

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф

А.В. Гульельми

Общие идеи и конкретные результаты теории катастроф и теории критических явлений использованы для анализа сильных землетрясений. Основное внимание уделено резкому возрастанию флуктуаций, повышению реактивности динамических систем в околороговой области и другим аномальным явлениям, родственными критической опалесценции. При отсутствии достаточно полной теории землетрясений такой подход к анализу наблюдений представляется вполне оправданным. В результате удалось обнаружить ряд нетривиальных свойств очага сильного землетрясения до и после образования магистрального разрыва сплошности горных пород при главном ударе. В ходе анализа форшоков и афтершоков введены представления о кругосветном сейсмическом эхе, кумулятивном воздействии на очаг сходящихся поверхностных волн и модуляции глобальной сейсмичности свободными колебаниями Земли. Интересным и перспективным представляется дальнейшее исследование в этом направлении.

Ключевые слова: землетрясение, критические явления, бифуркация, поверхностные волны, сфероидальные колебания, кумулятивный эффект, модуляция сейсмичности

PACS numbers: 91.30. – f, 91.30.Px

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201504f.0415

Содержание

1. Введение (415).
 2. Форшоки (418).
 - 2.1. Активизация форшоков за три часа до главного удара.
 - 2.2. Критическое замедление.
 - 2.3. Кругосветное сейсмическое эхо.
 3. Кумулятивный эффект сходящихся поверхностных волн (421).
 - 3.1. О сходящихся волнах.
 - 3.2. Антиподный эффект на Земле.
 - 3.3. Сопоставление с антиподным эффектом на Луне и Меркурии.
 4. Афтершоки (422).
 - 4.1. Анализ сильнейших землетрясений.
 - 4.2. Статистический анализ.
 5. Модуляция сейсмичности сфероидальными колебаниями Земли (424).
 - 5.1. Анализ сильнейших землетрясений.
 - 5.2. Статистический анализ.
 6. Обсуждение (427).
 7. Заключение (428).
- Список литературы (428).

1. Введение

Твёрдую оболочку Земли (литосферу) иногда сотрясают резкие толчки — землетрясения [1]. Сильное землетрясе-

ние называют главным толчком (mainshock) или главным ударом, если за ним следуют землетрясения меньшей силы, называемые афтершоками (aftershocks). Довольно часто, хотя и не всегда, главному удару предшествуют форшоки (foreshocks). Эту классическую триаду, а именно форшоки – главный удар – афтершоки, мы рассмотрим с точки зрения теории катастроф, но предварительно сделаем ряд необходимых пояснений.

Иногда в более или менее компактной группе подземных толчков трудно выделить главный удар. В сейсмологии такую группу называют роем землетрясений. И хотя нет никаких сомнений в том, что рой также можно продуктивно анализировать с общих позиций теории критических явлений и теории катастроф, в данной статье мы сосредоточим внимание на указанной выше классической триаде.

Силу землетрясения принято характеризовать магнитудой M [2]. Величина M связана с энергией E сейсмических волн, которые возбуждаются при образовании разрыва сплошности горных пород в очаге землетрясения, следующим образом:

$$\lg E = \alpha + \beta M. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = 11,8$, $\beta = 1,5$ и энергия E выражена в эргах [3]. По определению, магнитуда главного удара превышает магнитуды форшоков и афтершоков. За исключением этого, соотношения между магнитудами землетрясений в классической триаде изменяются от случая к случаю в широких пределах. По наблюдениям, форшоки обычно слабее афтершоков. Было замечено также, что максимальная магнитуда афтершоков в среднем меньше

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

Статья поступила 23 мая 2014 г.

магнитуды главного удара на величину $\Delta M \sim 1$ [4]. Это означает, что энергия наиболее сильного афтершока примерно в 30 раз меньше энергии главного удара.

Распределение землетрясений по магнитудам подчиняется закону Гутенберга–Рихтера [5]

$$\lg N = a - bM. \quad (2)$$

Здесь N — среднее количество землетрясений с магнитудой, равной или большей M , в том или ином сейсмоактивном регионе за определённый промежуток времени (обычно за год). Приведём для справки типичные значения параметров распределения: $a = 5$, $b = 1$. Любопытно, что в случае форшоков значение b в полтора-два раза меньше типичного. Это даёт основание рассматривать заметное понижение b с течением времени в каком-либо регионе как один из прогностических признаков сильного землетрясения, которое вскоре здесь произойдёт [6, 7].

Возникает вопрос: можно ли, если известна величина M , уверенно сказать, является ли землетрясение сильным в смысле, указанном выше, т.е. будет ли оно сопровождаться афтершоками, или нет? Вообще говоря, ответ отрицателен. Например, землетрясение с магнитудой $M = 7,2$, которое является сильным в широком смысле слова, было всего лишь афтершоком землетрясения с магнитудой $M = 9$, которое произошло у берегов Суматры 26 декабря 2004 г. [8]. Ещё более сильный афтершок ($M = 7,9$) наблюдался после землетрясения с магнитудой $M = 9$ у восточного побережья острова Хонсю 11 марта 2011 г. [9]. В дальнейшем мы вернёмся к анализу этих афтершоков, поскольку они оказались интересными с точки зрения теории катастроф. Здесь уместно сказать, что в настоящей статье по вполне понятной причине мы не будем касаться вопроса о многочисленных жертвах и тяжелейших экономических последствиях указанных землетрясений.

Различным аспектам физики землетрясений посвящена обширная литература. Далеко не полный список публикаций содержится в монографиях [1–3, 6, 7]. Нескольких статей о землетрясениях было опубликовано на страницах журнала *Успехи физических наук* [10–16]. Мы кратко остановимся на статье [16], поскольку её название частично совпадает с названием настоящей статьи. Нам хотелось бы избежать недоразумения, которое может возникнуть ввиду многозначности термина "катастрофа". В [16] для предотвращения землетрясений предложено воздействовать на горные породы микроволновым излучением, причём землетрясения рассматриваются как экологические катастрофы, приводящие к гибели людей. В отличие от этого, мы рассмотрим землетрясения как таковые с точки зрения теории критических явлений и теории катастроф. Попутно заметим, что мы обойдём стороной не только сложный вопрос об антропогенном воздействии на литосферу с целью предотвратить землетрясения, но и действительно актуальный вопрос о поиске механических и электромагнитных предвестников с целью прогнозирования землетрясений (см., например, [17–27]). Оба указанных вопроса важны с практической точки зрения, но в настоящей статье мы ставим перед собой значительно более скромную задачу.

Напомним, что теория катастроф, основы которой заложены в 1960-х годах, изучает особенности гладких отображений и бифуркации динамических систем [28–30]. Состояние системы описывается феноменологически

набором функций $\psi_j(t, c_\alpha)$, $j = 1, 2, \dots, n$, которые зависят от времени и от так называемых управляющих параметров c_α , $\alpha = 1, 2, \dots, m$. Катастрофа происходит в виде резкого изменения ψ_j при плавном изменении c_α . Система характеризуется потенциальной функцией $U(\psi_j, c_\alpha)$, зависящей от состояния и управляющих параметров. Уравнение

$$\frac{d\psi_j}{dt} = - \frac{\partial U}{\partial \psi_j} \quad (3)$$

описывает эволюцию системы. Важнейшей задачей является анализ критических точек потенциальной функции. С приближением к критической точке гессиан потенциальной функции стремится к нулю,

$$\det \frac{\partial^2 U}{\partial \psi_i \partial \psi_j} \rightarrow 0. \quad (4)$$

Реальная физическая система (например, очаг готовящегося землетрясения) в ходе плавной эволюции приближается к порогу, за которым следует катастрофа (в нашем случае это образование магистрального разрыва в горных породах). Опыт свидетельствует о том, что катастрофы часто происходят неожиданно. Практически предвидеть реальную катастрофу во многих случаях не удаётся. При таких обстоятельствах важно знать, что существует теория, определённо указывающая на ряд признаков приближающегося изменения состояния системы. Эти признаки называют флагами катастрофы, имея в виду, что динамическая система как будто бы "вывешивает сигнальные флаги", оповещающие о надвигающейся радикальной перемене [29]. Весьма характерным признаком такого рода является аномальное возрастание флуктуаций с приближением системы к критической точке. Заметим, что данное свойство неравновесных динамических систем было известно в физике задолго до создания теории катастроф. Например, критическая опалесценция [31] служит ярким проявлением аномального возрастания флуктуаций при фазовом переходе в жидкости. Представление о флагах катастрофы было успешно использовано при анализе форшоков. Соответствующие результаты изложены в разделе 2.

Если представление о флагах дало возможность по-новому взглянуть на динамику форшоков, то представление о триггерах позволило выявить неизвестные ранее свойства афтершоков. Мы называем триггером сравнительно слабое воздействие, которое приводит к значительному, вообще говоря катастрофическому, изменению состояния динамической системы. Это не очень строгое, но вполне понятное определение. Приведём пример, поясняющий существо дела. Восемь тысяч лет высоко в горах Заилийского Алатау существовало озеро Иссык, которое называли "бриллиантом в гранитной оправе". Это озеро исчезло в результате экологической катастрофы. Автор был в тех краях в составе экспедиции Института физики Земли АН СССР и оказался одним из последних, кто видел это редкое по красоте озеро. В воскресенье 7 июля 1963 г. бурный сель быстро сполз в озеро и буквально выдавил его, выплеснув чудовищную массу воды на нижний склон. Сель был триггером, а катастрофа произошла потому, что озеро Иссык находилось в метастабильном состоянии.

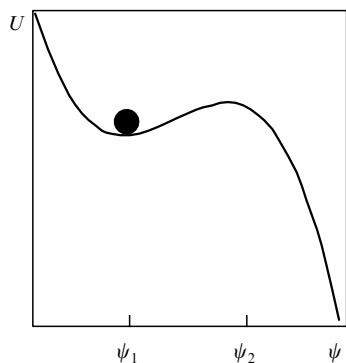


Рис. 1. Потенциальный рельеф в форме кубической параболы. Чёрный шарик находится в метастабильном состоянии. Критический переход может произойти под воздействием эндогенного или экзогенного триггера.

Воспоминание о катастрофе на озере Иссык подсказало подход к построению простой модели, которая поможет нам ввести представление об эндогенных и экзогенных триггерах. Вначале допустим, что триггеров нет. В качестве затравки используем форму катастрофы типа "складка" по классификации Тома [28], или типа A_2 по классификации Арнольда [30]. Потенциальная функция имеет вид $U(\psi) = U(0) - c_1\psi + c_2\psi^2 - c_3\psi^3$, причём $\psi \geq 0$, $c_\alpha \geq 0$, $\alpha = 1, 2, 3$. Другими словами, потенциал имеет форму кубической параболы (рис. 1). Минимум и максимум потенциала соответствуют устойчивому (ψ_1) и неустойчивому (ψ_2) состояниям равновесия системы ($d\psi/dt = 0$). Состояние ψ_1 метастабильно. Это означает, что под влиянием шумов, присущих любой реальной системе, или под влиянием внешнего воздействия система может совершить фазовый переход $\psi_1 \rightarrow \psi > \psi_2$ и тем самым потерять равновесие ($d\psi/dt > 0$).

Итак, мы имеем простейшую феноменологическую модель, имитирующую метастабильное состояние динамической системы. Модели такого рода ранее широко обсуждались при качественном анализе колебаний магнитосферы [32, 33]. По-видимому, аналогичные модели можно с известными оговорками использовать и при обсуждении флуктуационных и критических явлений в литосфере [34–37]. Такая модель даже в представленном здесь довольно примитивном виде позволяет, например, метафорически осмысливать процесс подготовки землетрясения. Эту модель можно использовать, хотя и с осторожностью, как своего рода вспомогательную схему. Остановимся на этом подробнее.

Очевидно, что система может потерять равновесие без влияния шумов или внешних воздействий, если управляющие параметры c_α медленно изменяются с течением времени таким образом, что высота потенциального барьера $\Delta U = U(\psi_2) - U(\psi_1)$ монотонно уменьшается. Рисунок 2 иллюстрирует это уменьшение. На рисунке 2в представлен вид потенциала в момент критического перехода системы от метастабильного состояния (рис. 2а и б) к неравновесному состоянию (рис. 2г). Однако если бы мы, игнорируя слишком очевидную грубость затравочной модели, попытались описать с её помощью процесс подготовки землетрясения, то тогда, казалось бы, момент землетрясения мы должны связать с моментом критического перехода. Но это было бы ошибкой. Действительно, в земной коре, а точнее в будущем очаге готовящегося землетрясения, существует

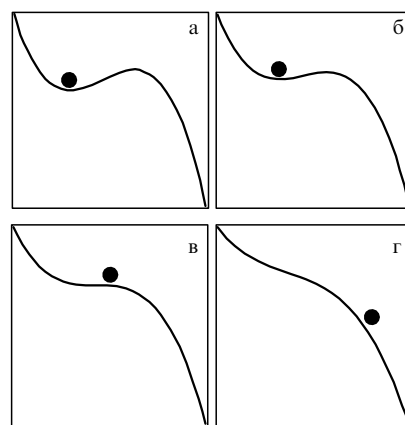


Рис. 2. Изменение со временем формы потенциального рельефа, приводящее к катастрофе. Из метастабильного состояния (а, б) через бифуркацию (в) система переходит в неравновесное состояние (г).

фон сейсмических флуктуаций. Под их воздействием землетрясение может произойти заведомо раньше момента критического перехода, т.е. в момент, показанный на рис. 2б, а не на рис. 2в. Другими словами, с приближением к точке бифуркации, которая определяется условием $\Delta U = 0$, флуктуации поля напряжений в горных породах могут стать триггером, вызывающим землетрясение.

Для описания воздействия флуктуаций на систему следует использовать не динамическое уравнение (3), а стохастическое уравнение Ланжевена

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \psi} + \xi(t). \quad (5)$$

Здесь аддитивный член $\xi(t)$ — случайная функция с нулевым средним значением, причём $\langle \xi(t')\xi(t'') \rangle = 2D\delta(t' - t'')$, где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака, а угловые скобки означают статистическое усреднение. Новый феноменологический параметр модели D пропорционален интенсивности сейсмических шумов в очаге назревающего землетрясения. (Аналогично можно учесть эндогенные триггеры в виде мультипликативных шумов, но мы не останавливаемся на этом, отсылая заинтересованного читателя к монографии [38].) В какой-то момент сильная флуктуация $\xi(t)$ вызовет критический переход. Такой переход будем называть спонтанным, а флуктуацию $\xi(t)$ — эндогенным триггером. Вероятность спонтанного перехода пропорциональна $\exp(-\Delta U/D)$, т.е. экспоненциально мала при достаточно высоком потенциальном барьере [39].

Дальнейшее обобщение состоит в учёте внешних сил $f(t)$, действующих на систему:

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \psi} + \xi(t) + f(t). \quad (6)$$

С приближением к точке бифуркации высота барьера ΔU монотонно убывает. Следовательно, вблизи порога резко повышается реактивность динамической системы. В этом состоянии даже слабое внешнее возмущение может вызвать катастрофу. Такой критический переход естественно назвать индуцированным, а соответствующий триггер $f(t)$ — экзогенным. Если $f = 0$, то вероят-

ность катастрофы экспоненциально мала, как уже отмечалось выше. Если $f \neq 0$, то вероятность может значительно повыситься даже при сравнительно небольшой амплитуде внешнего воздействия. В важном частном случае периодического воздействия вероятность перехода увеличивается в $\exp(F\Delta\psi/D)$ раз, где $F = \langle 2f^2 \rangle^{1/2}$, а $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$ — ширина зоны перегиба потенциального рельефа [40].

Экзогенные триггеры геокатастроф могут быть естественными или искусственными, импульсными или периодическими и иметь земное или космическое происхождение. Соответствующая литература обширна (см., например, монографии [41, 42] и указанные там работы). Далее мы рассмотрим два нетривиальных триггера: кругосветное сейсмическое эхо (разделы 3, 4) и сфероидальные колебания Земли (раздел 5). Первый из этих триггеров является импульсным, а второй — периодическим. Оба они возбуждаются главным ударом землетрясения и воздействуют на активность афтершоков.

2. Форшоки

2.1. Активизация форшоков за три часа до главного удара

Форшоки как механические предвестники сильного землетрясения возникают на заключительной стадии сейсмического цикла [19]. На заключительной стадии наблюдаются также разнообразные электромагнитные предвестники (см. классические работы [17, 18] и недавние публикации [24–27]). Здесь мы рассмотрим динамику форшоков в последние несколько часов заключительной стадии [37].

Побудительным мотивом для изучения форшоков в последние часы перед главным ударом послужили результаты анализа ультранизкочастотных электромагнитных колебаний, зарегистрированных аппаратным комплексом Северокавказской геофизической обсерватории [24, 25]. В ходе анализа была отмечена активизация колебаний за 2–4 часа до начала сильных землетрясений. Вполне понятна попытка [37] найти в динамике форшоков специфические свойства, так или иначе связанные с активизацией электромагнитных колебаний. Результат поиска оказался довольно интересным.

Анализ форшоков, которые произошли в период с 1964 г. по 2009 г., проводился по данным каталога землетрясений Международного сейсмологического центра (International Seismological Centre — ISC) (<http://www.isc.ac.uk>). Из каталога были выделены сильные землетрясения с магнитудами $M \geq 7,5$. Времена возникновения этих землетрясений использовались в качестве реперов для синхронизации форшоков. Форшоки выделялись из каталога по сочетанию трёх признаков, а именно по месту, времени и величине магнитуды. Форшоком считалось землетрясение, эпицентр которого отстоял не более чем на 600 км от эпицентра репера. В расчёт принимались только те землетрясения, которые произошли не ранее, чем за 10 ч до момента появления репера. Наконец, было наложено естественное ограничение на магнитуду: $M < 7,5$.

Результат селекции и накопления форшоков показан на рис. 3. По вертикальной оси отложена магнитуда, а по горизонтальной отложено время, причём нулевая метка времени соответствует моменту появления репера. В

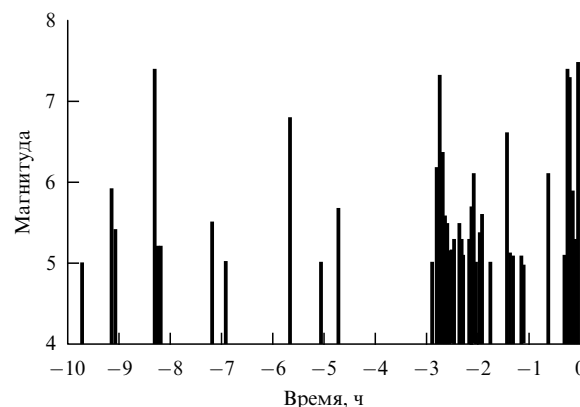


Рис. 3. Сильные форшоки ($5 \leq M < 7,5$) на заключительных этапах подготовки сильных землетрясений ($M \geq 7,5$) по данным каталога ISC (1964–2009 гг.). Нулевая метка времени соответствует моменту главного удара. Результат получен методом наложения эпох.

серии испытаний, результат которых показан на рис. 3, было наложено дополнительно жёсткое ограничение снизу на магнитуду форшоков: $5 \leq M < 7,5$. Таким образом, рис. 3 показывает распределение по времени сильных форшоков в эпицентральных зонах сильных землетрясений.

Мы видим, что распределение форшоков по времени неравномерно. До момента -3 ч случаются редкие события, но после времени -3 ч происходит резкая активизация форшоков. Это напоминает активизацию электромагнитных колебаний примерно за три часа до главного удара [24, 27]. Мы не говорим здесь о причинно-следственной связи, поскольку в настоящее время для этого нет достаточных оснований. Речь идёт лишь о том, что, по-видимому, удалось выявить некоторый параллелизм протекания электромагнитных и механических процессов на заключительном этапе подготовки землетрясения.

Резкое усиление активности за три часа до главного удара происходит и при более мягкой селекции форшоков. Если снять нижнее ограничение на магнитуду форшоков, то получим результат, показанный на рис. 4. Мы видим усреднённую динамику форшоков ($M < 7,5$) в эпицентральных зонах сильных землетрясений ($M \geq 7,5$). График построен следующим образом: подсчитывалась сумма форшоков в окне шириной 11 мин, которое смещалось по горизонтальной оси шагами в 1 мин.

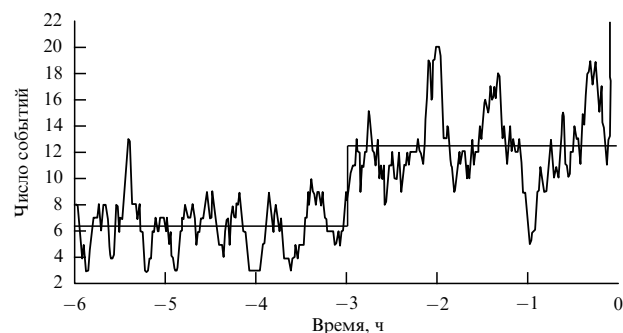


Рис. 4. Усреднённая динамика форшоков ($M < 7,5$) в эпицентральных зонах сильных землетрясений ($M \geq 7,5$). Время, равное нулю, соответствует моменту главного удара. Горизонтальными линиями показаны средние значения количества форшоков.

Измеренные средние значения и средние квадратичные отклонения до (после) момента -3 ч равны $6,3$ ($12,5$) и $1,95$ ($3,01$) соответственно. Отсюда с учётом объёмов выборок оценена точность возможных отклонений измеренных значений от истинных средних величин: $6,3 \pm 0,43$ до момента -3 ч и $12,5 \pm 0,68$ после момента -3 ч. Двукратное усиление активности форшоков за три часа до главного удара не вызывает сомнения.

Сам факт появления форшоков и нарастание их активности более или менее понятны в свете теории катастроф. Но всё же несколько загадочным выглядит резкий скачок активности форшоков именно за три часа до главного удара. В разделе 2.3 мы попытаемся придать этому наблюдению физический смысл.

2.2. Критическое замедление

Обратим внимание на то, что с течением времени квазипериод флуктуаций на рис. 4 заметно увеличивается. Попробуем связать эту особенность с одним из предсказаний теории катастроф. Речь пойдёт о так называемом смягчении мод. Суть состоит в том, что с приближением к бифуркации гессиан (4) потенциальной функции стремится к нулю. Отсюда следует, что по крайней мере одна из собственных частот динамической системы понижается [29]. Это довольно общее свойство получило название "смягчение мод" или "критическое замедление процесса перед катастрофой".

Как видно из рис. 5, признаки понижения характерной частоты флуктуаций активности форшоков на заключительном этапе подготовки главного удара действительно существуют. На рисунке 5а показана вариация форшоков, а на рис. 5б представлен соответствующий динамический спектр. Не исключено, что динамический спектр свидетельствует о своеобразном смягчении мод в зоне подготовки землетрясения перед образованием магистрального разрыва сплошности горных пород в соответствии с теорией катастроф.

Завершим этот раздел любопытным сопоставлением. А именно сопоставим рис. 5, предположительно под-

тверждающий одно из предсказаний теории катастроф, с рис. 13 из работы [43] (без ссылки на теорию катастроф). Согласно рис. 13 из [43] характерная частота колебаний сейсмической активности понижается примерно на одну октаву на интервале в несколько лет, предшествующем сильному землетрясению. При этом частота колебаний порядка нескольких первых десятков наногерц. Мы же здесь имеем дело с флуктуациями в миллигерцевом диапазоне (см. рис. 5). Внимательное сопоставление динамических спектров свидетельствует о различии частот на четыре порядка в нашем случае и в случае, рассмотренном в работе [43]. Тот факт, что в обоих случаях имеет место перепад частот на одну октаву, не стоил бы упоминания, если бы не одно интересное обстоятельство: а именно интервалы времён, на которых происходит перепад, различаются между собой на четыре порядка, подобно тому как на четыре порядка различаются характерные частоты колебаний. Не имеем ли мы здесь дело со скейлингом? Пока мы не можем ответить на данный вопрос, однако он вполне заслуживает дальнейшего изучения.

2.3. Кругосветное сейсмическое эхо

Со всеми необходимыми оговорками мы приступаем к изложению гипотезы о происхождении резкого скачка активности форшоков примерно за три часа до главного удара. Гипотеза возникла при попытках придать физический смысл трёхчасовому интервалу. Сравнительный анализ вариантов интерпретации позволил сформулировать допустимое предположение о том, что задержка имеет кинематическое происхождение, а интервал задержки равен времени пробега поверхностной волны Рэлея вокруг Земли.

Действительно, учтём, что форшоки возбуждают поверхностные упругие волны. Далее заметим, что волны, распространяясь от эпицентра форшока с характерной скоростью $3,7 \text{ км с}^{-1}$, возвращаются к эпицентру будущего главного удара примерно через три часа, совершив полный оборот вокруг Земли. Это явление мы будем называть кругосветным сейсмическим эхом (рис. 6). (Нечто аналогичное наблюдается в виде кругосветного радиоэха при распространении коротких радиоволн [44].) Учтём теперь, что с приближением к эпицентру амплитуда эха неуклонно возрастает. В самом деле, функция Лежандра $P_v^{\mu}(\cos \theta)$ пропорциональна амплитуде колебаний на угловом расстоянии θ от эпицентра форшока [45]. В асимптотике [46] $P_v^{\mu}(\cos \theta) \sim \sqrt{2/\pi \sin \theta}$, т.е. амплитуда кругосветного эха возрастает с приближением к

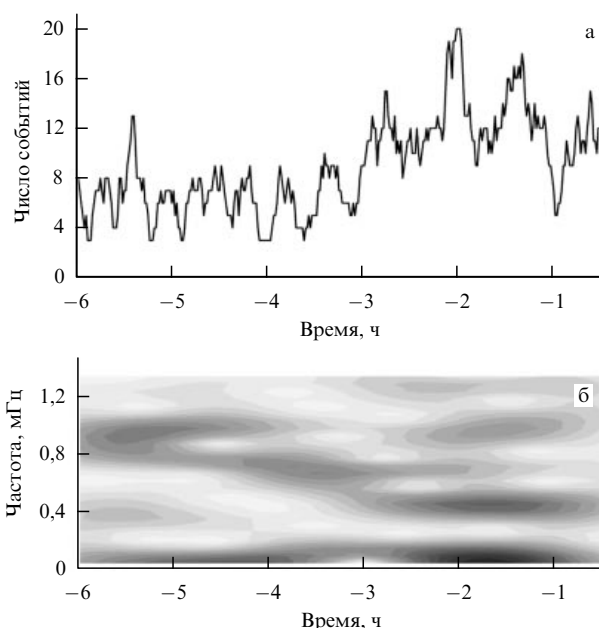


Рис. 5. Вариация количества форшоков (а) и соответствующий динамический спектр (б).

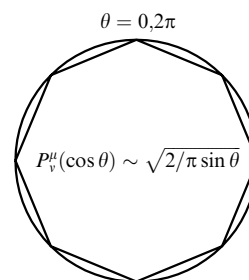


Рис. 6. Схематическая картина лучей кругосветного эха, создаваемого поверхностными и объёмными волнами (гладкая и ломаная линии соответственно). В центре рисунка указана угловая зависимость коротковолновой асимптотики присоединённых функций Лежандра, которые пропорциональны амплитуде сейсмических колебаний.

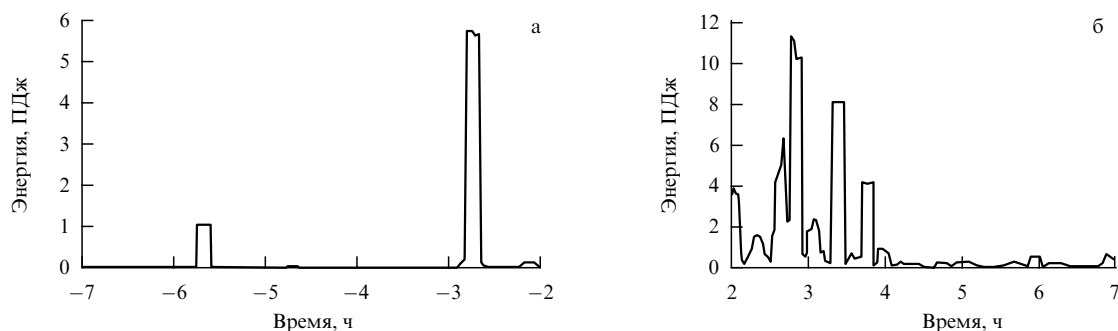


Рис. 7. Энергия форшоков (а) и афтершоков (б) в эпицентральных зонах сильных землетрясений ($M \geq 7,5$).

эпицентру $\theta = 2\pi$ (см. рис. 6). Вполне понятно, что амплитуда возрастает отнюдь не до бесконечности, как на это указывает асимптотическая теория в рамках сферически симметричной модели Земли. Вследствие дифракции, а также сферической и хроматической абберации происходит ограничение амплитуды колебаний. Тем не менее можно предположить, что примерно через три часа после форшока эффект сходящихся сейсмических волн стимулирует образование магистрального разрыва горных пород и вызывает сильное землетрясение.

Необходимо принять во внимание, что изложенная выше гипотетическая последовательность событий происходит на фоне быстрого приближения динамической системы к тотальной катастрофе. Теория катастроф определённо предсказывает аномальное возрастание флуктуаций напряжения горных пород на этом этапе эволюции. При отсутствии внешних воздействий достаточно мощная флуктуация в какой-то момент так или иначе приведёт к магистральному разрыву, т.е. послужит эндогенным триггером. Вопрос стоит следующим образом: не произойдёт ли магистральный разрыв до этого момента под воздействием кругосветного эха, возбуждённого форшоком? В пользу гипотезы о том, что иногда такие события действительно имеют место, косвенно свидетельствует задержка главного удара на три часа относительно момента резкого скачка форшоковой активности. Ещё один косвенный аргумент в пользу данной гипотезы состоит в том, что кругосветное эхо от главного удара индуцирует афтершоки, но об этом речь пойдёт в разделе 4.

Сделаем более наглядной эмпирическую основу нашей гипотезы. Для этого выделим нужный фрагмент рис. 3, преобразуем магнитуду M в энергию E по формуле (1) и проведём сглаживание посредством суммирования энергий в 9-минутных интервалах, которые последовательно сдвигаются шагами в 1 мин. Результат показан на рис. 7а. (О сопоставлении рис. 7а и б речь пойдёт в разделе 4.) Мы видим мощный пик энерговыделения в момент $-2,8$ ч. Интервал 2,8 ч соответствует времени пробега сейсмической волны вокруг Земли со скоростью 4 км с^{-1} , что находится в разумном согласии с характерной скоростью поверхностных волн, известной из расчётов и наблюдений.

Укажем ещё на один наблюдательный факт в пользу рассматриваемой гипотезы. А именно в дополнение к результату анализа глобальной сейсмичности, показанному на рис. 7, приведём на рис. 8 результат анализа региональной сейсмичности по данным о землетрясениях в Калифорнии, содержащимся в каталогах <http://www.data.scec.org/> (1983–2008) и <http://www.ncedc.org/> (1968–2007).

В качестве реперов, синхронизирующих форшоки и афтершоки, взяты моменты главных ударов с магнитудами $M \geq 6$ (нулевое время на рисунке). Энергия землетрясений усреднялась по двадцатиминутным интервалам, которые сдвигались одноминутными шагами. Энергия главных ударов в расчёт не принималась, и на рис. 7 она не показана. (В отдельных событиях энергия главных ударов достигала нескольких петаджоулей.) Примерно за три часа до нулевой метки наблюдается пик энерговыделения форшоков, которые предположительно послужили триггерами некоторой части главных ударов.

В заключение этого раздела поясним, что кругосветное эхо формируется, вообще говоря, не только поверхностными, но и объёмными волнами, которые многократно отражаются от земной поверхности и образуют волновую структуру наподобие шепчущей галереи (о модах шепчущей галереи см., например, в монографии [47]). С точки зрения лучевой теории усиление объёмных волн в эпицентре произойдёт при возврате лучей в исходную точку с резонансным "замыканием на себя" (см. рис. 6). Данный вопрос заслуживает детального анализа, однако необходимо подчеркнуть, что вычисление матрицы монодромии и мультипликаторов окажется затруднительным, если для анализа будет выбрана более или менее реалистичная модель внутреннего строения Земли. Пока можно лишь определённо сказать, что эхо на объёмных волнах, если оно действительно возникает, должно возвращаться в эпицентр раньше, чем эхо на поверхностных волнах. Теоретически допустимым ис-

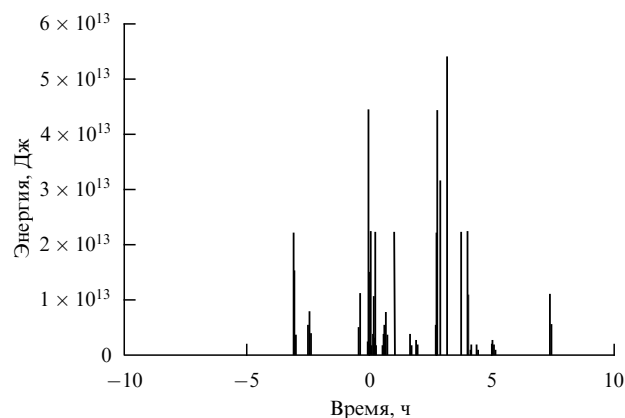


Рис. 8. Энергия форшоков и афтершоков сильных землетрясений в Калифорнии. Нулевое время соответствует моменту главного удара.

ключением было бы эхо на очень коротких волнах, которые тесно примыкают к земной поверхности и образуют нечто вроде тонкой волновой плёнки. Однако из-за сильного поглощения при многократном отражении от земной поверхности интенсивность такого эха будет, скорее всего, пренебрежимо малой.

3. Кумулятивный эффект сходящихся поверхностных волн

3.1. О сходящихся волнах

По поводу сходящихся волн уместно сделать предварительные замечания, впрочем, довольно очевидные. Известно, что условие излучения Зоммерфельда выделяет запаздывающие решения волнового уравнения, которые на достаточно большом удалении от источников представляют собой расходящиеся волны. Условие Зоммерфельда соответствует принципу причинности. Более того, по идее Зельдовича, оно даёт одно из возможных объяснений необратимости времени (см., например, [48]). С другой стороны, опережающие решения также могут иметь определённый смысл. Например, Фейнман вслед за Френкелем использовал полусумму запаздывающих и опережающих решений для устранения бесконечностей в классической электродинамике [49].

В данном разделе, как следует из его названия, речь пойдёт о сходящихся, а не о расходящихся волнах. Поэтому во избежание недоразумений полезно привести два простых примера, свидетельствующих о том, что в окружающем нас мире сходящиеся волны, безусловно, существуют и это отнюдь не нарушает ни условия Зоммерфельда, ни принципа причинности.

Сходящиеся волны можно создать искусственно. Элементарным примером служат волны на воде внутри горизонтального кольца, брошенного строго вертикально на поверхность водоёма. Второй пример имеет прямое отношение к нашей теме. Допустим, что сферический симметричный упругий шар возбуждён точечным ударом. Для наглядности представим себе удар метеорита по поверхности Луны. Поверхностные волны расходятся от места удара, достигают экватора, после чего распространяются как сходящиеся волны и фокусируются в точке, диаметрально противоположной точке удара. Дальнейшая эволюция вполне очевидна. Вначале волны расходятся, а затем сходятся и фокусируются в точке удара.

В подобной постановке задача рассматривалась в сейсмологии в рамках линейной теории упругости (см., например, [50]). В отличие от этого, мы хотим обсудить нелинейность, которая неизбежно возникнет в окрестностях фокальных точек при достаточно сильном ударе. Идея состоит в том, что кумулятивное действие сходящихся к фокусам поверхностных волн может привести к разрушению среды. Поскольку два фокуса представляют собой пару взаимно антиподных точек, мы будем условно называть этот эффект антиподным.

Мы обсудим антиподный эффект на Земле, Луне и Меркурии и обратим внимание на то, что для физики землетрясений особый интерес представляет случай, в котором геологическая среда в окрестности фокуса находится в напряжённом состоянии, близком к пределу прочности. В этом случае сходящиеся к фокусу сейсмиче-

ские волны воздействуют на среду как триггер, который может индуцировать критический переход и вызвать землетрясение.

3.2. Антиподный эффект на Земле

Об антиподах знали ещё в античном мире, однако антиподный эффект как волновое явление стал широко известен лишь в 1957 г. после запуска в СССР первого искусственного спутника Земли. Миллионы радиолюбителей принимали сигналы спутника, причём особый интерес и воодушевление вызывало заметное усиление амплитуды радиоволн при прохождении спутником окрестности антиподной точки [51]. Вполне понятно, что распространение поверхностных сейсмических волн, возбуждённых землетрясением, приводит к аналогичному эффекту. В самом деле, из геометрических соображений следует, что в линейном приближении амплитуда формируется суперпозицией присоединённых функций Лежандра, асимптотика которых пропорциональна $\sin^{-1/2} \theta$, т.е. имеет полюсы в эпицентре ($\theta = 2\pi$) и антиэпицентре ($\theta = \pi$). Здесь, как и выше, θ — угловое расстояние от эпицентра. Волна проходит половину кругосветного расстояния за 90 мин при характерной скорости распространения $3,7 \text{ км с}^{-1}$. Таким образом, повышение амплитуды колебаний в антипode и его окрестности ожидается примерно через полтора часа после начала землетрясения.

Мы указали на формальную аналогию антиподных эффектов сейсмических волн и радиоволн. Но эта аналогия неполна. Есть два различия, существенных в контексте нашей проблематики. Во-первых, эффект усиления радиоволн можно было наблюдать лишь при движении спутника в окрестности точки, диаметрально противоположной точке приёма, т.е. при $\theta = \pi$. При $\theta = 2\pi$ кругосветный эхо-сигнал заглушался прямым сигналом от радиопередатчика, установленного на спутнике. Во-вторых, антиподный радиосигнал был линейным, в то время как мы ожидаем нелинейных проявлений, индуцированных сходящимися сейсмическими волнами.

Изложенные представления впервые были использованы в работе [34] при попытке обнаружить нелинейный антиподный эффект сейсмических волн в антиэпицентрах сильных землетрясений. Для поиска брались координаты эпицентров, времена возникновения и магнитуды землетрясений, указанные в каталоге ISC, и применялся так называемый метод наложения эпох (superposed epoch analysis) (см., например, [52]). Антиподная зона выбиралась в виде сферического сегмента радиусом $\pi - \theta_0$ с центром в точке $\theta = \pi$. Далее по каталогу ISC подсчитывалось число землетрясений с магнитудами $M < M_*$, которые произошли в этом сегменте после сильного землетрясения с магнитудой $M \geq M_*$ и эпицентром в точке $\theta = 0$. Величины θ_0 и M_* подбирались опытным путём так, чтобы обнаружить антиподный эффект, если это вообще возможно сделать указанным способом. После ряда проб и ошибок были найдены оптимальные значения $M_* = 6$ и $\theta_0 = 160^\circ$, что соответствует радиусу антиподной зоны 20° . За начало эпохи продолжительностью 11 ч было принято время возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq M_*$. Было выделено около 7000 эпох за период с 1964 г. по 2006 г. Для каждой эпохи подсчитывалось количество землетрясений с магнитудой $M < M_*$, которые произошли в каждую данную минуту эпохи в соответствующей антиподной зоне.

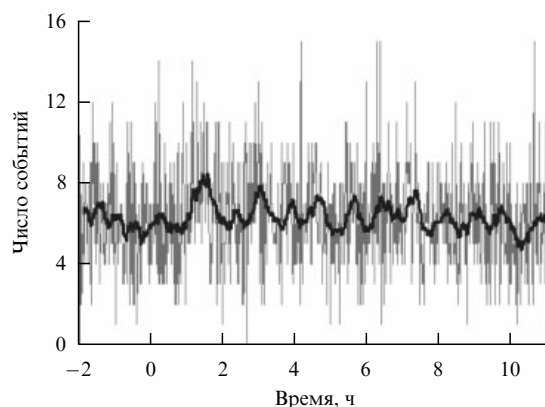


Рис. 9. Усреднённая динамика слабых землетрясений ($M \leq 1$) в антиподной зоне в течение двух часов до и 11 часов после сильных землетрясений ($M \geq 6$). Жирная кривая получена сглаживанием исходных данных по 20 точкам.

Результат наложения эпох показан на рис. 9. Жирная кривая получена сглаживанием исходных данных по 20 точкам. Заметный максимум количества землетрясений в антиподной зоне наблюдается примерно через 90 мин после репера. Казалось бы, это соответствует ожиданию, но эффект мал в следующем смысле: в подавляющем большинстве случаев в антиподных зонах наблюдались землетрясения с магнитудами $M \leq 1$, т.е. весьма слабые.

Пытаясь разобраться в причине слабости антиподного эффекта в окрестности точки $\theta = \pi$, авторы работы [34] сопоставили между собой мировые карты эпицентров и антиэпицентров. Оказалось, что антиподные точки эпицентров землетрясений располагаются, как правило, в асейсмичных областях. Этот факт, интересный и сам по себе, объяснил слабость эффекта при $\theta = \pi$. Более того, он подсказал целесообразность поиска сильных афтершоков в окрестности точки $\theta = 2\pi$ примерно через три часа после главного удара, поскольку известно, что в эпицентральной зоне уровень напряжений в земной коре остаётся высоким в течение длительного времени после образования магистрального разрыва. В отдельных местах этот уровень близок к пределу прочности горных пород, о чём свидетельствуют многочисленные афтершоки. Поэтому ожидалось, что кругосветное эхо главного удара может стать триггером сильного афтершока. Результат исследования вполне оправдал это ожидание, о чём подробно рассказано в разделе 4.

3.3. Сопоставление с антиподным эффектом на Луне и Меркурии

Значительное воздействие сходящихся сейсмических волн на горные породы в антиэпицентре, т.е. при $\theta = \pi$, хорошо и давно известно в планетологии [53–55]. С помощью космических аппаратов обнаружены обширные разрушения (оползни, бугристый ландшафт) в местах, диаметрально противоположных ударным кратерам на Луне и на Меркурии. Например, на Луне поверхностные разрушения обнаружены в антипode Моря Дождей. На Меркурии, поверхность которого напоминает лунную, аномальный рельеф наблюдается в области, диаметрально противоположной Равнине Жары. Вполне очевидно, что разрушения вызваны куму-

лятивным воздействием сходящихся сейсмических волн, возбуждённых ударом метеорита.

Итак, антиподные эффекты на Земле, с одной стороны, и на Луне и Меркурии, с другой, подобны друг другу в том отношении, что их причиной является концентрация импульса и энергии при схлопывании сходящихся сейсмических волн. Что касается различий, то они довольно очевидны. На Луне и Меркурии эффект вызван ударами метеоритов в далёком прошлом и он наблюдается в виде разрушений поверхности в местах, диаметрально противоположных ударам, тогда как на Земле эффект наблюдается в современную эпоху в виде повторных толчков после сильных землетрясений.

Но почему в окрестностях антиэпицентров сильных землетрясений кумулятивный эффект оказался сравнительно слабым? Выше мы объяснили слабость эффекта тем, что на Земле антиподы эпицентров располагаются, как правило, в асейсмичных областях. Однако этого недостаточно, поскольку на Луне и Меркурии видны значительные поверхностные разрушения в окрестностях антиэпицентров и эти разрушения, судя по всему, вызваны отнюдь не триггерным, а прямым силовым воздействием сходящихся волн. Можно предположить, что ударное возбуждение поверхностных волн метеоритом более эффективно, чем землетрясением. Ещё одной причиной является более слабое затухание сейсмических волн на Луне и Меркурии, чем на Земле.

4. Афтершоки

Сам факт возникновения многочисленных афтершоков говорит о том, что после главного удара уровень напряжений в земной коре в окрестности эпицентра остаётся высоким в течение длительного времени. Магистральный разрыв главного удара не снимает накопленных ранее напряжений, а перераспределяет их по другим участкам очаговой зоны, повышая тем самым вероятность возникновения в них последующих толчков. Поэтому именно в серии афтершоков есть шанс отыскать триггерные эффекты. В разделах 4.1, 4.2 мы рассмотрим импульсный триггер, а в разделе 5 — периодический.

4.1. Анализ сильнейших землетрясений

Попытаемся найти кумулятивный эффект сходящихся поверхностных волн в потоке афтершоков Суматра-Андаманского мегаземлетрясения — одного из сильнейших землетрясений начала XXI в. [36].

Землетрясение с магнитудой $M = 9,0$ произошло в Юго-Восточной Азии 26 декабря 2004 г. в 0 ч 58 мин 53 с по гринвичскому времени. На рисунке 10 показано положение эпицентра этого землетрясения, который находился в Индийском океане, к северу от острова Симёлуз возле северо-западного побережья Суматры. Наиболее сильный афтершок (магнитуда $M = 7,2$) произошёл с задержкой на 3 ч 20 мин относительно главного толчка. Эпицентр афтершока также показан на рис. 10. Время задержки афтершока приблизительно равно времени пробега поверхностной волны вокруг Земли, и это наводит на мысль, что кругосветный сейсмический эхосигнал, возбуждённый главным ударом, мог быть триггером, вызвавшим сильный афтершок.

На рисунке 11 показаны афтершоки в эпицентральной зоне радиусом 10° . На левую шкалу нанесена магнитуда,

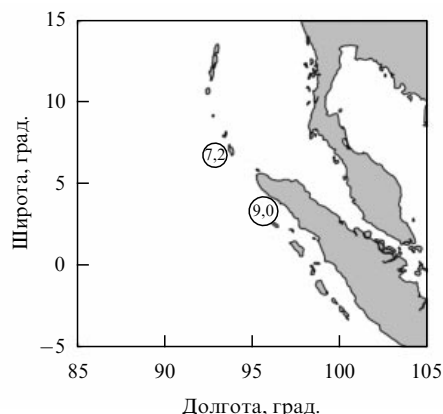


Рис. 10. Карта северо-восточной части Индийского океана, на которой показаны эпицентры главного толчка Суматра-Андаманского землетрясения ($M = 9,0$) и его наиболее сильного афтершока ($M = 7,2$).

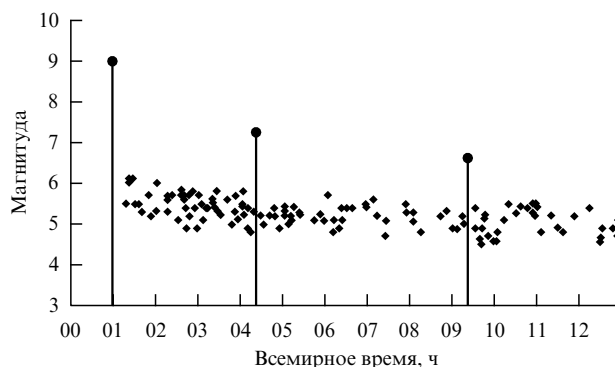


Рис. 12. Суматра-Андаманское землетрясение 26.12.2004 и афтершоки на интервале 12 ч после главного толчка. Чёрными кружками отмечены главный сейсмический удар и два наиболее сильных афтершока.

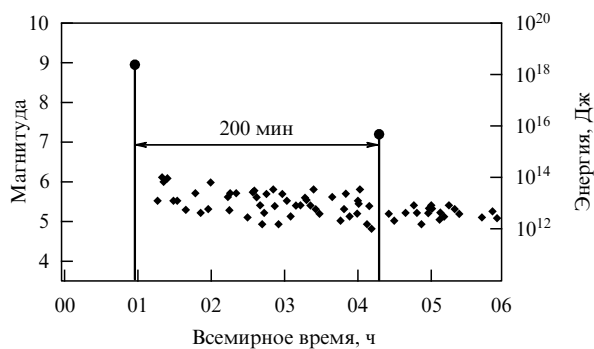


Рис. 11. Суматра-Андаманское землетрясение 26.12.2004 и афтершоки на интервале 5 ч после главного удара. Чёрными кружками отмечены главный удар и наиболее сильный афтершок.

а на правую — сейсмическая энергия, рассчитанная по формуле (1). Здесь использованы данные о землетрясениях Национального информационного центра геологической службы США (United States Geological Survey/National Earthquake Information Center — USGS/NEIC) (http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html). На интервале 5 ч зарегистрировано 70 афтершоков. Мы видим, что наиболее сильный афтершок ($M = 7,2$) возник спустя 200 мин после главного удара. Не исключено, что он индуцирован кругосветным сейсмическим эхом. Идея состоит в том, что поверхностные упругие волны, возбуждённые Суматра-Андаманским землетрясением, совершили полный оборот вокруг Земли и вызвали сильный афтершок. Мы наблюдаем различие примерно на 20 мин между ожидаемым и зарегистрированным временем задержки. Если верна наша интерпретация афтершока с магнитудой $M = 7,2$ как землетрясения, индуцированного кругосветным эхом-сигналом от главного толчка, то различие в 20 мин между ожидаемым и зарегистрированным временем задержки естественно объяснить явлением последствия (overshot), характерным для реакции нелинейных динамических систем на внешние воздействия [29].

Продолжая наш анализ, обратим внимание на возможность многократного распространения поверхностных волн вокруг земного шара и, соответственно, на возможность повторного кругосветного эха главного толчка. Повторное эхо может индуцировать афтершок

при условии, что какой-то участок земной коры в окрестности эпицентра находится в субкритическом состоянии к моменту прихода эха. Исходя из этих соображений ожидалось, что индуцированный афтершок возникнет через 6–7 ч после главного удара, но ожидание не оправдалось (рис. 12). Второй сильный афтершок с магнитудой $M = 6,6$ наблюдался в 9 ч 20 мин, т.е. заметно позднее, а именно через 8 ч 20 мин после главного толчка и через 5 ч после первого сильного афтершока. Если не апеллировать ещё раз к явлению последствия, то следует предположить, что второй сильный афтершок возник в результате спонтанного перехода под воздействием эндогенного триггера.

Интересно сопоставить афтершоки Суматра-Андаманского землетрясения с афтершоками столь же мощного землетрясения в районе Тохоку ($M = 9,0$), которое произошло 11 марта 2011 г. у восточного побережья острова Хонсю в 5 ч 46 мин по гринвичскому времени. На рисунке 13 чёрными кружками отмечены главный толчок и пять сильных афтершоков. Что касается двух мощных афтершоков в 6 ч 16 мин ($M = 7,9$) и в 6 ч 26 мин ($M = 7,7$), то, скорее всего, они возникли под воздействием эндогенных триггеров. Но обратим внимание на третий, четвёртый и пятый афтершоки, зарегистрирован-

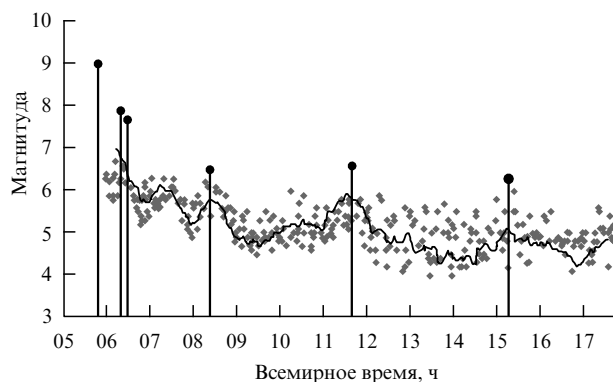


Рис. 13. Землетрясение в районе Тохоку 11.03.2011 и афтершоки на интервале 12 ч после главного толчка. Чёрными кружками отмечены главный сейсмический толчок и пять наиболее сильных афтершоков. Сплошная кривая аппроксимирует облако более слабых афтершоков.

ные в 8 ч 19 мин, 11 ч 36 мин и 15 ч 13 мин, с магнитудами $M = 6,5$, $M = 6,6$ и $M = 6,3$ соответственно. Удивительная регулярность их появления, во-первых, наводит на мысль о том, что мы имеем дело с землетрясениями, индуцированными троекратным кругосветным эхом. Во-вторых, совпадение указанных трёх афтершоков с пиками активности более слабых афтершоков даёт основание со всей осторожностью высказать предположение о том, что мы имеем дело с модуляцией сейсмичности свободными колебаниями Земли на частоте $\sim 0,1$ МГц.

4.2. Статистический анализ

В пользу гипотезы о том, что наиболее сильный афтершок Суматра-Андаманского землетрясения был индуцирован кругосветным сейсмическим эхом, свидетельствуют теоретические соображения, а также анализ афтершоков землетрясения Тохоку. Этого, возможно, было бы недостаточно, если бы не существовало дополнительно более веского аргумента, а именно результата статистического исследования последовательности афтершоков сильных землетрясений [35, 36].

На рисунке 14 показана динамика афтершоков на интервале 6 ч после 167 землетрясений с магнитудами $M \geq 7,5$ по данным каталога USGS с 1973 г. по 2010 г. Времена землетрясений с магнитудами $M \geq 7,5$ использованы в качестве репера для синхронизации афтершоков с магнитудами $6 \leq M < 7,5$ в эпицентральных зонах радиусом 2° . На рисунке 14а показана сглаженная функция распределения землетрясений по времени относительно репера. Сглаживание исходного распределения проведено скользящими 15-минутными интервалами с шагом, равным одной минуте. Дифференцированием сглаженного распределения получено распределение плотности вероятности появления землетрясения, показанное на рис. 14б. Мы видим, что максимальная активность

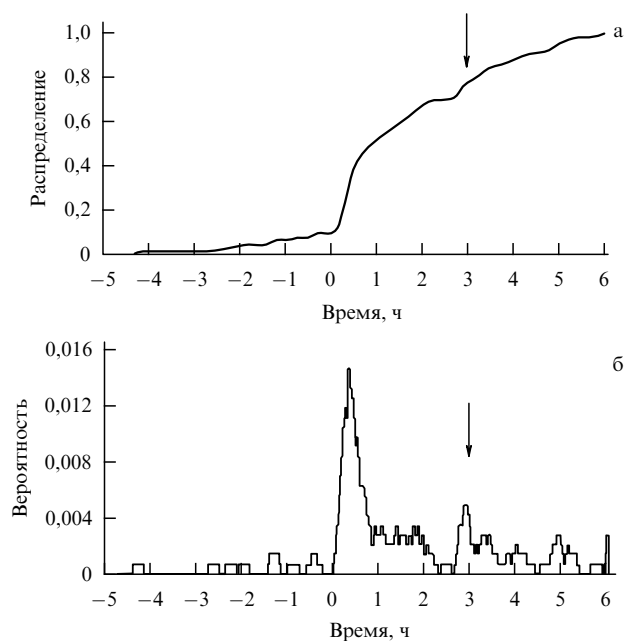


Рис. 14. Динамика форшоков и афтершоков с магнитудами $6 \leq M < 7,5$ в эпицентральных зонах 167 землетрясений с магнитудами $M \geq 7,5$. Стрелки указывают ожидаемое время задержки кругосветного эха поверхностной волны. (а) Функция распределения землетрясений по времени относительно репера. (б) Плотность вероятности появления землетрясения в зависимости от времени.

афтершоков наблюдается в течение первого часа после сильного землетрясения. После этого наблюдается некоторое успокоение, а затем начинается подъём, который примерно через три часа заканчивается новым максимумом активности афтершоков. Это наблюдение дополнительно подтверждает нашу идею о том, что поверхностные упругие волны, возбуждённые главным толчком, совершают оборот вокруг Земли и, возвратившись в окрестность эпицентра, могут вызвать здесь сильный афтершок.

В заключение данного раздела вернёмся к рис. 7б, на котором мы видим мощное энерговыделение афтершоков. Энергия в максимуме достигает 11 ПДж примерно через три часа после репера. Это вполне соответствует представлению о воздействии кругосветного эха главного удара на "остывающий" очаг землетрясения. Нечто подобное наблюдается и на рис. 8. Обратим внимание на определённую симметрию энерговыделения форшоков и афтершоков относительно момента главного удара. Здесь имеется в виду, что пики энерговыделения наблюдаются примерно за три часа до главного удара и через три часа после него. Это в высшей степени интересно. Мы знаем, что кругосветное эхо главного удара может стимулировать появление сильного афтершока спустя три часа после главного удара. Напрашивается предположение о том, что эхо-сигналы от форшоков, формирующих пик энерговыделения в момент -3 ч, служат триггерами главных ударов, подобно тому как эхо-сигналы от главных ударов служат триггерами для афтершоков, формирующих пик в момент $+3$ ч. Не исключено, что по крайней мере какая-то часть сильных землетрясений возбуждается подобным образом.

5. Модуляция сейсмичности сфероидальными колебаниями Земли

5.1. Анализ сильнейших землетрясений

Напомним, что представление о кругосветном эхе, введённое в разделе 2, послужило основой для поиска кумулятивного эффекта в антиэпицентрах сильных землетрясений. Результат поиска показан на рис. 9. Видно, что эффект наблюдается лишь в совокупности весьма слабых землетрясений. При анализе выяснилось, что антиэпицентры землетрясений располагаются, как правило, в асейсмичных областях. Этим объясняется слабость эффекта. Однако более важно то, что асейсмичность антиэпицентров подсказала идею поиска кумулятивного эффекта в окрестностях эпицентров сильных землетрясений.

Мы вернулись к рис. 9 не только для того, чтобы напомнить логику развития исследований кумулятивного воздействия сходящихся сейсмических волн на горные породы, но и потому что кроме максимума активности слабых толчков, обнаруженного спустя 90 мин после репера, мы видим на рис. 9 загадочные осцилляции с квазипериодом около 50 мин. Эти осцилляции, обнаруженные случайно [35], не имеют прямого отношения к нелинейному антиподному эффекту. Но обратим внимание на то, что величина 50 мин близка к фундаментальному периоду сфероидальных колебаний ${}_0S_2$, которые были обнаружены Бенъофом в середине 1950-х годов после сильного землетрясения на Камчатке. Точное значение периода колебаний ${}_0S_2$ равно 54 мин (см.,

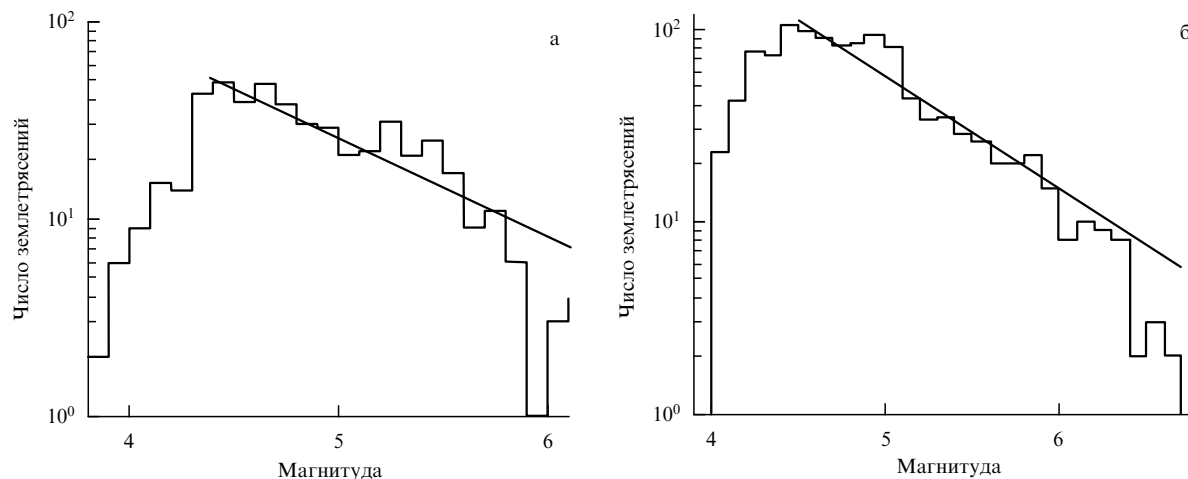


Рис. 15. Распределения афтершоков Суматра-Андаманского землетрясения (а) и землетрясения Тохоку (б) по магнитуде на интервале 50 ч после главных ударов в эпицентральных зонах радиусом 10° . Прямые линии аппроксимируют представительные части соответствующих каталогов.

например, [14, 45, 50]). Это даёт основание высказать гипотезу о модуляции сейсмичности сфероидальными колебаниями Земли. По соображениям, которые подробно изложены в разделах 3 и 4, для проверки данной гипотезы целесообразно использовать наблюдения афтершоков в окрестностях эпицентров сильных землетрясений, а отнюдь не в окрестностях антиэпицентров.

Рассмотрим афтершоки Суматра-Андаманского землетрясения [36]. Во введении, говоря о триггерах, мы упомянули о том, что вероятность критического перехода в динамической системе резко повышается при включении периодического внешнего воздействия, даже если сила воздействия относительно невелика [40]. Применительно к Суматра-Андаманскому землетрясению периодический триггер мы отождествим со сфероидальными колебаниями, которые были возбуждены главным ударом, и попытаемся отыскать резонансную частоту в спектре последовательности афтершоков. Резонансная частота фундаментальной моды ${}_0S_2$ равна 0,309 мГц, что соответствует периоду 54 мин.

Вначале отберём из каталога USGS все афтершоки на интервале 50 ч после Суматра-Андаманского землетрясения в эпицентральной зоне радиусом 10° и выделим из них так называемую представительную часть. (О важности использования представительной выборки при исследовании землетрясений см. [56].) На рисунке 15а показано распределение афтершоков по магнитуде, причём прямая линия $\lg N = 4,0 - 0,5M$ аппроксимирует представительную часть каталога, которая соответствует магнитудам $M > 4,4$ и содержит 357 событий. Здесь N — число афтершоков с данным значением M . Коэффициент корреляции между N и M равен 0,85 в представительной части. В дальнейшем нам потребуется аналогичное распределение для землетрясения Тохоку (рис. 15б). Прямая линия $\lg N = 4,67 - 0,58M$ аппроксимирует представительную часть каталога, которая соответствует магнитудам $M > 4,4$ и содержит 720 событий. Коэффициент корреляции в данном случае равен 0,916.

Поставим в соответствие каждой секунде интервала, выбранного для анализа, либо нуль, если, согласно каталогу, в данную секунду не было землетрясений в эпицентральной зоне, либо целое положительное число v_j , если произошло v_j землетрясений из представительной

части выборки. Для того чтобы провести спектральный анализ, представим динамику афтершоков в виде ряда

$$n(t) = \sum_{j=1}^N v_j \delta(t - t_j). \quad (7)$$

Здесь t_j — начало секундного интервала, которому соответствует число v_j , N — общее число таких интервалов. Представим функцию $n(t)$ в виде интеграла Фурье:

$$n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} n_{\omega} \exp(-i\omega t) \frac{d\omega}{2\pi}. \quad (8)$$

Спектральная компонента n_{ω} в выражении (8) определяется формулой

$$n_{\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} n(t) \exp(i\omega t) dt. \quad (9)$$

Подставляя (7) в (9), находим

$$n_{\omega} = \sum_{j=1}^N v_j \exp(i\omega t_j). \quad (10)$$

На рисунке 16 показана частотная зависимость интенсивности компонент Фурье $|n_{\omega}|^2$. Стрелкой отмечена частота сфероидальных колебаний ${}_0S_2$. Мы видим значительное повышение интенсивности в полосе частот 0,28 – 0,3 мГц, причём центр полосы отклоняется от частоты сфероидальных колебаний всего лишь на несколько процентов. Это свидетельствует о том, что сфероидальные колебания Земли, возбуждённые главным толчком, по-видимому, модулируют активность афтершоков. Указанное отклонение может быть связано с неточностью оценки интенсивности спектральных компонент, вычисленных по сравнительно короткой реализации последовательности землетрясений.

Подкрпим наше предположение анализом активности афтершоков после землетрясения в районе Тохоку. Частотная зависимость интенсивности компонент Фурье $|n_{\omega}|^2$ показана на рис. 17, где стрелкой, как и ранее, отмечена частота сфероидальных колебаний ${}_0S_2$. Чётко выраженный максимум на частоте 0,285 мГц отклоняется

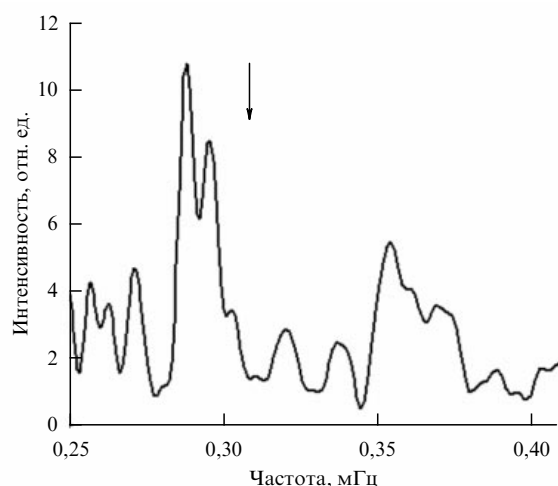


Рис. 16. Спектр активности афтершоков с магнитудой $M > 4,4$ на интервале 50 ч после Суматра-Андаманского землетрясения в эпицентральной зоне радиусом 10° . Стрелкой указана частота фундаментальной моды ${}_0S_2$ собственных колебаний Земли.

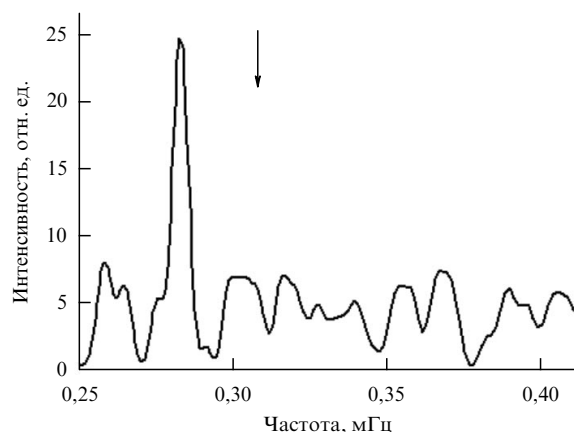


Рис. 17. Спектр активности афтершоков с магнитудой $M > 4,4$ в эпицентральной зоне радиусом 10° на интервале 50 ч после землетрясения в Тохоку. Стрелкой указана частота фундаментальной моды ${}_0S_2$ собственных колебаний Земли.

на несколько процентов от частоты сфероидальных колебаний, но это отклонение также может быть связано с неточностью оценки интенсивности спектральных компонент. Таким образом, мы получили ещё одно косвенное подтверждение гипотезы о модуляции сейсмической активности сфероидальными колебаниями Земли.

5.2. Статистический анализ

Дополним анализ конкретных событий статистическим анализом большого числа землетрясений, произошед-

ших за весьма длительный период. Используем данные о глобальной сейсмичности за 1973–2010 гг., содержащиеся в каталоге USGS. Эти данные были разделены на четыре группы по величине минимальной магнитуды землетрясений и на четыре группы по величине максимальной. Для каждой группы вычислен спектр по методике, описанной в разделе 5.1.

Результат показан на рис. 18, где указаны значения минимальной (рис. 18а–г) и максимальной (рис. 18д–з) магнитуд и соответствующие объёмы выборок. Тонкими

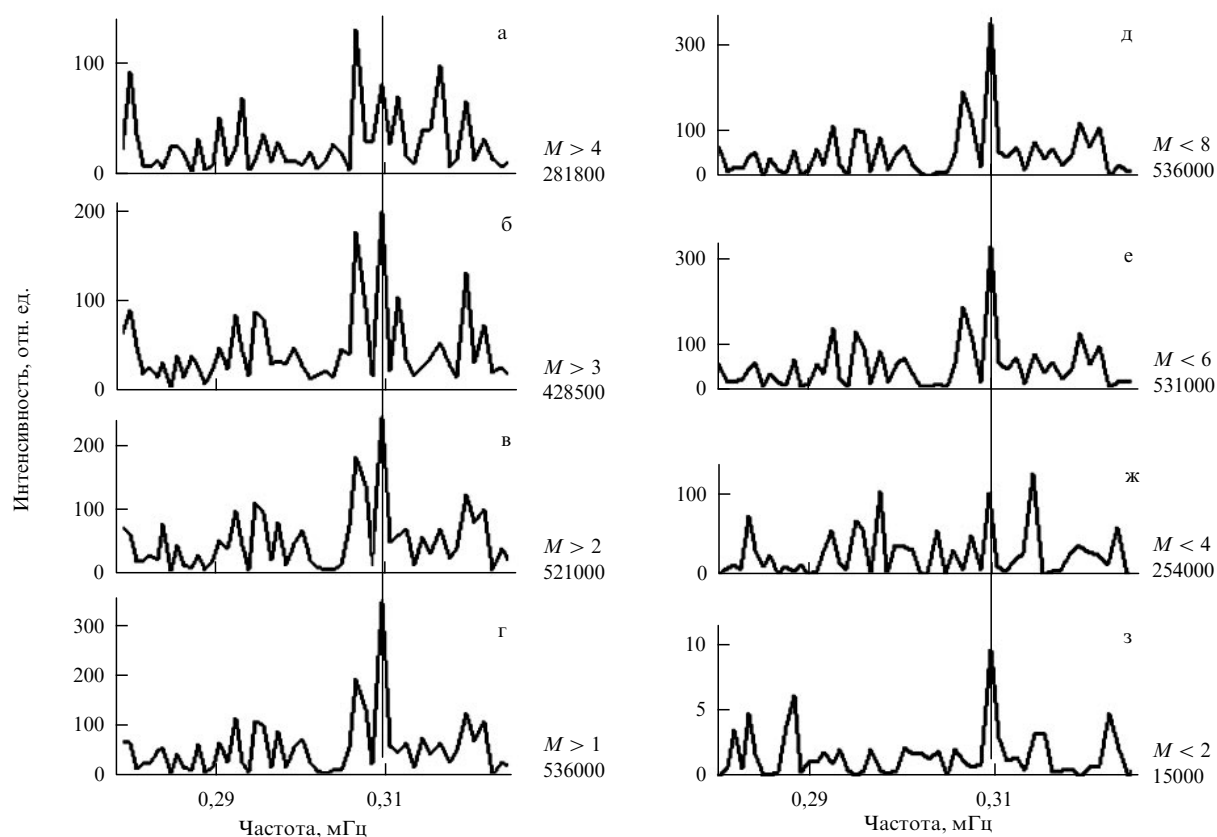


Рис. 18. Спектры глобальной сейсмичности с 1973 г. по 2010 г.

вертикальными линиями показана частота фундаментальной моды сфероидальных колебаний Земли. Картина спектра выглядит неясной только при $M < 4$ (рис. 18ж). На всех остальных спектрах явно доминирует пик на частоте 0,309 мГц ($M < 2$) или на частоте 0,307 мГц ($M > 4$) либо имеют место пики на обеих частотах ($M > 1, 2, 3$ и $M < 6, 8$). По-видимому, рис. 18 довольно убедительно свидетельствует о модуляции глобальной сейсмичности сфероидальными колебаниями Земли.

Пик на частоте 0,309 мГц совпадает с частотой фундаментальной моды колебаний Земли. Второй пик сдвинул вниз по частоте на 0,002 мГц, т.е. менее чем на 1%. Возможно, это небольшое искажение не имеет отношения к делу, а связано исключительно с ограниченностью общей выборки. Однако следует обратить внимание на интересную особенность рис. 18. Мы видим, что при переходе от рис. 18г ($M > 1$) к рис. 18а ($M > 4$) левая часть расщепленного спектра монотонно усиливается. Эта особенность напоминает перекачку энергии по спектру при вынужденных колебаниях нелинейной системы. Известно, что в нелинейной теории колебаний принцип суперпозиции неприменим. Спектр колебаний может отличаться от спектра внешнего воздействия, даже если оно строго синусоидально. В связи с этим возникает вопрос: не является ли небольшой сдвиг максимума в спектре афтершоков сильнеешего Суматра-Андаманского землетрясения по отношению к частоте вынуждающей силы (см. рис. 16) результатом нелинейного преобразования спектра сфероидальных колебаний Земли? Однако дать ответ на этот вопрос мы пока не можем.

В заключение данного раздела заметим, что для обнаружения спектрального пика на периоде 54 мин было обработано более полумиллиона событий, произошедших за несколько десятилетий. Этим практически исчерпывается доступная в настоящее время информация для исследования методом, основанным на анализе каталогов землетрясений. Дальнейшее исследование, необходимость которого диктуется нетривиальностью и новизной проблемы, следует проводить с помощью более тонких методов сейсмологии.

6. Обсуждение

После того как главный удар произошёл, в очаге землетрясения начинаются процессы релаксации. Образно можно сказать, что очаг постепенно остывает. Но это несколько не похоже на размеренное охлаждение нагретого однородного тела. Напротив, в очаге, который представляет собой сильнонелинейную структурированную систему, продолжают сложными процессами, одним из следствий которых является долго не утихающая активность афтершоков.

По-видимому, все афтершоки возникают спонтанно, за исключением афтершока, который возбуждается под воздействием кругосветного эха главного удара. Аномально большая магнитуда рассматривалась в работе [36] как отличительный признак, позволяющий выделить указанный афтершок среди других афтершоков. Поэтому будем называть условно такой афтершок сильным афтершоком (strong aftershock — SAS). Однако, судя по всему, аномально большая магнитуда является достаточным, но не обязательным признаком, так что аббре-

виатуру SAS можно расшифровывать как особый афтершок (special aftershock) или странный афтершок (strange aftershock).

Нельзя ли из наблюдения SAS извлечь полезную информацию о физических процессах в остывающем очаге сильного землетрясения? Упускать из виду такую возможность было бы неправильным, поскольку SAS относится к классу экстремальных событий и является нетривиальной реакцией динамической системы на импульсное внешнее воздействие. Перечислим параметры SAS, интересные для диагностики такого рода. Прежде всего, это геометрические параметры: расстояние между эпицентрами, взаимная ориентация эпицентров и разность глубин гипоцентров главного удара и SAS. Далее следуют два энергетических параметра: отношение магнитуды SAS к магнитуде главного удара и к средней магнитуде общего потока афтершоков во временной окрестности SAS. Наконец, необходимо обратить внимание на разность δt между временем срабатывания триггера, которым является фронт кругосветного эха, и временем прихода фронта в гипоцентр SAS.

Геометрические и энергетические параметры SAS нетрудно измерить стандартными методами сейсмологии, но измерение δt требует особого подхода. Грубая оценка величины δt даётся разностью между временем возбуждения SAS и расчётным временем распространения кругосветного сейсмического эха. Например, при Суматра-Андаманском землетрясении SAS возник спустя 3 ч 20 мин после главного удара. Если принять среднюю по трассе скорость поверхностных волн равной $3,7 \text{ км с}^{-1}$, то получим $\delta t = 20$ мин. Однако это лишь ориентировочная оценка, поскольку существует разброс скоростей поверхностных волн.

Не останавливаясь на деталях, мы хотим всего лишь подчеркнуть перспективность нелинейного зондирования очага землетрясения по данным о SAS. Особый интерес представляет величина δt , которую можно использовать как важный кинематический параметр, отражающий задержку нелинейной реакции очага на контролируемое внешнее воздействие. Полезно изучать зависимость δt от магнитуды землетрясения, глубины гипоцентра, а также от региональных особенностей литосферы.

В своё время в геофизике сложилось представление о том, что практически не встречается двух одинаковых геомагнитных бурь. Каждая имеет специфические черты, которые определяются неповторимым сочетанием огромного числа локальных и глобальных параметров околоземной среды. По-видимому, то же справедливо и по отношению к сильным землетрясениям, поскольку зарождение и активизация очага зависят от богатейшего разнообразия физических условий в сейсмогенерирующих структурах земной коры [57]. В связи с этим представляется важным изучить на опыте вероятность возбуждения SAS в зависимости от тектонической позиции и геологической структуры очага.

Теперь кратко обсудим кумулятивный эффект с точки зрения магнитологии. Ранее в рамках сейсмoeлектродинамики [58] изучалось возбуждение магнитных колебаний сейсмическими волнами, расходящимися из очага землетрясения. Вполне понятно, что экспериментальный поиск и теоретическое моделирование сильных импульсов магнитного поля, возбуждаемых при схлопывании сходящихся волн, представляют несомненный интерес.

Ещё одно важное направление исследований состоит в изучении антиподных магнитных аномалий, образовавшихся на Луне и Меркурии при ударном намагничивании горных пород в далёком прошлом.

Наконец, коснёмся вопроса о модуляции глобальной сейсмичности свободными колебаниями Земли. Спектры на рис. 18 представляются достаточно надёжным свидетельством реальности эффекта модуляции. Нельзя ли использовать обнаруженное явление в астросейсмологии, в частности в сейсмологии пульсаров? Казалось бы, почему не попытаться выделить резонансные пики в последовательности пульсаротрясений и тем самым оценить периоды упругих колебаний пульсара? Однако соответствующие ряды наблюдений с достаточной длиной пока отсутствуют.

7. Заключение

Известно, что в науках существуют "вечные вопросы", которые постоянно вызывают интерес и стимулируют поиск того или иного ответа. Такие вопросы есть и в геофизике. К ним относится, например, вопрос об уравнении состояния вещества в земном ядре, а также широкий комплекс нерешённых вопросов физики землетрясений. Наиболее трудным считается вопрос о механизме глубокофокусных землетрясений. Такие землетрясения иногда происходят не в литосфере, как обычно, а в пластичных слоях мантии. Интерес к глубокофокусным землетрясениям активизировался недавно в связи с землетрясением 24 мая 2013 г., магнитуда которого равнялась $M = 8,2$, эпицентр находился в Охотском море, а гипоцентр — на глубине 600 км.

Проблематика литосферных землетрясений, гипоцентры которых находятся на глубинах, меньших примерно 70 км, широко обсуждается геофизическим сообществом. Пока не удалось построить самосогласованную теорию землетрясений исходя из первых принципов. Богатейший материал наблюдений обычно анализируется в рамках феноменологических моделей, имитирующих отдельные стороны процесса подготовки и образования магистрального разрыва сплошности горных пород. В русле этой тенденции мы использовали в настоящей статье теорию катастроф, а также идеи и концепции теории флуктуационных и критических явлений для анализа форшоков и афтершоков сильных землетрясений.

Мы сосредоточили внимание на простых и универсальных свойствах критических переходов. Речь идёт о повышении реактивности динамических систем в околопороговой области, понижении частот колебаний для некоторых мод, увеличении корреляционных длин, а также о других аномальных явлениях, родственных критической опалесценции. В отсутствие достаточно полной теории землетрясений это естественно использовать как основу для анализа наблюдений. В результате удалось обнаружить ряд нетривиальных свойств очага землетрясения до и после образования магистрального разрыва. В ходе анализа форшоков и афтершоков введены представления о кругосветном сейсмическом эхе, о кумулятивном воздействии на очаг сходящихся поверхностных волн и о модуляции глобальной сейсмичности свободными колебаниями Земли. Дальнейшее исследование в этом направлении представляется интересным и перспективным.

Проблема форшоков многократно обсуждалась автором с Л.Е. Собисевичем и А.Л. Собисевичем, а проблема афтершоков — с А.Д. Завьяловым. Значительную помощь в исследованиях и в подготовке статьи к публикации оказали О.Д. Зотов и И.П. Лавров. Автор выражает всем им глубокую благодарность. Работа выполнена в рамках Программы № 18 фундаментальных исследований Президиума РАН и РФФИ (проекты 13-05-00066, 15-05-00491).

Список литературы

1. Bolt B A *Earthquakes* (San Francisco: W.H. Freeman, 1978); Болт Б *Землетрясения* (М.: Мир, 1981)
2. Richter C F *Elementary Seismology* (San Francisco: W.H. Freeman, 1958); Рихтер Ч Ф *Элементарная сейсмология* (М.: ИЛ, 1963)
3. Kasahara K *Earthquake Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981); Касахара К *Механика землетрясений* (М.: Мир, 1986)
4. Bath M *Tectonophysics* **2** 483 (1965)
5. Gutenberg B, Richter C F *Bull. Seismol. Soc. Am.* **34** 185 (1944)
6. Mogi K *Earthquake Prediction* (Tokyo: Academic Press, 1985); Мого К *Предсказание землетрясений* (М.: Мир, 1988)
7. Соболев Г А *Основы прогноза землетрясений* (М.: Наука, 1993)
8. Завьялов А Д *Природа* (5) 29 (2005)
9. Dunbar P et al. *Geomatics Natural Hazards Risk* **2** 305 (2011)
10. Крылов А Н *УФН* **1** 101 (1918)
11. Лиит Л Д *УФН* **31** 264 (1947); Leet L D *Am. Scientist* **34** 198 (1946)
12. Сытинский А Д *УФН* **111** 367 (1973); Sytinskii A D *Sov. Phys. Usp.* **16** 740 (1973)
13. Бучаченко А Л и др. *УФН* **166** 1023 (1996); Buchachenko A L et al. *Phys. Usp.* **39** 959 (1996)
14. Кузнецов В В *УФН* **167** 1001 (1997); Kuznetsov V V *Phys. Usp.* **40** 951 (1997)
15. Фридман А М, Поляченко Е В, Насырканов Н Р *УФН* **180** 303 (2010); Fridman A M, Polyachenko E V, Nasyrkanov N R *Phys. Usp.* **53** 291 (2010)
16. Бучаченко А Л *УФН* **184** 101 (2014); Buchachenko A L *Phys. Usp.* **57** 92 (2014)
17. Калашников А Г *Тр. Геофиз. инст. АН СССР* **25** 180 (1954)
18. Fraser-Smith A C et al. *Geophys. Res. Lett.* **17** 1465 (1990)
19. Соболев Г А, Пономарев А В *Физика землетрясений и предвестники* (М.: Наука, 2003)
20. Hattori K *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* **15** 329 (2004)
21. Pulnits S *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* **15** 413 (2004)
22. Dovbnya B V *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **69** 1765 (2007)
23. Hayakawa M *Sensors* **7** 1141 (2007)
24. Собисевич Л Е, Собисевич А Л *Вестник Отд. наук о Земле РАН* **2** 202 (2010)
25. Собисевич Л Е, Канониди К Х, Собисевич А Л *Докл. РАН* **435** 548 (2010); Sobisevich L E, Kanonidi K Kh, Sobisevich A L *Dokl. Earth Sci.* **435** 1627 (2010)
26. Гульельми А В, Зотов О Д *Физика Земли* (2) 84 (2012); Guglielmi A V, Zotov O D *Izv. Phys. Solid Earth* **48** 171 (2012)
27. Зотов О Д, Гульельми А В, Собисевич А Л *Физика Земли* (6) 139 (2013); Zotov O D, Guglielmi A V, Sobisevich A L *Izv. Phys. Solid Earth* **49** 882 (2013)
28. Thom R *SIAM Rev.* **19** 189 (1977)
29. Gilmore R *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers* (New York: Wiley, 1981); Гилмор Р *Прикладная теория катастроф* (М.: Мир, 1984)
30. Арнольд В И *Теория катастроф* (М.: Наука, 1990); Arnold V I *Catastrophe Theory* (Berlin: Springer-Verlag, 1992)
31. Зубков Л А, Романов В П *УФН* **154** 615 (1988); Zubkov L A, Romanov V P *Sov. Phys. Usp.* **31** 328 (1988)
32. Гульельми А В *УФН* **158** 605 (1989); Guglielmi A V *Sov. Phys. Usp.* **32** 678 (1989)
33. Guglielmi A V, Pokhotelov O A *Geoelectromagnetic Waves* (Bristol: Institute of Physics Publ., 1996)
34. Guglielmi A, Zotov O, arXiv:1207.0365
35. Гульельми А В, Зотов О Д *Физика Земли* (1) 3 (2013); Guglielmi A V, Zotov O D *Izv. Phys. Solid Earth* **49** 1 (2013)

36. 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)
37. Гульельми А В и др. *Физика Земли* (4) 43 (2014); Guglielmi A V et al. *Izv. Phys. Solid Earth* **50** 501 (2014)
38. Horsthemke W, Lefever R *Noise-Induced Transitions* (Berlin: Springer-Verlag, 1984)
39. Kramers H A *Physica* **7** 284 (1940)
40. Smelyanskiy V N, Dykman M I, Golding B *Phys. Rev. Lett.* **82** 3193 (1999)
41. Авсюк Ю Н *Приливные силы и природные процессы* (М.: ОИФЗ РАН, 1996)
42. Адушкин В В, Турунтаев С Б *Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы)* (М.: ИНЭК, Институт динамики геосфер РАН, 2005)
43. Sobolev G A *Natural Hazards Earth Syst. Sci.* **11** 445 (2011)
44. Гуревич А В, Цедиллина Е Е *Сверхдальнее распространение коротких радиоволн* (М.: Наука, 1979); Gurevich A V, Tsedilina E E *Long Distance Propagation of HF Radio Waves* (Berlin: Springer-Verlag, 1985)
45. Жарков В Н *Физика земных недр* (М.: Наука и образование, 2012)
46. Градштейн И С, Рыжик И М *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений* (М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962); Gradshteyn I S, Ryzhik I M *Tables of Integrals, Series and Products* (New York and London: Academic Press, 1965)]
47. Бабич В М, Булдырев В С *Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн* (М.: Наука, 1972); Babič V M, Buldyrev V S *Short-Wavelength Diffraction Theory: Asymptotic Methods* (Berlin: Springer-Verlag, 1991)
48. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Строение и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1975) с. 711
49. Фейнман Р *УФН* **91** 29 (1967); Feynman R P *Science* **153** 699 (1966); "The development of the space-time view of quantum electrodynamics", Nobel Lecture, December 11, 1965. Preprint les Prix Nobel en 1965 (Stockholm: The Nobel Foundation, 1966)
50. Aki K, Richards P G *Quantitative Seismology* (San Francisco: W.H. Freeman, 1980); Аки К, Ричардс П *Количественная сейсмология* (М.: Мир, 1983)
51. Альперт Я Л *УФН* **71** 369 (1960); Al'pert Ya L *Sov. Phys. Usp.* **3** 479 (1961)
52. Samson J C, Yeung K L *Planet. Space Sci.* **34** 1133 (1986)
53. Schultz P H, Gault D E *Moon* **12** 159 (1975)
54. Blewett D T et al. *Icarus* **209** 239 (2010)
55. Lü J et al. *Planet. Space Sci.* **59** 1981 (2011)
56. Смирнов В Б *Вулканоология и сейсмология* (4) 93 (1997)
57. Рогожин Е А *Росс. журн. наук о Земле* **2** (1) 37 (2000)
58. Гульельми А В *УФН* **177** 1257 (2007); Guglielmi A V *Phys. Usp.* **50** 1197 (2007)

Foreshocks and aftershocks of strong earthquakes in the light of catastrophe theory

A.V. Guglielmi

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

In this review, general ideas and specific results from catastrophe theory and the theory of critical phenomena are applied to the analysis of strong earthquakes. Aspects given particular attention are the sharp rise in the fluctuation level, the increased reactivity of dynamical systems in the near-threshold region, and other anomalous phenomena similar to the critical opalescence. In the lack of a sufficiently developed theory of earthquakes, this appears to be a valid approach to the analysis of observations. The study performed brought out some nontrivial properties of a strong-earthquake source that manifest themselves both before and after the main rock discontinuity forms at the mainshock. In the course of the analysis of the foreshocks and aftershocks, such concepts as the round-the-world seismic echo, the cumulative effect of converging surface waves, and global seismicity modulation by the Earth's free oscillations are introduced. Further research in this direction is likely to be interesting and promising.

Keywords: earthquake, critical phenomena, bifurcation, surface waves, spheroidal oscillations, cumulative effect, modulation of seismicity

PACS numbers: **91.30. – f**, 91.30.Px

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201504f.0415

Bibliography — 58 references

Received 23 May 2014

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (4) 415–429 (2015)

Physics – Uspekhi **58** (4) (2015)