



Казахский Национальный Исследовательский Технический
Университет,
Институт Геологии и Нефтегазового Дела
Кафедра “Геофизика и Сейсмология”

Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

Лекция 4

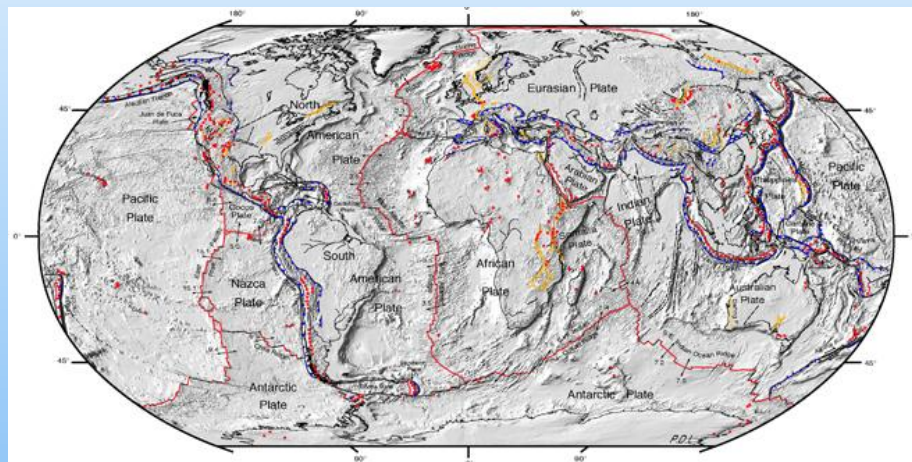
**Природа и прогноз форшоков.
Форшоки и сейсмические затишья.**

**Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК**

Природа форшоков

Форшоки — это сравнительно слабые и умеренные землетрясения, предшествующие более сильному и разрушительному. Термин *форшок* (от англ. *foreshock*) обозначает землетрясение, происходящее до основного сейсмического события и связанное с ним по времени и месту. Важно отметить, что отличить форшоки, основное землетрясение и последующие толчки (афтершоки) возможно только **задним числом, после завершения всей сейсмической активности в данном районе.**

До сих пор ученым не удавалось ответить на ряд принципиальных вопросов: почему не всем землетрясениям предшествуют форшоки, какова их природа и можно ли с помощью форшоков предсказать более разрушительное землетрясение.



Карта тектонических плит. © NASA

Новые результаты исследований, обнародованных в журнале «Нейча геосаенс», пролило свет на некоторые из этих вопросов. В частности, выяснилось, что форшоки возникают при медленном сближении двух тектонических плит, столкновение которых и вызывает землетрясение.

Вместе с тем, по мнению специалиста в области сейсмологии Института наук о Земле в Гренобле (Франция) Вирджиния Дюран, форшоки не являются причиной землетрясений, как считалось ранее, а лишь являются его предвестником.

Изучив несколько десятков землетрясений магнитудой 6,5 и более, произошедших в период между 1999 и 2011 годами, Вирджиния Дюран и ее коллеги выяснили, что каждому из них предшествовал форшок и сопутствующее ему малозаметное увеличение сейсмоактивности, которое начиналось примерно за два месяца до самого землетрясения. Примерно за 20 дней до кульминации сейсмоактивность заметно увеличивалась, а за

Природа форшоков

два дня до землетрясения начинала набирать обороты каждые несколько часов.

Тем не менее, этот принцип не работает в случае землетрясений, происходящих вне границ тектонических плит, при которых обычно не наблюдаются форшоки.

Специфическая активизация ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний за несколько часов до сильных землетрясений, ранее отмеченная в литературе, стимулировала изучение особенностей форшоковой активности земной коры в эпицентральных зонах. Установлено, что форшоки активизируются примерно за 3 часа до основного удара, что в целом коррелирует с повышением УНЧ-активности и могут выступать триггерами главных ударов за счёт кумулятивного эффекта *сходящихся поверхностных волн**. Также зафиксировано снижение частоты флуктуаций форшоковой активности на заключительном этапе, что может свидетельствовать о "смягчении мод" при приближении к точке разрушения в контексте теории катастроф.

Происхождение

Форшоковая активность замечена примерно у 40% всех средних и у 70% всех больших (магнитуда $>7,0$) землетрясений. Они происходят за минуты, дни или большие промежутки времени до основного толчка. Например, землетрясение на Суматре (2002) с магнитудой 7,3 произошло за 2 года до землетрясения 2004 года с магнитудой 9,1.

Но некоторые мега-землетрясения (магнитуда $>8,0$) показывают полное отсутствие форшоковой активности, как, например, Ассамское землетрясение (1950) с магнитудой 8,7.

Механизм форшоков

Предполагается, что форшоки — часть процесса подготовки сильного землетрясения. По одной из моделей всё происходит каскадно — маленькое землетрясение запускает всё большие по силе, что продолжается вплоть до основного толчка. Между тем как, анализ некоторых форшоков показал, что, вместе с повторными толчками (афтершоками), они — часть единого процесса разрядки в зоне разлома. Это подтверждается наблюдаемой взаимосвязью между частотой форшоков и частотой повторных толчков у землетрясения.

Прогноз землетрясений

Увеличение сейсмической активности в определённой зоне используется как один из методов прогноза землетрясений. Однако, он не очень эффективен. Часть землетрясений не имеют форшоков, значительная часть небольших землетрясений форшоками не являются — всё это ведёт к ложным срабатываниям этого механизма прогнозов.

Природа форшоков

Как известно, слабые сейсмические толчки — форшоки и афтершоки — традиционно сопровождают сильные землетрясения. Форшоки предшествуют главному удару и сегодня рассматриваются как одни из наиболее перспективных предвестников сильных сейсмособытий. Геологи и геофизики долгое время пытались использовать их для прогнозирования места, времени и силы основного землетрясения. Однако это по-прежнему остаётся сложной задачей: форшоки не всегда удаётся надёжно выделить, так как их характеристики сильно варьируют от случая к случаю. Кроме того, до сих пор остаются неясными физические механизмы их возникновения и связь с главными толчками.

Недавнее исследование под руководством профессора Надава Ветцлера из Геологической службы Израиля дало важные эмпирические результаты. Учёные проанализировали более 400 землетрясений с магнитудой 7 и выше, используя данные обзорного каталога Геологической службы США (USGS — United States Geological Survey). С помощью *трёх кластерных математических алгоритмов** удалось надёжно отделить форшоки от фоновой сейсмической активности. Это позволило выявить, что от 15 до 43% сильных землетрясений сопровождаются хотя бы одним форшоком. Причём в 13–26% случаев магнитуда форшока отличается от главного удара менее чем на две единицы.

Исследование также показало, что форшоки чаще фиксируются при разрывах вдоль границ тектонических плит, нежели внутри литосферных блоков. Были выявлены определённые типы разломов и трещин, более склонные к генерации форшоков. Кроме того, установлена корреляция: сильным афтершокам, как правило, предшествуют и более мощные форшоки. Это может быть связано с количеством активных разломов или с достижением критических уровней механического напряжения, необходимых для развития каскадов сейсмических событий.

Впервые была установлена пространственная закономерность форшоковой активности: она выше в западной части Тихоокеанского сейсмического пояса (Вануату, Соломоновы, Алеутские, Курильские острова), чем в восточной (Мексика, Южная Америка). Возможно, это объясняется различиями в возрасте и строении плит — более толстая литосфера в западной части обладает развитой сетью трещин и разломов, способствующих форшоковой активности.

Таким образом, работа Ветцлера и его коллег внесла значимый вклад в понимание форшоковой активности, позволив лучше локализовать потенциально опасные зоны и углубить представления о механизмах подготовки сильных землетрясений

Природа форшоков

На трансформных разломах* форшоки происходят по схожим сценариям, что позволяет с достаточной точностью определять место и время будущих землетрясений там.

Изучение особенностей сейсмического режима с целью выявления возможных предвестников сильных землетрясений сопряжено с большими принципиальными и техническими трудностями. В условиях значительных флуктуаций сейсмического процесса на разных его энергетических уровнях получаемые здесь результаты во многом зависят от исходных посылок, которых придерживается тот или иной исследователь, принятой им методики анализа фактических данных, качества и представительности этих данных и других причин.

Некритическое отношение к таким результатам в ряде случаев приводит к диаметрально противоположным выводам по одним и тем же вопросам, что вызывает обоснованные сомнения в их достоверности. Так, изучая общие закономерности сейсмического режима Курило-Камчатской зоны, С. А. Федотов отмечал, что моменту возникновения сильного ($M \geq 7.4$) землетрясения предшествует длительная (15-20 лет) стадия форшоковой активизации области его очага, характеризующаяся систематическим ростом со временем как сейсмической активности A_{10} , так и суммарной высвобождаемой сейсмической энергии.

В то же время известно большое число работ, авторы которых утверждают, что сильные землетрясения предваряются сейсмическими затишьями, в течение которых существенно уменьшается число наиболее крупных толчков в последовательностях по сравнению с предыдущим периодом.

Существенно меньшей, следовательно, должна быть и сейсмическая энергия, высвобождаемая в единицу времени. Наиболее показательным в данном случае то, что ***длительность сейсмических затиший перед сильными событиями и длительность стадии форшоковой активизации приблизительно совпадают.***

Обе эти особенности сейсмического режима в настоящее время относят к достоверно установленным предвестникам сильных землетрясений и широко используют их в практике прогноза.

Форшоки и сейсмические затишья

Между тем, обладая прямо противоположными свойствами, они взаимно несовместимы. Естественно возникает вопрос, действительно ли обе эти особенности режима обусловлены процессами подготовки сильных землетрясений, и какой из них в этом случае принадлежит доминирующая роль.

Для обоснования принятой в работе методики анализа данных напомним коротко основные признаки, которыми характеризуются сейсмические затишья.

Как отмечалось в публикациях, информативными в данном случае являются толчки, энергетический класс которых меньше энергетического класса предстоящего сильного события не более чем на 3-4 единицы. Их дефицит по сравнению со средней долговременной нормой наблюдается на площади, значительно (в несколько раз или на несколько порядков) превосходящей собственные размеры очага готовящегося землетрясения.

Время проявления рассматриваемого предвестника оценивается в несколько месяцев для землетрясений с $K = 12-14$ и от 6 до 19 лет для землетрясений с $K = 15-17$ ($M = 6,0 - 7,3$). **Область сейсмического затишья формируется постепенно за счет миграции эпицентров информативных толчков со скоростью 7-20 км/год в стороны от эпицентра будущего землетрясения.**

К сожалению, перечисленные выше оценки длительности существования и размеров зон сейсмических затиший весьма субъективны и не внушают доверия. В самом деле, в соответствии с законом повторяемости землетрясений среднее число информативных (по энергетическому критерию) событий, приходящихся на каждое прогнозируемое землетрясение, должно быть сравнительно невелико (~40-120).

Основная их часть, очевидно, приходится на «нормальную» стадию сейсмического процесса, составляющую не менее 90 % времени полного сейсмического цикла. Следовательно, информацию о сильном землетрясении, готовящемся в том или ином районе, в действительности могут нести в себе в лучшем случае около десятка событий, по которым необходимо не только установить положение зоны значимого их дефицита, но и проследить динамику развития этой зоны в пространстве и времени.

Ясно, что в общем случае эту задачу невозможно строго решить даже ретроспективно. Более того, с учетом сказанного сам факт существования сейсмических затиший, причинно связанных с сильными землетрясениями, едва ли можно признать окончательно доказанным.

Форшоки и сейсмические затишья

Методика анализа данных (Н. Д. Жалковский, В. И. Мучная, 1990) принятая по одному из сейсмических регионов, заключается в следующем.

С учетом результатов исследований пространственных и временных распределений афтершоков по региональным каталога были отобраны землетрясения с магнитудой $4,5 \leq M \leq 7,5$ при условии, что их очаги по месту и времени возникновения (включая не менее 10 лет предыстории) находятся за пределами областей явного влияния предыдущих более сильных событий.

Землетрясения с $M > 7,5$ не рассматривались, так как время их подготовки может превышать продолжительность периода наблюдений.

С эпицентром* каждого отобранного землетрясения совмещались центры двух круговых площадок, в пределах которых в дальнейшем анализировался временной ход сейсмической активности в предшествующий этим землетрясениям период.

Диаметр первой площадки равнялся средней длине зоны форшоков, характерной для землетрясений данной магнитуд, диаметр второй - вдвое больше. *Здесь область очага землетрясения и область распространения его форшоков в первом приближении совпадают.*

Так как размеры зоны сейсмического затишья значительно превышают размеры очага будущего землетрясения, а сам очаг возникает в области начала формирования этой зоны, можно сделать два вывода: а) обе круговые площадки полностью находятся внутри зоны затишья; б) они расположены в той её части, где продолжительность затишья максимальна.

Период наблюдений, начиная с момента главного толчка, был разбит на последовательные месячные интервалы. Для каждого интервала методом суммирования рассчитывалось среднее значение сейсмической активности A_{10} на каждой из двух круговых площадок*.

В расчёты включались только сейсмические события с энергетическим классом не ниже K_{\min} , который для разных землетрясений варьировал от 9 до 12.

Наклон графика повторяемости событий (параметр γ) принимался постоянным и равным среднему значению — **0,48**.

В результате для каждого землетрясения был построен набор графиков, отражающих изменение сейсмической активности на обеих площадках во времени — с учётом различий в мощности толчков.

Форшоки и сейсмические затишья

Как и следовало ожидать, индивидуальные графики сейсмической активности оказались слабо выраженными. Это особенно характерно для землетрясений с небольшой магнитудой ($M < 6$) и при высоких пороговых значениях K_{\min} .

В связи с этим было принято решение выполнить осреднение графиков по следующему принципу:

Все графики были разделены на три группы в зависимости от магнитуды главного толчка:

- $4,5 < M < 5,5$;
- $5,5 < M < 6,5$;
- $6,5 < M < 7,5$

В каждой группе графики дополнительно объединялись в подгруппы с одинаковым значением K_{\min} .

Для каждой подгруппы графики совмещались, и значения сейсмической активности A_{10} усреднялись по тем же месячным интервалам, что и в индивидуальных графиках.

Несмотря на объединение большого количества данных, итоговые сводные графики оставались сильно фрагментированными. Поэтому для повышения наглядности к ним был применён метод скользящего среднего*: значения усреднялись по трёммесячным интервалам с шагом в один месяц

В качестве примера на рис. 1 приведен сводный график временного хода сейсмической активности A_{10} на малой и большой площадках для землетрясений с $M = 6,0 \pm 0,5$ при $K_{\min} = 10$.

Анализ полученных графиков показал, что *единственной достаточно четко выраженной и устойчивой их особенностью является резкий всплеск активности A_{10} на временах, непосредственно примыкающих к моменту главного толчка*. Прослеживается он почти па всех графиках независимо от магнитуды главного события и энергетического уровня землетрясений, используемых при вычислении A_{10} .

Лишь на графике для землетрясений с $M = 6,0 \pm 0,5$ при $K_{\min} = 9$ этот всплеск практически отсутствует. Отметим также, что всплеск активности, приуроченный к моменту главного толчка, на малой площадке систематически более высокий, чем на большой. На остальной части любого графика никаких закономерностей в распределении экстремумов обнаружить не удастся. В среднем мало различаются между собой и значения активности па большой и малой площадках.

Анализ причин локальных максимумов на графиках, включая интервалы, непосредственно предшествующие главному толчку, показал, что в большинстве случаев они связаны с повышенной сейсмической активностью на обеих площадках. Как правило, такая активизация обусловлена возникновением сравнительно крупных предшествующих толчков в пределах этих площадок, происходивших незадолго до основного землетрясения.

Форшоки и сейсмические затишья

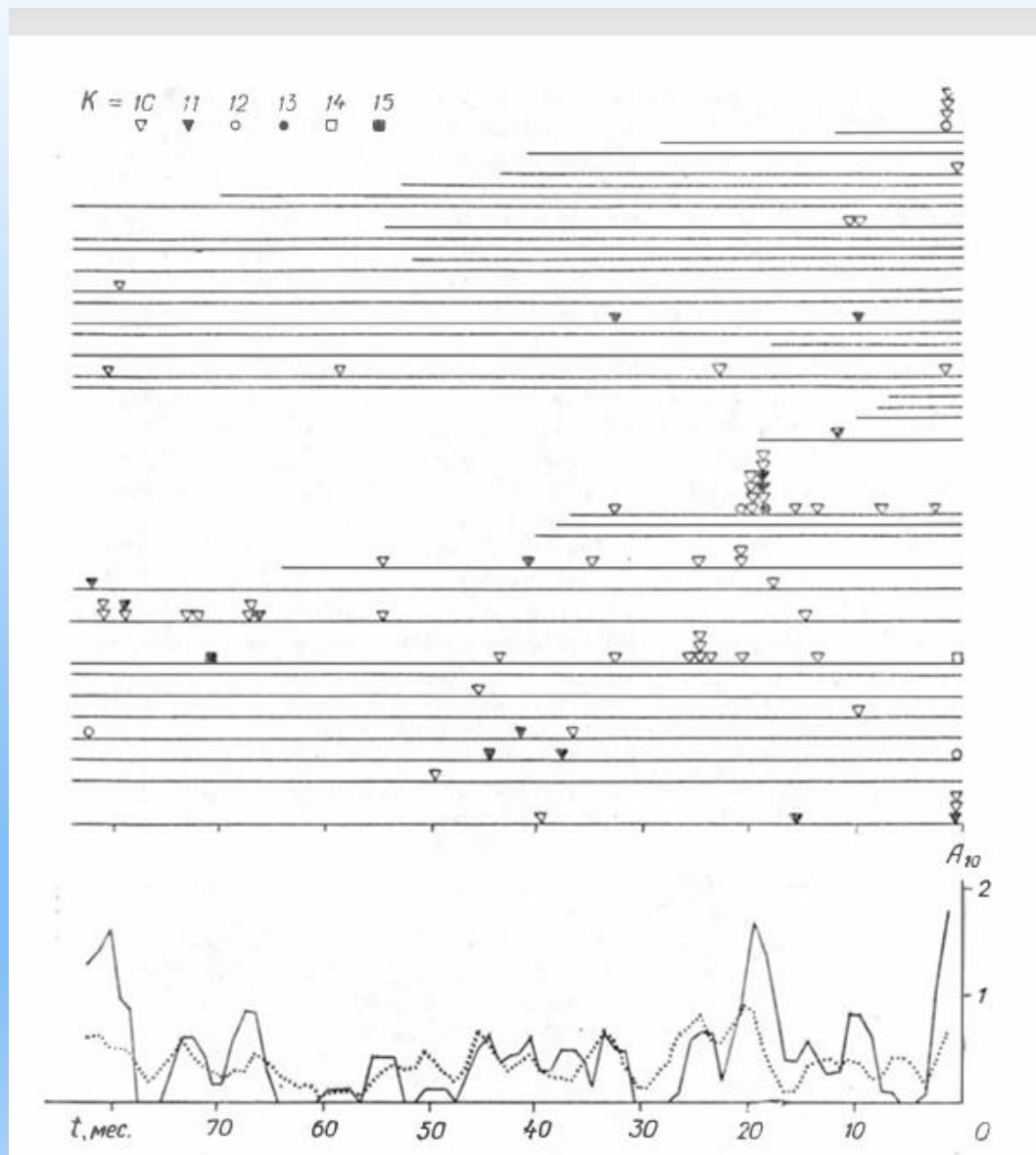


Рис. 1. Сводный график временного хода сейсмической активности A_{10} на малой (сплошная линия) и большой (точки) площадках для землетрясений с $M=6,0 \pm 0,5$; $K_{\min}=10$.

Вверху показаны индивидуальные последовательности землетрясений, по которым построен сводный график на малой площадке; в пределах месячного интервала события расположены в хронологическом порядке снизу вверх.

Нижняя часть рисунка демонстрирует:

Суммарную (сводную) сейсмическую активность в зависимости от времени на двух масштабах:

- Малая площадка — отображена сплошной линией;
- Большая площадка — отображена отдельными точками.

Эти кривые отражают усреднённый темп накопления землетрясений или сейсмической энергии в окрестности события с заданной магнитудой $M=6,0 \pm 0,5$

Форшоки и сейсмические затишья

Хотя по условиям отбора последовательностей магнитуда этих толчков меньше магнитуды главного землетрясения, значительная их часть сопровождается явно выраженными сериями форшоков.

Из-за высокой частоты форшоковой активности на начальной стадии её проявления, даже одна такая серия в пределах анализируемой последовательности может вызвать заметный всплеск сейсмической активности на сводном графике (рис. 1). **Чем сильнее главное землетрясение, тем сильнее могут быть предыдущие толчки, а значит, и сопровождающие их серии афтершоков.** Следовательно, тем большей амплитудой и длительностью могут характеризоваться отдельные максимумы на рассматриваемых графиках.

Что касается локальных минимумов, то их распределение, независимо от магнитуды главного землетрясения и величины K_{min} на всем анализируемом нами отрезке, времени довольно хаотично. Поэтому отождествлять какой-либо из них с сейсмическими затишьями, связанными с процессами подготовки главного события, на наш взгляд, нет оснований. Время, в течение которого проявляются долгосрочные предвестники землетрясений с M равной 5, 6 и 7 составляет около 0,5, 2 и 5 лет соответственно. Однако на указанных временах в поведении графиков никаких характерных особенностей, кроме уже отмеченной, не наблюдается. Все это говорит о том, что сейсмические затишья, как индикаторы предстоящих сильных землетрясений, вероятнее всего не существуют.

Остановимся теперь более подробно на закономерном всплеске активности, наблюдающемся непосредственно перед главным событием. Так как принципиальных различий между графиками, построенными для землетрясений одного и того же магнитудного диапазона при разных значениях K_{min} , не отмечается, то целесообразно было провести их общее осреднение. Результаты такого осреднения для каждого диапазона значений магнитуды M представлены на рис. 2.

Нетрудно видеть, что на начальном временном интервале все три графика ведут себя одинаково. Деление этого интервала на более меньшие части показывает, что по мере приближения к моменту главного толчка текущие значения сейсмической активности закономерно и быстро возрастают. Это особенно хорошо видно на врезках к обобщенным графикам (см. рис. 2), где начальная их часть представлена в билогарифмических координатах.

Форшоки и сейсмические затишья

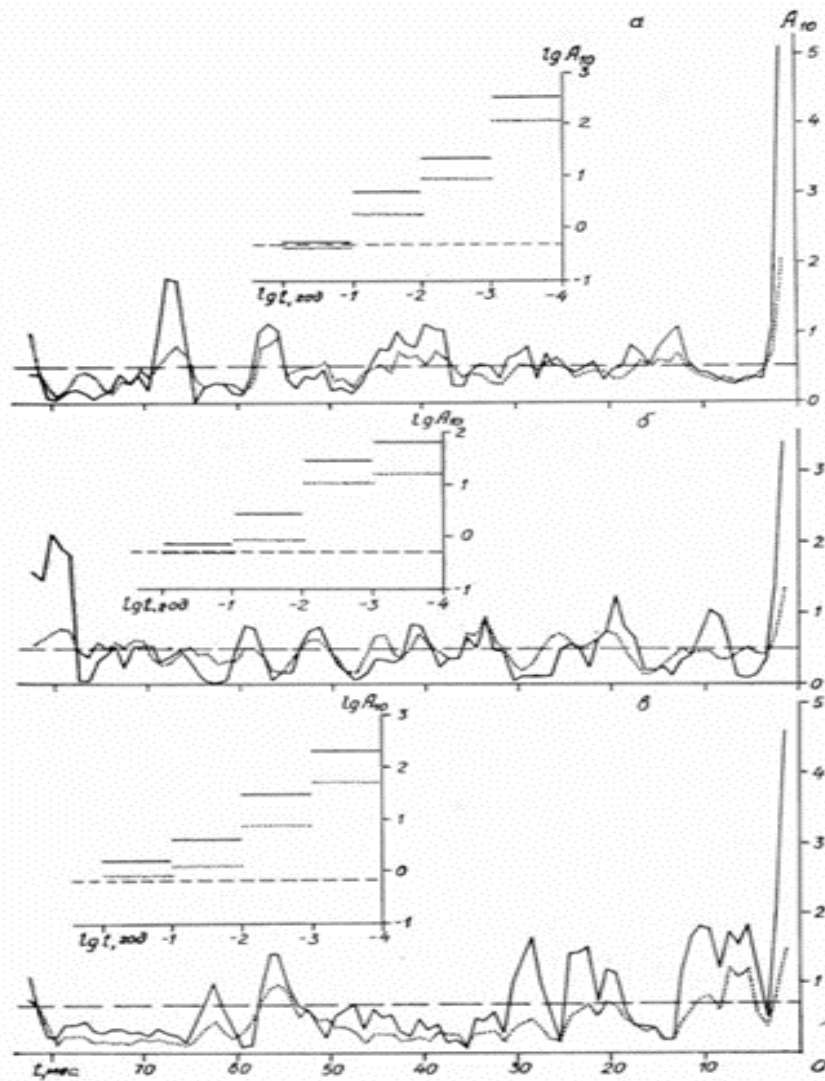


Рис. 2. Обобщенные графики временного хода сейсмической активности A_{10} на малой (сплошная линия) и большой (точки) площадках для землетрясений с $M = 0 \pm 0,5$ (а) ; $M = 6,0 \pm 0,5$ (б) ; $M = 7,0 \pm 0,5$ (в) . На врезках - начальная часть графиков в билогарифмической системе координат. Пунктиром показано среднее значение A_{10} на малой площадке за весь рассматриваемый отрезок времени

Форшоки и сейсмические затишья

Например, в интервале от 10^{-4} до 10^{-3} года (примерно от 0,9 до 9 часов) сейсмическая активность на малой площадке превышает средний уровень более чем в 100 раз. При ещё более коротких временных интервалах активность продолжает расти, но из-за малой длительности этих интервалов оценки становятся менее надёжными.

Одновременно увеличивается и отношение активности малой площадки к активности большой. В самой начальной части графиков это отношение составляет около 3–4, что близко к отношению площадей большой и малой площадок (4:1). Из этого можно заключить, что основной вклад в рост сейсмической активности в этот период вносит малая площадка.

Естественно ожидать, что для наиболее сильных землетрясений указанная аномалия активности за счет мощных серий форшоков, сопровождающих предшествующие этим землетрясениям крупные толчки, будет более значительной если не по амплитуде (рост которой ограничивается соответствующей нормировкой числа событий на площадь), то, по крайней мере, по продолжительности. Подтверждением сказанному могут служить в какой-то мере, графики на рис. 2 при более внимательном их рассмотрении.

Интервал времени (годы)	M=5.0		M=6.0		M=7.0	
	n	%	n	%	n	%
10-4÷10-3	164	~5	48	~4	19	~11
10-3÷10-2	164	~5	48	~10	19	~16
10-3÷10-1	164	~13	48	~17	19	~32
10-1÷100	165	~34	45	~35	19	~95

Таблица: Общее число n последовательностей землетрясений и та часть из них (в %), которая имеет события на указанных временных интервалах

Форшоки и сейсмические затишья

Таким образом, можно констатировать, что сильные землетрясения проявляют определенную склонность возникать на площадях с заметно повышенной текущей активностью. Но этот вывод, очевидно, тривиален. Чем больше землетрясений происходит на заданном временном интервале, тем больше вероятность того, что среди них окажется и сильное. Это - прямое следствие закона повторяемости*.

Для окончательного выяснения прогностической ценности отмеченного эффекта необходимы специальные исследования.

Однако уже сейчас можно сказать, что его роль, как предвестника сильных землетрясений, весьма невелика. В этом легко убедиться, ознакомившись с таблицей, в которой обобщены некоторые результаты анализа вклада отдельных последовательностей в формирование обсуждаемого экстремума на графиках. В этой таблице для каждого значения магнитуды M указано общее число последовательностей, перекрывающих тот или иной интервал времени, и та часть из них (в %), которая представлена на этом интервале хотя бы одним событием.

Понятно, что в общем случае процент таких последовательностей будет определяться не только характеристиками возмущений сейсмического процесса, но и магнитудой главного толчка (из-за различий в размерах площадок, на которых анализируется течение процесса) и продолжительностью интервала времени, по которому оценивается активность. Тем не менее и в таком варианте таблица показывает, что подавляющее большинство рассматриваемых нами землетрясений возникает на невозмущенных площадях.

Следовательно, прогноз землетрясений, осуществляемый на основе анализируемого признака, будет неизбежно содержать большой процент ошибок типа «пропуск цели». С другой стороны, хорошо известно, что далеко не каждое крупное землетрясение, порождающее значительную серию форшоков, влечет за собой и более сильное событие. Следовательно, такой прогноз будет давать также большое число ложных тревог.

В заключение коснемся коротко вопроса о форшоках. Если делить землетрясения на форшоки и афтершоки по чисто формальному временному признаку, беря за начало отсчета момент возникновения наиболее сильного толчка в последовательности, то закономерный подъем графиков на рис. 2 накануне сильных землетрясений следует объяснять ростом активности форшоков.

Форшоки и сейсмические затишья

Однако классификация землетрясений только по указанному: выше формальному признаку (которому здесь следовали и мы) способна привести к принципиальным ошибкам в физической трактовке причинно-следственных связей между различными событиями.

Обычно форшоки объясняют аномальным ростом напряжений, трещиноватости или какими-либо иными изменениями состояния и свойств среды в очаговой зоне, возникающими, предположительно, накануне сильного землетрясения. В таком истолковании они выступают в качестве своеобразного «следствия» последующего сильного события, что и позволяет говорить о прогностическом их значении. Но такая интерпретация форшоков, на наш взгляд, недостаточно обоснована.

В том, что определенная положительная связь между землетрясениями действительно существует, сомневаться не приходится. Наиболее ярко она проявляется в последовательностях «сильный толчок - афтершоки», но вполне отчетливо прослеживается также между слабыми фоновыми землетрясениями и даже микроземлетрясениями.

Но эта связь односторонняя. Опасность возникновения землетрясения в заданном районе, в данный момент может зависеть от предыдущих землетрясений, но не от последующих. Об этом же свидетельствуют и результаты, представленные выше.

В самом деле, как уже отмечалось, максимумы активности на рис.2 накануне сильных землетрясений обязаны своим происхождением лишь небольшому числу последовательностей (см. таблицу). Следовательно, у основной массы рассматриваемых нами землетрясений форшоки вообще отсутствуют.

Далее, события, за счет которых эти максимумы формируются, можно назвать форшоками только по отношению к главному землетрясению. В действительности же подавляющее их большинство принадлежит к категории афтершоков, сопровождающих предыдущие толчки, хотя они и менее сильные, чем главный.

Поэтому естественнее считать, что те немногие «главные» землетрясения, которые приурочены к указанным выше максимумам активности, также спровоцированы предыдущими толчками и, следовательно, сами должны рассматриваться в качестве их афтершоков.

Форшоки и сейсмические затишья

Иное дело, что каждый такой «афтершок способен породить собственную серию афтершочков значительно более мощную, чем та, представителем которой он сам является.

В связи с этим можно сказать, что всякое землетрясение увеличивает на некоторое время опасность возникновения в области гипоцентра следующего землетрясения, в том числе и любого сильного. Именно это обстоятельство определяет все то многообразие типов последовательностей землетрясений.

Но при таком толковании взаимосвязей между землетрясениями форшоки, в обычном их понимании, не существуют, и выделять их из фоновых землетрясений в какую-то особую категорию событий нет оснований.

Вопросы по закреплению содержания лекции 4

- Форшоки- терминологическое определение, причины возникновения. Происхождение и механика форшоков.
- Принципиальные и технические трудности при изучении особенностей сейсмического режима.
- Методика анализа и обработки данных по форшокам (место и время возникновения).
- График временного хода сейсмической активности A_{10} . Частота и интенсивность землетрясений. Амплитуда и длительность максимумов на графиках.
- Закономерности возникновения сильных землетрясений. Закон повторяемости.
- Тренды в росте активности форшоков накануне сильных землетрясений.
- Аномальный рост напряжений, трещиноватости или какие-либо иные изменениям состояния и свойств среды в очаговой зоне, возникающими, предположительно, накануне сильного землетрясения.
- Проблемы в идентификации форшоков.

Библиография

1. Жалковский Н. Д., Мучная В. И. О пространственных и временных распределениях афтершоков /Геология и геофизика- 1984.- № 8.- С. 108-117.
2. Маламуд А. С., Михайлова Р. С. Карта прогнозируемых мест возникновения сильных землетрясений в Таджикистане /До:кл. АН Тадж. ССР.- 1980.- Т. 23, № 11.- с. 643-647.
3. Михайлова Р. С. Динамика развития областей сейсмических затиший и прогноз сильных землетрясений /Изв. АН СССР. Физика Земли.- 1980.- № 10.С. 12-22.
4. Негматуллаев С. Х., Мирзоев К. М., Маламуд А. С. и др. Долгосрочный прогноз сильного землетрясения в пределах Душанбинского геофизического полигона. Прогноз землетрясений, № 1.- Душанбе: Дониш, 1982.- С. 284-299.
5. Нерсесов И. Л., Пономарев В. С., Тейтельбаум Ю. М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях /1 Исследования по физике землетрясения. М.: Наука, 1976.- С. 149-169.
6. Ризниченко Ю. В. Сейсмический режим и сейсмическая активность /1 Сейсмическое районирование территории СССР.- М.: Наука, 1980.- С. 41-58.
7. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном прогнозе / Сейсмическое районирование СССР.- М.: Наука, 1968.- С. 121-150
8. Gates, A.; Ritchie, D. Encyclopedia of Earthquakes and Volcanoes (англ.). — Infobase Publishing[англ.], 2006. — P. 89. — ISBN 9780816063024. Архивировано 23 октября 2018 года.
9. Kayal, J.R. Microearthquake seismology and seismotectonics of South Asia (англ.). — Springer[англ.], 2008. — P. 15. — ISBN 9781402081798. Архивировано 23 октября 2018 года.
10. Vallée, M. Rupture Properties of the Giant Sumatra Earthquake Imaged by Empirical Green's Function Analysis (англ.) // Bulletin of the Seismological Society of America[англ.] : journal. — 2007. — Vol. 97, no. 1A. — P. S103—S114. — doi:10.1785/0120050616. Архивировано 23 июля 2011 года.
11. Felzer, K.R.; Abercrombie R.E. & Ekström G. A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets (англ.) // Bulletin of the Seismological Society of America[англ.] : journal. — 2004. — Vol. 94, no. 1. — doi:10.1785/0120030069. Архивировано 3 июля 2011 года.
12. McGuire, J.J.; Boettcher M.S. & Jordan T.H. Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific Rise transform faults (англ.) // Nature : journal. — 2005. — Vol. 434, no. 7032. — P. 457—461. — doi:10.1038/nature03377. — PMID 15791246. Архивировано 4 ноября 2012 года.

Благодарю за внимание!

Thank you for your attention!

Назарларыңызға рахмет!