

Министерство науки и высшего образования РФ
Российский фонд фундаментальных исследований

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ

Материалы V Международной конференции
(г. Москва, 4–7 июня 2019 г.)

Под редакцией
академика РАН В. В. Адушкина
и профессора Г. Г. Кочаряна



ТОРУС ПРЕСС
Москва
2019

УДК 550.34; 550.37; 551.24; 533.95 + 537.87; 622.834
ББК 26.21
Т 67

Т 67 Триггерные эффекты в геосистемах: материалы V Международной конференции / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. 456 с.
ISBN 978-5-94588-268-3

V Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» состоялась 4–7 июня 2019 г., была организована и проведена ИДГ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ и РФФИ (проект № 19-05-20008).

В конференции приняли участие свыше 250 ученых и специалистов из более чем 70 организаций, включая 42 института РАН (ИДГ РАН, ИВТАН, ИФЗ РАН, ГИН РАН, ИГЕМ РАН, ИПКОН, ИЗК СО РАН, ЛФТИ РАН и др.), 10 ВУЗов (МГУ, МФТИ, НИТУ МИСИС и др.) и других российских и зарубежных организаций. Зарубежные участники были представлены специалистами из Греции, республики Вьетнам, Республики Казахстан, Китайской народной республики, Республики Кыргызстан, Норвегии.

Труды конференции публикуются в двух сборниках. Часть докладов, тексты которых были представлены на английском языке, будут опубликованы в издательстве Springer в серии книг «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». Та часть докладов, тексты которых представлены на русском языке, публикуются в настоящем сборнике.

Конференция сформулировала перспективные научные проблемы ближайшего десятилетия по рассматриваемой тематике.

ISBN 978-5-94588-268-3

ББК 26.21

Издание осуществляется при поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ
и Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 19-05-20008)

Издание РФФИ продаже не подлежит

© ИДГ РАН, 2019
© Авторы, 2019
© ТОРУС ПРЕСС, 2019

АТЛАС АФТЕРШОКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. В. Гульельми, А. Д. Завьялов, О. Д. Зотов

ИФЗ РАН

Введено представление о переменном во времени коэффициенте деактивации очага после главного удара землетрясения. Предложено уравнение эволюции частоты афтершоков. Тем самым указана интересная возможность естественным образом учесть экзогенные и эндогенные триггеры, воздействующие на очаг. Поставлена и решена обратная задача физики очага. Предложен проект создания Атласа афтершоков на базе решения обратной задачи. Обнаружено существование продолжительных (до 100 дней) эпох Омори, во время которых коэффициент деактивации не изменяется и строго выполняется гиперболический закон Омори. Выдвинута гипотеза о принципе гиперболичности в физике афтершоков.

Введение

После главного удара на очаг землетрясения воздействуют экзогенные и эндогенные триггеры. К экзогенным триггерам относятся внешние воздействия, такие как приливные деформации и напряжения, сейсмические волны, возбужденные вдали от очага, антропогенные воздействия, а также, возможно, геомагнитные бури и ультранизкочастотные электромагнитные колебания магнитосферы Земли. В отличие от экзогенных, эндогенные триггеры зарождаются в самом очаге произошедшего землетрясения. Прежде всего, следует указать на нестационарную мозаику деформаций и напряжений, возникающих в геологической среде после образования магистрального разрыва сплошности. Далее главный удар порождает круговую поверхностную волну, огибающую Землю и порождающую явление кругосветного сейсмического эха. Волновой импульс и энергия эха концентрируются в очаговой зоне произошедшего землетрясения. Это индуцирует повторные толчки. Наконец, главный удар возбуждает свободные колебания Земли, которые периодически модулируют активность афтершоков. Триггерные эффекты кругосветного эха и сфероидальных колебаний Земли нам удалось обнаружить путем анализа каталогов землетрясений методом синхронного детектирования [Гульельми и др., 2014; Зотов и др., 2018].

Воздействие триггеров приводит к тому, что геологическая среда в очаге становится нестационарной. Но мы не можем сделать зависящим от времени параметр очага k в известной формуле Омори

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

моделирующей эволюцию частоты афтершоков n [Omori, 1894]. Это противоречило бы математической орфографии. Вместо этого мы предлагаем использовать уравнение

$$\int_0^t \sigma(t') dt' = g(t) \quad (1)$$

для описания потока афтершоков с учетом нестационарности геологической среды [Гульельми, 2017; Гульельми, Завьялов, 2018; Guglielmi et al., 2018]. Здесь введено обозначение $g(t) = [n_0 n(t)]^{-1} [n_0 - n(t)]$. Величину σ мы называем коэффициентом деактивации очага. Это важнейшая интегральная характеристика очага, «остывающего» после главного удара. Величина σ указывает нам, в каком темпе очаг теряет свою способность возбуждать афтершоки.

Если пренебречь нестационарностью горных пород и воздействием на очаг триггеров, то $\sigma = const$. В этом и только в этом случае наша версия закона эволюции афтершоков совпадает с законом Омори с точностью до обозначений, а именно: следует положить $\sigma = 1/k$, $n_0 = k/c$. В общем же случае $\sigma = \sigma(t)$ и надо использовать нашу формулу (1), а отнюдь не классическую формулу Омори.

Формула (1) позволяет поставить обратную задачу очага и дает нам возможность наметить программу создания Атласа афтершоков на базе решения обратной задачи.

Обратная задача

Вспомогательная функция $g(t)$ известна из эксперимента, а уравнение (1) напоминает интегральное уравнение Вольтерры первого рода. Эти два обстоятельства подсказали постановку и путь решения обратной задачи физики очага. Сущность обратной задачи состоит в отыскании неизвестной функции $\sigma(t)$ по известной функции $n(t)$ [Гульельми, 2017; Гульельми, Завьялов, 2018; Guglielmi et al., 2018]. Задача оказывается некорректной, но регуляризация сводится просто к тому, что мы производим сглаживание вспомогательной функции $g(t)$. После регуляризации решение имеет вид:

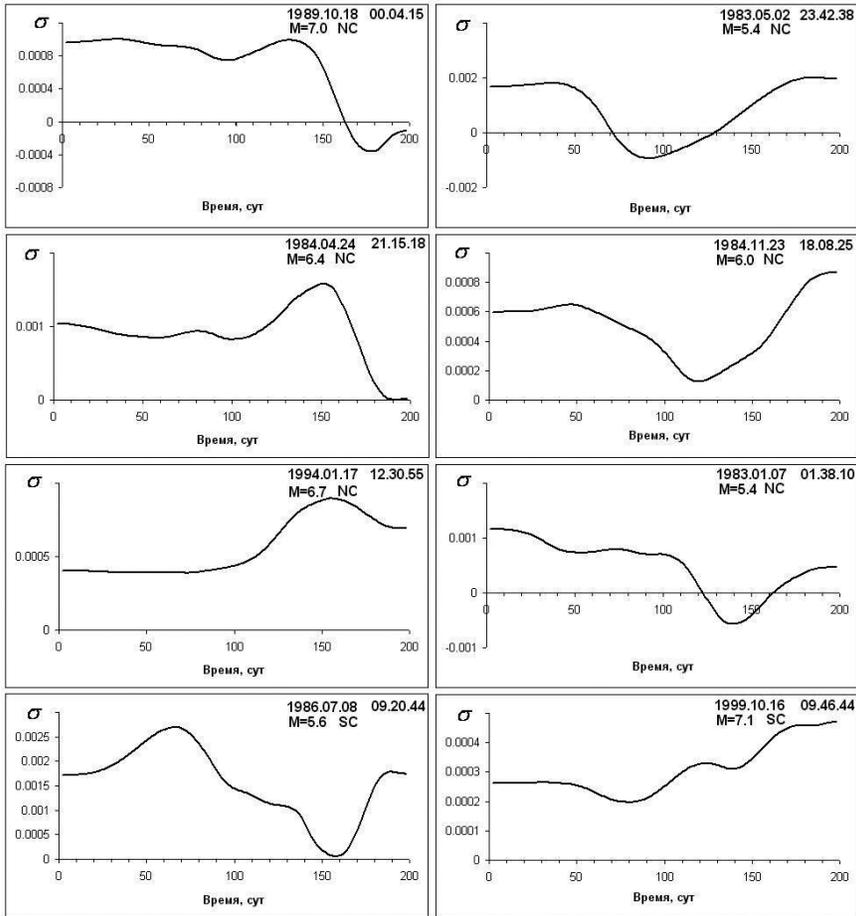
$$\sigma = \frac{d\langle g \rangle}{dt}.$$

Здесь угловые скобки обозначают сглаживание.

Решая обратную задачу для ряда землетрясений, мы обратили внимание на интересное свойство эволюции афтершоков, а именно: во многих случаях эволюция протекает таким образом, что в определенных интервалах времени коэффициент деактивации остается почти постоянным. Такой интервал естественно называть эпохой Омори. Нами замечена некоторая тенденция к увеличению продолжительности эпохи Омори с ростом магнитуды главного удара.

Атлас афтершоков

В работе [Guglielmi et al., 2018] было выдвинуто предложение создать Атлас афтершоков на базе решения обратной задачи физики очага. Мы рассматриваем создание Атласа как коллективный проект и приглашаем заинтересованных сейсмологов присоединиться к нему. Обработка афтершоков по предлагаемой методике не сложнее, чем по методике Омори или Утсу (см., например, [Utsu, 1961]). По нашему замыслу каждый лист Атласа будет содержать информацию о месте, времени, магнитуде главного удара, графики изменения коэффициента деактивации $\sigma(t)$ и другие полезные сведения. Предполагается, что анализ информации, накопленной в Атласе, позволит глубже понять геодинамические процессы в очаге после главного удара землетрясения.



Многообразие форм эволюции коэффициента деактивации очага. В правом верхнем углу каждой панели указаны год, месяц и день основного толчка, время его возникновения (по Гринвичу), магнитуда и каталог (NC — Северная Калифорния, SC — Южная Калифорния)

В настоящее время обработано два десятка событий. При этом использовались региональные каталоги землетрясений Северной Калифорнии с 1968 по 2007 гг. (www.ncedc.org) и Южной Калифорнии с 1983 по 2008 гг. (<https://www.sccec.org>).

На рисунке показаны фрагменты Атласа афтершоков. Здесь представлены функции деактивации половины обработанных нами событий. Мы видим, что коэффициент деактивации очага претерпевает довольно сложную эволюцию. Отметим, что отрицательные значения коэффициента деактивации, наблюдающиеся в некоторых случаях, можно интерпретировать как периоды активизации очаговой зоны произошедшего землетрясения. Во многих случаях наблюдается довольно продолжительная эпоха Омори, когда $\sigma = const$. По совокупности 20 событий медианная продолжительность эпохи Омори равна 30 дням, а нижний и верхний квартили равны 20 и 45 дням соответственно. Наибольшая продолжительность, наблюдавшаяся нами, составляет около 100 дней.

Обсуждение и выводы

Уравнение эволюции (1) дает нам возможность ввести в сейсмологию новый методический прием обработки афтершоков. Мы надеемся, что анализ информации, которая будет накоплена в Атласе, даст интересные результаты. Пока что обработка 20 событий выявила интересное свойство: в потоке афтершоков нередко появляются довольно продолжительные эпохи Омори. Не подсказывает ли нам это обстоятельство, что в физике афтершоков выполняется фундаментальный принцип гиперболичности, подобно тому, как в общей физике строго выполняется, например, принцип позиционной инвариантности? И не связано ли отклонение от гиперболического затухания активности афтершоков с нестационарностью горных пород после образования магистрального разрыва и с воздействием на очаг многочисленных триггеров?

Безусловно, наша гипотеза требует тщательной проработки, и мы надеемся, что такая проверка будет сделана в ходе составления Атласа. В сущности, принцип гиперболичности, на который косвенно указывает опыт, лежит в основе составления Атласа, как это видно из структуры формулы (1). При этом мы вполне понимаем, и хотим особо это подчеркнуть, что сам по себе принцип не объясняет механизм возникновения афтершоков, который еще должен быть найден.

Итак, мы представили уравнение эволюции афтершоков и ввели понятие о переменном во времени коэффициенте деактивации очага землетрясения. Уравнение афтершоков дало нам возможность поставить обратную задачу физики очага. На базе решения обратной задачи мы анонсировали проект создания Атласа афтершоков.

Выражаем глубокую благодарность Б. И. Клайну и А. С. Потапову за интерес к данной работе и обсуждение проблемы афтершоков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 12 Президиума РАН и РФФИ (проект № 18-05-00096), а также программ государственных заданий Института физики Земли РАН.

Литература

Гульельми А. В. Закон Омори (из истории геофизики) // УФН, 2017. Т. 187. № 3. С. 343–348.

Гульельми А. В., Завьялов А. Д. Закон Омори: к 150-летию юбилею Фусакичи Омори // Вулканология и сейсмология, 2018. № 5. С. 67–72.

Гульельми А. В., Зотов О. Д., Завьялов А. Д. Динамика афтершоков Суматра-Андаманского землетрясения // Физика Земли, 2014. № 1. С. 66–74.

Зотов О. Д., Завьялов А. Д., Гульельми А. В., Лавров И. П. О возможном эффекте кругосветных поверхностных сейсмических волн в динамике повторных толчков сильных землетрясений // Физика Земли, 2018. № 1. С. 187–201.

Guglielmi A. V., Zotov O. D., Zavyalov A. D. Aftershocks atlas: To the 150th anniversary of Fusakichi Omori // 12th Conference (International) and School “Problems of Geocosmos” Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2018. P. 121.

Omori F. On the aftershocks of earthquake // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, 1894. Vol. 7. P. 111–200.

Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophys. Mag., 1961. Vol. 30. P. 521–605.