

Изучение временных и пространственных закономерностей проявления афтершоков сильных коровых землетрясений в Центральной Азии

Н. Н. Михайлова, И. Л. Аристова

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан, e-mail: i.aristova@kndc.kz

Аннотация

Рассмотрено 80 афтершоковых последовательностей землетрясений с магнитудами главных толчков M_w от 3.7 до 7.3 с эпицентрами на территории Казахстана и сопредельных стран. К рассмотрению привлечены события как в высокосейсмичных горных областях, так и в асейсмичных платформенных районах. Получены средние зависимости для размеров афтершоковых областей, времени проявления афтершоков от магнитуды землетрясений в сейсмичных областях. Изучены особенности сценариев афтершоковых процессов для близких по магнитуде, времени и месту расположения событий. Их определяют не только тектонические условия, но и флюидные процессы в очаговых зонах. Распределение афтершоков в трехмерном пространстве использовано для выявления наиболее вероятной плоскости, по которой произошла подвижка, и определения размеров очага.

Ключевые слова:

Афтершоки, магнитуда, плоскость разрыва

Афтершоки несут важную информацию о процессах релаксации напряжений в очагах сильных землетрясений, о степени влияния на эти процессы флюидов. По совместному рассмотрению всего поля гипоцентров афтершоков делаются важные выводы о размерах и пространственной конфигурации очагов сильных землетрясений. Исследования афтершоков проводятся полевыми сейсмическими станциями непосредственно после сильного землетрясения, а также на основе каталогов землетрясений, формируемых в Центрах данных.

Исследовано 80 сильных и умеренно сильных коровых землетрясений ($3.7 \leq M_w \leq 7.3$), имеющих афтершоки, за период с 1955 по 2016 гг. в пределах территории, ограниченной координатами 39.0° – 50.5° с.ш., 52.5° – 85.0° в.д. Карта эпицентров главных толчков представлена на рисунке 1.

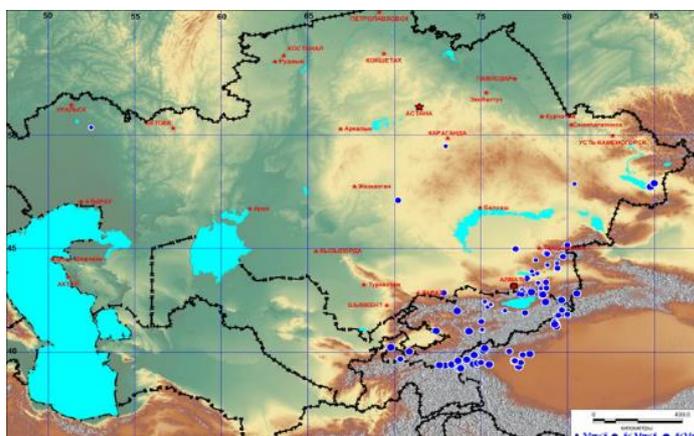


Рис. 1. – Карта эпицентров рассмотренных землетрясений.

В основном, изучаемые землетрясения расположены в горных областях Северного Тянь-Шаня, Южного Тянь-Шаня и Джунгарии. К анализу привлечено несколько событий, относящихся к платформенным слабосейсмичным районам Казахстана. Это Центральный, Западный и часть Восточного Казахстана. Задача заключалась в поиске как общих закономерностей проявления афтершоков, так и в изучении особенностей афтершоков при разных сильных землетрясениях.

Ранее в работе [1] для того же района проводился анализ афтершоковых последовательностей с 1960 года по 1984 год. Основной задачей в [1] была разработка методики идентификации афтершоков сильных землетрясений в электронном каталоге SEISMO, созданном в СОМЭ МОН РК. Эта методика используется в практике СОМЭ до сих пор. В настоящей работе вновь были проведены аналогичные исследования на более широком по времени и территории материале.

Первым этапом работы было исследование на материалах каталогов землетрясений вида функций $R=f(M_w)$ и $T=f(M_w)$, где R и T – соответственно средний радиус области афтершоков и время проявления афтершоковой последовательности, M_w – моментная магнитуда. Следует отметить, что часто эпицентр главного толчка находится на краю эпицентрального поля афтершоков. Несимметричность вызвана протяженностью разрыва в очаге, особенностью глубинного распределения афтершоков преимущественно на одном борту разлома, по которому произошла подвижка в очаге сильного землетрясения и др.

Для установления R_i и T_i каждого i -го сильного землетрясения был использован следующий прием: рассматривались графики функции $g_i(t)$, характеризующие изменения во времени расстояния между эпицентрами главного толчка и каждого из последовательно происходящих более слабых толчков. Графики $g_i(t)$ строились по дискретным значениям t_j и t_j , соответствующих месту и времени j -го землетрясения относительно i -го сильного события. При этом для каждого i -го землетрясения анализ проводился в пределах области, заведомо превышающей по площади вероятную наибольшую область формирования афтершоков для землетрясений с $M=M_i$. При определении размеров этой области исходили из значений длины очага L в километрах (или разрыва в очаге), приводимой в работе [1]. Вывод о значении T_i , т.е. выбор момента окончания периода афтершоков по каждому графику $g_i(t)$, делался в результате сопоставления частоты возникновения землетрясения в рассматриваемой области со своим фоновым уровнем. Сейсмической историей для каждого i -го события считался период времени, равный 2 годам. О размерах R_i заключение делалось при совместном анализе графиков $g_i(t)$ и соответствующих карт эпицентров.

Графики $g_i(t)$ оказались очень удобным и универсальным инструментом для такого анализа. Они позволяют в каждом конкретном случае рассмотреть развитие афтершокового процесса, оценить пространственно-временные параметры афтершоковой области. Кроме того, по ним можно судить и об особенностях сейсмического режима в период подготовки сильного события, определять время и

размеры областей затишья, активизации и т.д. Пример построенных для анализа графиков $r(t)$ представлен на рисунке 2.

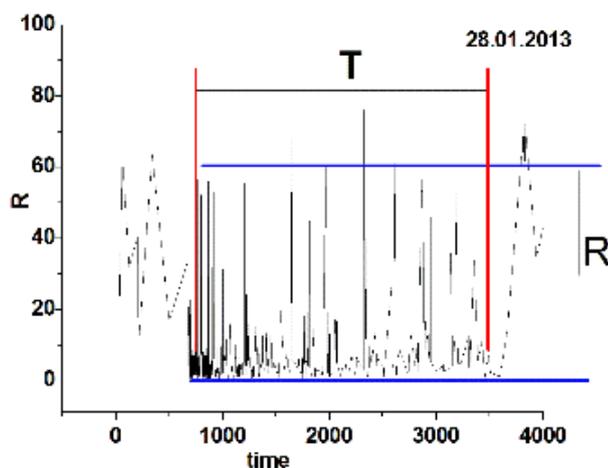


Рис. 2. – График $r(t)$ для землетрясения 28.01.2013.

На основе такого подхода был проведен анализ всех выбранных землетрясений и создана база данных по афтершоковым последовательностям, которая по существу является совокупностью каталогов афтершоков. Проведена работа по унификации форматов этих каталогов. Основой для составления базы данных послужил каталог землетрясений, составленный в рамках проекта ЕМСА и продолженный в последующие после окончания проекта годы сотрудниками Центра данных ИГИ НЯЦ РК [2].

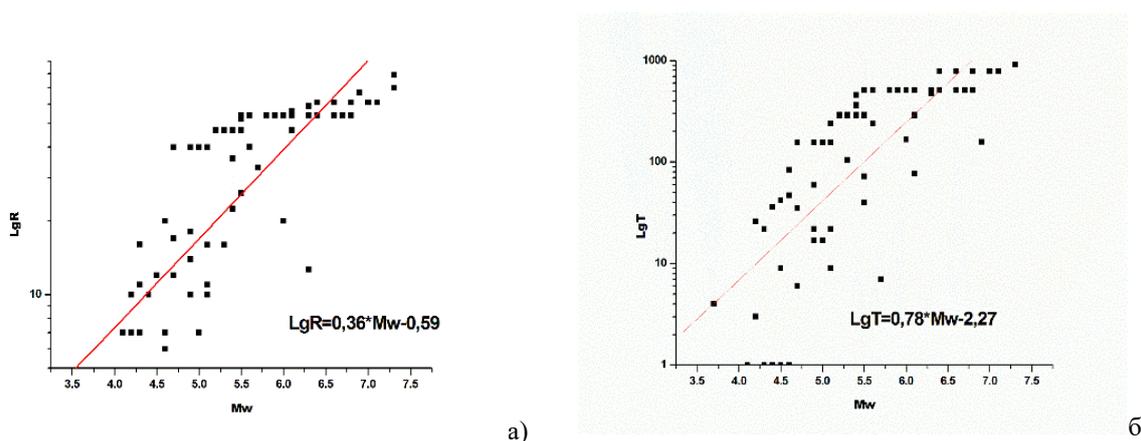


Рис. 3. – Графики (а) для размеров области и (б) продолжительности афтершоковых последовательностей в зависимости от магнитуды M_w .

Полученные значения T_i и R_i явились исходным материалом для построения графиков и нахождения зависимостей функций $R=f(M)$ и $T=f(M)$. На рисунке 3 показаны полученные графики для расстояний и продолжительности афтершоковых последовательностей. После аппроксимации были получены следующие соотношения:

$$\lg T \text{ (дни)} = 0.78 * M_w - 2.27, \quad \lg R = 0.36 * M_w - 0.59$$

Сопоставление найденных зависимостей с полученными в настоящей работе, позволило сделать вывод, что добавление данных по сильным землетрясениям последних 32 лет, в целом не изменило полученные ранее средние соотношения для характеристик афтершоковых последовательностей. Полученные эмпирические формулы можно использовать в разных задачах для выделения афтершоков в выборках землетрясений.

Затем детально изучалось каждое сильное землетрясение со своей афтершоковой последовательностью. При этом выборки анализировались унифицированным способом: изучались пространственные характеристики поля афтершоков, затухание афтершокового процесса во времени, закономерности высвобождения энергии после главного толчка (рисунок 4).

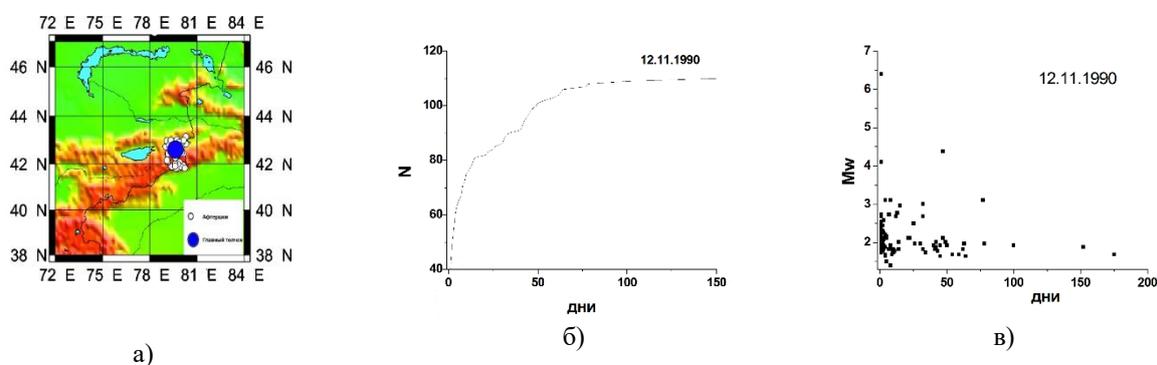


Рис. 4. – Анализ афтершоковых последовательностей на примере землетрясения 28.01.2013 г. ($M_w=6.1$): а) карта эпицентров основного толчка и афтершоков; б) и в) зависимости магнитуды и суммарного количества афтершоков от времени после основного толчка.

По каждому землетрясению в отдельности оценивались такие параметры, как размер поля афтершоков, длительность периода процесса, разница магнитуд главного толчка и наиболее сильного афтершока, а также общее количество идентифицируемых афтершоков. Особый интерес представляет изучение зависимостей во времени изменения общего количества афтершоков, отражающих состояние зоны разлома после произошедшего землетрясения. Анализ полученных данных показал, что разные сильные землетрясения совершенно по-разному проявляются своей афтершоковой деятельностью. По результатам исследования удалось разделить все афтершоковые последовательности на три основных типа. К I-му типу относятся афтершоковые последовательности с гладкой формой графика $N(T)$ (рисунок 5а). Это простая релаксационная модель. Ко II-му типу отнесены процессы со сложной, ступенчатой формой графика $N(T)$ (рисунок 5б). Так, например, анализ пространственно-временной эволюции повторных толчков Зайсанского землетрясения 14 июня 1990 года показывает, что практически все повторные землетрясения возникали группами, причем периоды активизации чередовались с периодами покоя. К III-му типу относятся землетрясения, произошедшие в слабосейсмичных, главным образом, платформенных районах. В этих районах после довольно сильных землетрясений либо афтершоки отсутствуют, либо их очень мало.

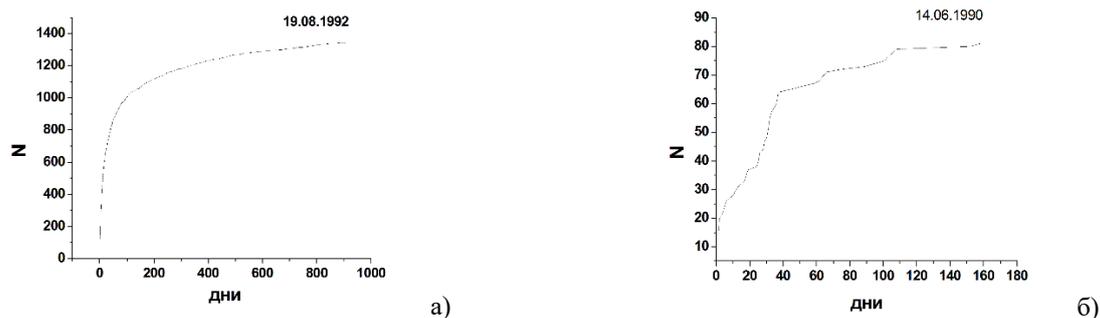


Рис. 5. – Примеры афтершоковых последовательностей I (а) и II (б) типов.

Закон, описывающий уменьшение интенсивности потока афтершоков во времени, характеризуется степенной функцией (закон Омори) [3]:

$$N(t) = K/(t + c)^p, \tag{1}$$

где $N(t)$ — число афтершоков в единицу времени, p — параметр, характеризующий скорость уменьшения сейсмической активности. Построение графиков для афтершоковой последовательности в двойном логарифмическом масштабе (рисунок 6) позволяет определить параметр p по наклону аппроксимирующей прямой [4]. Для всех событий I и II типа были рассчитаны значения p . Для процессов I типа параметр p , характеризующий скорость изменения интенсивности потока событий, немного больше или равен 1 ($1 \leq p \leq 1.37$), а для 73% II типа параметр p меньше единицы ($0.61 \leq p \leq 0.98$).

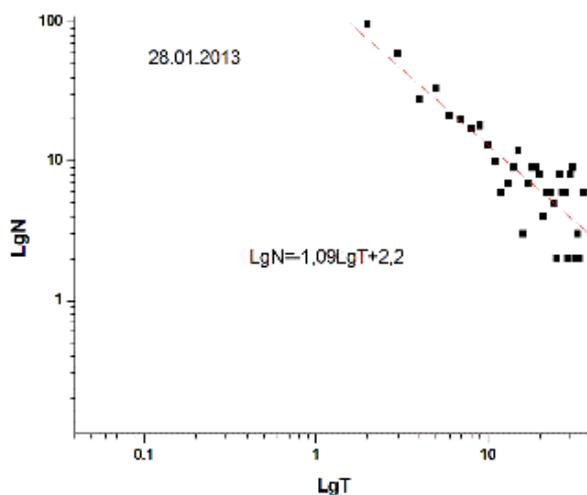


Рис. 6. – График $N(t)$ в двойном логарифмическом масштабе для расчета параметра p , характеризующего скорость уменьшения сейсмической активности афтершоков.

Большой интерес представляет собой изучение проявления афтершоков для близких по времени, пространству и магнитуде сильных землетрясений. Существует ли подобие в процессах высвобождения энергии в очагах, произошедших в сходных тектонических условиях? Имелось несколько вариантов подобных событий. Два одинаковых по силе и местоположению землетрясения,

вызвавшие 7-балльные сотрясения в г. Текели (Джунгария) 30.12.1993 г. и 13.06.2009, дают возможность изучения условий, способствующих их возникновению и развитию афтершоковых последовательностей [5]. Вся афтершоковая деятельность как при первом, так и при втором землетрясениях развивалась только в южном, висячем крыле разрывов, преимущественно на глубине $H > 10$ км. Афтершоковая активизация быстро затухала во времени, при этом отмечалось чередование процессов дилатансионного упрочнения и разупрочнения.

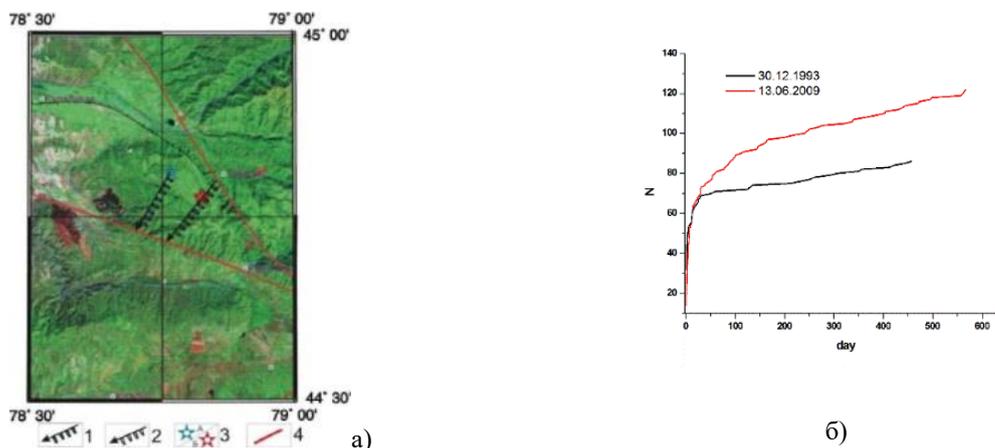


Рис. 7. – а) Интерпретация положения очагов (1,2 – штрихи показывают падение разрыва; 3 – эпицентры землетрясений; 4 – разломы) и б) графики зависимости суточного количества афтершоков от времени после основного толчка для Текелийских землетрясений 1993 и 2009 гг.

Предлагаемая интерпретация процессов в очагах Текелийских землетрясений, зарегистрированных в блоке между Южно- и Западно-Джунгарским разломами, отражена на рисунке 7. Это круто падающие в юго-восточном направлении субпараллельные разрывы северо-восточного простирания. В первом движении подвижки представляют собой сдвиги по крутым плоскостям, по мере развития разрыва тип дислокации меняется на взброс, плоскость падения становится более полой. Два Текелийских землетрясения настолько похожи по всем параметрам, что могут считаться происходящими по единому сценарию. Второе землетрясение продолжило начатые первым разрушения в блоке земной коры, развивая на юго-восток релаксационные процессы в одном и том же напряженном объеме за счет последующих толчков.

В отличие от Текелийских землетрясений, три землетрясения 2011–2013 гг. с магнитудой $M_w = 5.1–6.1$: Капчагайское (01.05.2011 г., $M_w=5.1$), Согетинское (30.05.2012 г., $M_w = 5.4$), Нарынкольское (28.01.2013, $M_w=6.1$) – несмотря на то, что их очаги сконцентрированы в близкой по времени и пространству области, связаны практически с одним и тем же тектоническим разломом [6], имеют энергию в небольшом диапазоне значений, сильно различаются по проявлению афтершоков. Распределение афтершоков по энергиям и во времени характеризуют рисунки 8а-в.

Капчагайское землетрясение предварял слабый форшок с $M_w=1.6$, зарегистрированный за 2.5 часа до основного толчка. После землетрясения последовала серия афтершоков, аномально высокая как по общему числу повторных толчков для такого сравнительно несильного главного толчка, так и

по количеству относительно сильных толчков с $M_w > 3$. Всего зарегистрировано 235 афтершоков этого землетрясения, большая часть из которых была зарегистрирована в первые 10 дней. Тринадцать наиболее сильных толчков с $M_w > 3$ произошли в первые 4 дня. Через месяц, 2 июня, был зарегистрирован еще один афтершок с $K=3.11$.

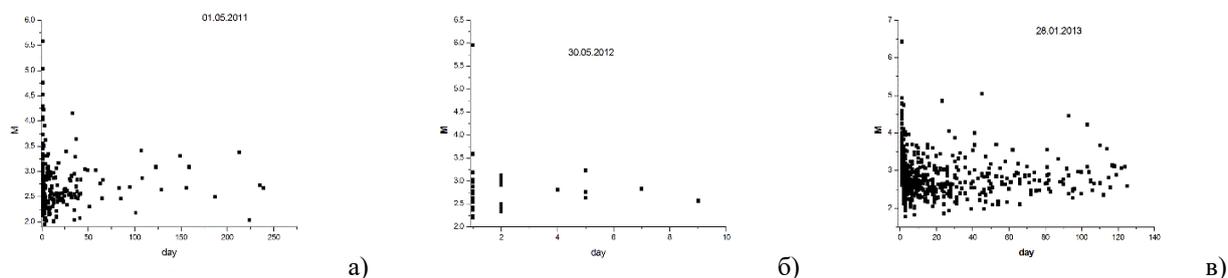


Рис. 8. – Затухание афтершоковой деятельности в очаге Капчагайского землетрясения (а), Согетинского землетрясения (б), Нарынкольского землетрясения (в).

Сейсмический эффект Согетинского землетрясения был гораздо слабее. Главный толчок не сопровождался сильными афтершоками, энергетический уровень большинства повторных толчков колебался в пределах $M_w=1.1-1.6$, только у двух наиболее сильных он достиг значения $K=2.6$. Всего зарегистрирован 31 афтершок этого землетрясения, почти все из них реализовались в первые 2 дня, причем половина произошла в течение 2.5 часов после главного толчка, координаты эпицентров афтершоков практически совпадают с координатами главного события.

После Нарынкольского землетрясения в течение месяца зарегистрированы около 700 афтершоков, большая часть из которых произошла в первые три дня. Большинство наиболее сильных толчков с $M_w > 3$, в том числе с $M_w=5$, произошли в первые два дня. Через 20 дней, 19 февраля, был зарегистрирован еще один афтершок с $M_w=3.8$, затем в марте и в апреле произошли афтершоки $M_w=4$ и $M_w=3.5$, положение эпицентров, которых практически совпало с положением главного толчка.

Из анализа затухания афтершоковой деятельности в рассмотренных очагах следует, что «крайние» с севера и юга землетрясения Капчагайское и Нарынкольское характеризовались большим количеством афтершоков (рисунок 9), среди которых были и сильные, ощущавшиеся в населенных пунктах. При «среднем» (Согетинском) землетрясении афтершоков было мало, сильные повторные точки отсутствовали.

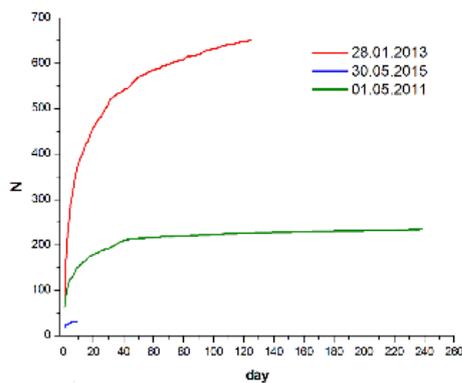


Рис. 9. – График распределения количества афтершоков от времени при трех землетрясениях на Северном Тянь-Шане в 2011–2013 гг.

На рисунке 10 показано положение афтершоков рассматриваемых землетрясений в плане. Из рисунка видно, что облака афтершоков всех трех событий имеют изометричную форму. Пространственное положение областей афтершоков Капчагайского и Нарынкольского землетрясений было уточнено методом двойных разностей, что позволило установить трехмерную конфигурацию и размеры очаговых зон [6]. Размеры очагов «крайних» событий геологически фиксированы размерами блоков и соответствуют средним размерам очагов землетрясений соответствующей магнитуды. То есть пространственно-временные характеристики афтершоковых последовательностей для «крайних» событий – северного Капчагайского и южного Нарынкольского – более близки между собой, чем с Согетинским землетрясением.

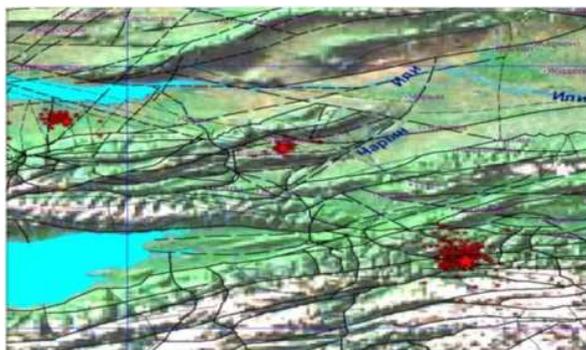


Рис. 10. – Эпицентры главных толчков и афтершоков Капчагайского, Согетинского, Нарынкольского землетрясений.

Был сделан вывод, что в очагах землетрясений, близких по энергетическим характеристикам и сформировавшимся в сходных сеймотектонических условиях, возможны совершенно различные сценарии высвобождения энергии, что делает затруднительным прогноз развития сейсмического процесса после сильного главного толчка.

Установленной закономерностью можно считать обнаруженное четкое различие в афтершоковых процессах землетрясений в платформенных и горных областях. Полное отсутствие

или малое количество афтершоков после сильных землетрясений характерно для событий в слабоактивных районах. Можно было бы предположить, что это «субъективный» факт, связанный с отсутствием хороших сетей наблюдений в асейсмичных районах. Однако в нескольких случаях в эпицентральную область оперативно выезжала экспедиция с сейсмическими станциями, но афтершоков не было зарегистрировано, как, например, при Баканасском землетрясении 1979 года с $M_w=5,7$. Также сразу после Шалгинского землетрясения 22.08.2001 г. с $M_w=5,2$ для уточнения основных параметров главного толчка и регистрации возможных афтершоков в район эпицентра выехала экспедиция с полевой сейсмической аппаратурой. Всего после Шалгинского землетрясения было зарегистрировано 6 афтершоков, магнитуда самого сильного из них 3.2, остальные афтершоки существенно слабее. Можно утверждать, что в очагах сильных землетрясений в платформенных зонах практически не происходит релаксации напряжений после главного толчка. По-видимому, большую роль в процессе генерации афтершоков играют флюиды. Важно, как их наличие или отсутствие, так и количество, и глубинное распределение. В работах [7,8] на примере Жаланаш-Тюпского землетрясения и его афтершоков была показана связь глубинного распределения поля афтершоков с характеристиками поглощения среды. В свою очередь, зоны сильного поглощения с большой вероятностью связаны с зонами поступления флюидов из глубинных слоев нижней коры и верхней мантии. Именно отсутствие флюидов в зонах очагов платформенных землетрясений может определять отсутствие афтершоков. При этом при одной и той же магнитуде сброшенные напряжения в их очагах могут значительно превосходить их значения в очагах сейсмичных регионов.

Вторая часть работы посвящена изучению распределения афтершоков в трехмерном пространстве для выявления наиболее вероятной плоскости разрыва в очаге и изучению размеров очага. В этом исследовании использовано гораздо меньше землетрясений, поскольку для надежных выводов требуется хорошее знание глубин афтершоков, что в случае сейсмических сетей Центральной Азии далеко не всегда выполнимо. Было выбрано 16 землетрясений с афтершоками, магнитуда которых находилась в диапазоне от 4.9 до 7.3. Известно, что для выявления наиболее вероятной плоскости, по которой произошла подвижка в очаге, используется комплекс различных сведений: тектонические условия района, фокальный механизм, карта изосейст, азимутальный годограф, параметры записей сильных движений. Афтершоки в этом комплексе играют одну из самых важных ролей. В Казахстане использование афтершоков сильных землетрясений для выяснения положения плоскости разрыва было показано в работе [8]. Особенно ярко это продемонстрировано на примере Жаланаш-Тюпского землетрясения с $M_w=7,0$ 1978 г. Были проанализированы карта эпицентров афтершоков, механизм очага, глубинные разрезы, построенные вдоль направлений двух нодальных плоскостей. На рисунке 11 показаны два разреза, на которых видно распределение афтершоков с глубиной, и механизм очага Жаланаш-Тюпского землетрясения.

Выводы

На примере рассмотренных землетрясений территории Казахстана и прилегающих территорий других стран установлены некоторые закономерности в проявлении афтершоков сильных землетрясений.

1. Для землетрясений в горных областях найдены средние зависимости размеров поля афтершоков и времени их проявления от магнитуды главного толчка, которые могут быть использованы в различных задачах, требующих маркировки афтершоков большого количества событий в каталогах.

2. Для близких во времени, пространстве и по магнитуде сильных землетрясений могут иметь место разные сценарии афтершоковых последовательностей. Сделан вывод, что не только тектонические условия, но и флюидный режим определяют закон высвобождения энергии после главного толчка.

3. В платформенных областях сильные землетрясения, как правило, не имеют вообще или имеют только единичные афтершоки.

4. Установлены наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах 16 сильных землетрясений и размеры очагов по пространственному распределению афтершоков.

Список литературы

1. Бакиев, Ю.И., Михайлова, Н.Н., Ревенко, О.К. Методика идентификации афтершоков в машинном каталоге // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. М.: Наука, 1989. С. 126–131.
2. Mikhailova, N.N., Mukambayev, A.S., Aristova, I.L., Kulikova, G., Ullah, Sh., Pilz, M., Bindi, D. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 // *Annals of Geophysics*. 2015. V. 58. Paper No. S0102.
3. Omori, F. On after-shocks of earthquakes // *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*. 1894. V. 7. P. 111–200.
4. Kanamori, H., Brodsky, E.E. The physics of earthquakes // *Rep. Prog. Phys.* 2004. V. 67. P. 1429–1496.
5. Михайлова, Н.Н., Полешко, Н.Н. Текелийское Землетрясение в Казахстане в 2009 году: очаг и воздействия // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2010. Т. 37. № 2. С. 20–33.
6. Михайлова, Н.Н., Полешко, Н.Н. Общие закономерности и особенности проявления очагов последних сильных землетрясений на Северном Тянь-Шане // *Вестник НЯЦ РК*. 2015. Вып. 4. С. 144–149.
7. Кветинский, С.И. Копничев, Ю.Ф., Михайлова, Н.Н. и др. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговых зонах сильных землетрясений Северного Тянь-Шаня // *Доклады Академии наук*. 1993. Т. 329. № 1. С. 25–53.
8. Михайлова, Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алматы) // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 1996. 338 с.