 3. Зависимость от времени числа афтершоков после двух главных ударов с магнитудами $M = 6,1$ и $M = 7,3$, произошедших соответственно 23.04.1992 и 28.06.1992 в Южной Калифорнии [9].

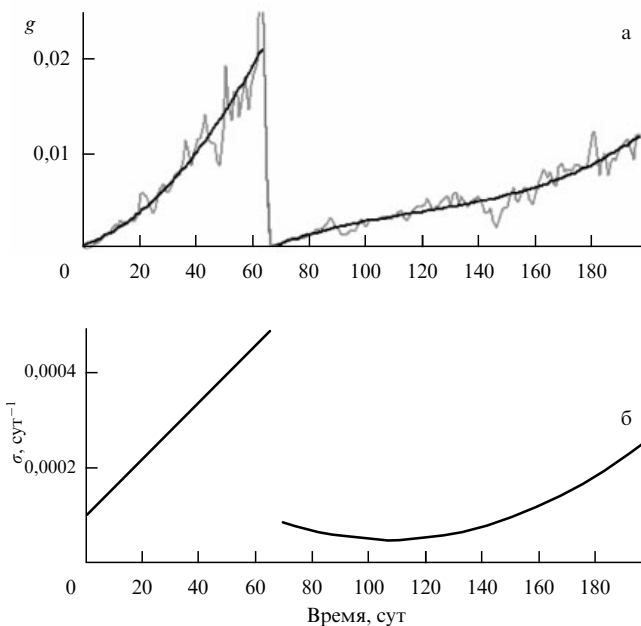


Рис. 4. Результат анализа афтершоков, показанных на рис. 3. (а) Зависимость от времени функции $g(t)$ до и после сглаживания (серая и чёрная линии соответственно). (б) Зависимость коэффициента деактивации $\sigma(t)$ от времени.

цию. В основе этой интерпретации лежит представление о деактивации смежных бортов разломов в окрестности главного удара землетрясения. Идея деактивации возникла из формального совпадения уравнения афтершоков (3) с уравнением радиативной рекомбинации в ионосферной плазме (6). И мы осторожно, со всеми необходимыми оговорками, провели аналогию между средним временем ожидания рекомбинации пары зарядов с противоположными знаками в ионосфере и средним временем ожидания разрушения горных пород между парой смежных бортов разлома в литосфере. Вполне понятно, что наши рассуждения неполны. Они пока что не приблизили нас к глубокому

пониманию механизма землетрясений. Кроме того, не исключено, что мы имеем дело просто с совпадением, и тогда уравнение (3) придётся рассматривать всего лишь как эквивалентную форму записи закона Омори (1). Но даже в этом случае уравнение (3) принесло пользу — оно подсказало нам форму обобщённого закона эволюции афтершоков (9).

Уравнение (3) может послужить основой и для других обобщений. В самом деле, если учесть в нём диффузионный член, т.е. представить его в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\sigma n^2 + D\nabla^2 n, \quad (11)$$

то сразу напрашивается переход к известному в математике и биологии уравнению Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова (ФКПП) [29, 30]. Так мы можем расширить наши возможности при поиске феноменологических моделей распределения афтершоков во времени и пространстве. Но мы ещё далеки от цели, хотя бы потому, что уравнение ФКПП не учитывает анизотропию геологической среды в очаге, буквально изрезанном разломами, причём в системе разломов резко выделяется доминирующий разлом, вдоль которого произошёл магистральный разрыв при главном ударе.

В дополнение к проблеме пространственно-временного распределения афтершоков, имеющей локальный или, лучше сказать, региональный характер, существует ещё и проблема глобальности. Последняя связана со сферичностью Земли и с её резонансными свойствами как целого. Проблема состоит в интерпретации скрытых периодичностей, обнаруженных недавно сотрудниками Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в затухающих потоках афтершоков [31–34] (см. также обзор [7]).

Во-первых, была выявлена модуляция активности афтершоков сфероидальными колебаниями Земли ${}_0S_2$. (Напомним, что период колебаний ${}_0S_2$ равен 54 мин [35].)

Во-вторых, обнаружено кумулятивное воздействие на очаг землетрясения кругосветного сейсмического эха, т.е. возбуждённых главным ударом поверхностных упругих волн, совершивших полный оборот вокруг Земли за время, равное примерно 3 ч.

Особенно чётко эффект модуляции и эффект кругосветного эха проявились после сильнейших землетрясений XXI века: Суматра-Андаманского землетрясения (2004 г., $M = 9$) и землетрясения Тохоку (2011 г., $M = 9$) [33]. Оба эффекта нарушают монотонное понижение активности афтершоков с течением времени. Поэтому они не описываются ни законом Омори (1), ни степенным законом (2). Но их вполне можно описать с помощью закона эволюции (9) по методике, изложенной в разделе 5.

Заканчивая обсуждение, нельзя не сказать, что в данной статье, посвящённой главным образом закону Омори (1), мы не ставили своей задачей провести анализ всего богатого разнообразия математических моделей, которые были предложены для описания потока афтершоков. За пределами нашего внимания осталась, например, компанд-модель, в которой зависимость частоты афтершоков от времени изменяется от линейной к степенной, а затем и к экспоненциальной зависимости [36]. И мы не рассмотрели целый ряд интересных моделей, в основе которых лежат представления о самоорганизованной критичности [37, 38]. Указанные здесь ссылки лишь частично восполняют этот пробел.

7. Заключение

Итак, в конце XIX в. в Японии произошло зарождение современной сейсмологии, благодаря тому что в то время

и в том месте чудесным образом объединились насыщенная потребность общества, поддержка государства и человеческий гений. Мы вспомнили предысторию и рассказали историю открытия закона Омори, обсудили современную проблематику и нам теперь осталось только попытаться заглянуть в будущее.

Ближайшие перспективы исследования афтершоков более или менее ясны. Скорее всего, будет произведена классификация очагов сильных землетрясений по типу затухания частоты афтершоков. Изучение скрытых периодичностей в потоке афтершоков уже и теперь продвинулось достаточно далеко, но многое предстоит ещё сделать. Например, интересно будет критически проанализировать методы оценки диссипативных свойств земных недр по данным о добротности свободных колебаний Земли в связи с тем, что часть энергии свободных колебаний, возбуждённых главным ударом, затрачивается на активизацию афтершоков, которые в свою очередь в принципе могут служить импульсными источниками свободных колебаний. Этот канал перекачки энергии до сих пор не принимался во внимание. Поиск феноменологических моделей пространственно-временного распределения афтершоков также будет привлекать внимание исследователей.

Что касается отдалённых перспектив, то они довольно туманны. Но один нерешённый вопрос, связанный с общей теорией разрушения твёрдых тел, ещё долго будет вызывать повышенный интерес. Речь идёт о теоретической оценке коэффициента деактивации σ (или коэффициента k в оригинальной формулировке (1) закона Омори).

Автор благодарен А.Л. Калишер за обсуждения. Работа поддержана программой 15 Президиума РАН и Российским фондом фундаментальных исследований (проект 15-05-00491).

Список литературы

1. Davison Ch *The Founders of Seismology* (Cambridge: The Univ. Press, 1930)
2. Omori F J. *College Sci. Imperial Univ. Tokyo* **7** 111 (1894)
3. Gutenberg B, Richter C F *Bull. Seismol. Soc. Am.* **34** 185 (1944)
4. Richter C F *Elementary Seismology* (San Francisco: W.H. Freeman, 1958); Пер. на русск. яз.: Рихтер Ч Ф *Элементарная сейсмология* (М.: ИЛ, 1963)
5. Bolt В А *Earthquakes* (San Francisco: W.H. Freeman, 1978); Пер. на русск. яз.: Болт В *Землетрясения* (М.: Мир, 1981)
6. Kasahara K *Earthquake Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981); Пер. на русск. яз.: Касахара К *Механика землетрясений* (М.: Мир, 1985)
7. Гульельми А В *УФН* **185** 415 (2015); Guglielmi A V *Phys. Usp.* **58** 397 (2015)
8. Costa L S et al. *Europhys. Lett.* **114** 59002 (2016)

9. Guglielmi A V, Zotov O D, in *11th Intern. Conf. and School "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Russia, October 3–7, 2016, Book of Abstracts* (St. Petersburg: St. Petersburg State Univ., 2016) Sect. S, p. 210; <http://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/>
10. Utsu T et al. *J. Phys. Earth* **43** 1 (1995)
11. Reasenberg P A, Jones L M *Science* **243** 1173 (1989)
12. Utsu T *Geophys. Mag.* **30** 521 (1961)
13. Hirano R *Kishoshushi* **2** 77 (1924)
14. Jeffreys H *Gerlands Beitr. Geophys.* **56** 111 (1938)
15. Nasu N *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo* **6** 245 (1929)
16. Utsu T *Zisin 2 J. Seismol. Soc. Jpn.* **10** 35 (1957)
17. Utsu T *Bull. Seismol. Soc. Am.* **52** 279 (1962)
18. Adams R D, Le Fort J H *New Zealand J. Geol. Geophys.* **6** 87 (1963)
19. Iio Y *Zisin 2 J. Seismol. Soc. Jpn.* **37** 109 (1984)
20. Ryall A, Savage W U J. *Geophys. Res.* **74** 4281 (1969)
21. Спивак А А *Геоэкология* (6) 27 (1996)
22. Кочарян Г Г, Спивак А А *Динамика деформирования блочных массивов горных пород* (М.: Академкнига, 2003)
23. Felzer K R "The wonderful world of aftershocks", SeismoLab Seminar, January (Pasadena: CalTech, 2007); <http://pasadena.wr.usgs.gov/office/kfelzer/SeisLabTalk.pdf>
24. Guglielmi A V, arXiv:1604.07017
25. Гинзбург В Л *Распространение электромагнитных волн в плазме* (М.: Физматгиз, 1960); Пер. на англ. яз.: Ginzburg V L *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas* (Oxford: Pergamon Press, 1964)
26. Гульельми А В *Физика Земли* (5) 165 (2016); Guglielmi A V *Izv. Phys. Solid Earth* **52** 785 (2016)
27. Ehrenfest P *Proc. Acad. Sci. Amsterdam* **20** 200 (1918)
28. Горелик Г Е *Почему пространство трехмерно?* (М.: Наука, 1982)
29. Fisher R A *Ann. Eugenics* **7** 355 (1937)
30. Колмогоров А Н, Петровский И Г, Пискунов Н С *Бюлл. МГУ. Сер. А. Матем. и мех.* **1** (6) 1 (1937); в кн. Колмогоров А Н *Избранные труды. Математика и механика* (Отв. ред. С М Никольский) (М.: Наука, 1985) p. 221; Пер. на англ. яз.: Kolmogorov A N, Petrovsky I G, Piskunov N S, in Kolmogorov A N *Selected Works* Vol. 1 (Ed. V M Tikhomirov) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1991) p. 242
31. Guglielmi A, Zotov O, arXiv:1207.0365
32. Гульельми А В, Зотов О Д *Физика Земли* (1) 3 (2013); Guglielmi A V, Zotov O D *Izv. Phys. Solid Earth* **49** 1 (2013)
33. Гульельми А В, Зотов О Д, Завьялов А Д *Физика Земли* (1) 66 (2014); Guglielmi A V, Zotov O D, Zavyalov A D *Izv. Phys. Solid Earth* **50** 64 (2014)
34. Гульельми А В *Физика Земли* (6) 127 (2015); Guglielmi A V *Izv. Phys. Solid Earth* **51** 920 (2015)
35. Жарков В Н *Физика земных недр* (М.: Наука и образование, 2012)
36. Narreau C et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** 22 (2003)
37. Bak P *How Nature Works: The Science of Self-organized Criticality* (New York: Springer-Verlag, 1999); Пер. на русск. яз.: Бак П *Как работает природа: теория самоорганизованной критичности* (М.: УРСС, 2013)
38. Макаров П В *Физическая мезомеханика* **13** (5) 97 (2010); Makarov P V *Phys. Mesomech.* **13** 292 (2010)

Omori's law: a note on the history of geophysics

A.V. Guglielmi. *Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya 10, 123995 Moscow, Russian Federation. E-mail: guglielmi@mail.ru*

In the late nineteenth century, the Japanese seismologist Omori discovered the first law of earthquake physics, which states that the rate of aftershocks decreases hyperbolically with time. Over the years since then, there has been a vast literature on this law, and the significance of its discovery has been universally recognized. There is, however, profound division of opinion as to the interpretation of the law. Some argue that Omori just proposed a simple data-fitting formula and replace this formula by a power law one with a negative fractional exponent, whereas for others, the Omori law makes physical sense. The paper describes history and essence of Omori's discovery, with special attention paid to interpretational questions. It is shown that Omori's original formulation of the law quite correlates with the current understanding of the rock destruction mechanism at the earthquake focus.

Keywords: seismology, earthquake, aftershock, tectonic fault, recombination, relaxation

PACS number: **91.30.-f**

Bibliography — 38 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (3) 343–348 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.01.038039>

Received 30 July 2016, revised 22 December 2016

Physics – Uspekhi **60** (3) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.01.038039>