

УДК 550.34.013.4 + 550.343.6

PACS: 91.30.Ab Px, 91.45.Ga

## ДВОЙНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ИХ ПРИРОДА И ПРОГНОЗ МЕТОДОМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ

С.Ц. Акопян

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Двойные землетрясения – это сильные землетрясения, близкие по времени, месту и магнитуде. Это довольно редкие и труднообъяснимые события. Выяснение природы их возникновения важно для прогнозирования землетрясений. Метод сейсмической энтропии, с привлечением результатов исследований процессов в очагах сильных землетрясений, позволяет выявлять природу таких землетрясений, определять их как самостоятельные землетрясения со специфической тектонической взаимосвязью, отличать их от других случаев близких, но независимых землетрясений, а также выделять их на фоне форшоков и афтершоков. Двойные землетрясения выявлены в сейсмических системах, расположенных в разных сейсмотектонических ситуациях на Алтае, Курилах, в центральных регионах США, но их «родиной» следует признать Пакистан. Изучены характерные признаки, по которым проведена классификация этих землетрясений.

**Ключевые слова:** кинематическая модель, трековая диаграмма, сейсмическая энтропия, анализ неустойчивости, мониторинг сейсмичности

**Цитирование:** Акопян С.Ц. Двойные землетрясения, их природа и прогноз методом сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45, № 2. С. 33–46. DOI: 10.21455/VIS2018.2-3

### ВВЕДЕНИЕ

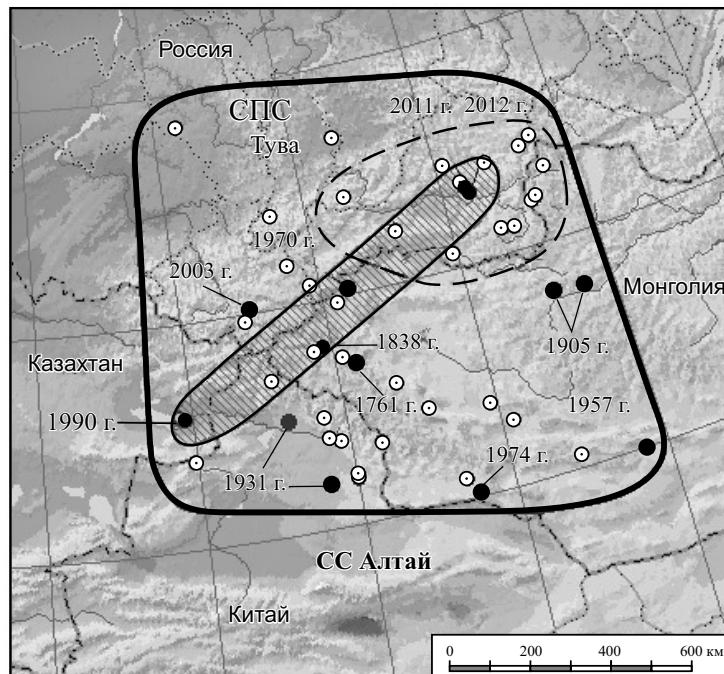
В природе иногда наблюдаются сильные землетрясения или каскад сильных землетрясений в течение короткого промежутка времени с близкими эпицентрами и магнитудами. Такие события происходят относительно редко, и по этой причине за инструментальный период накоплено не так много информации. В результате их природа недостаточно хорошо изучена, а порой и необъяснима. Такие события происходили в 2004–2005 гг. на Суматре, в 2006–2007 гг. на центральных Курилах, в 2011–2012 гг. в Туве, в 2016 г. в центральной Италии и т.д. Назовем двойными землетрясениями (ДЗ) два сильных землетрясения, близких по времени, месту и магнитуде, между которыми имеется некая взаимосвязь. Понятия «близкие» и «взаимосвязь» для ДЗ нам предстоит количественно определить на основе закона производства сейсмической энтропии [Akopian, Kocharian, 2014].

Второй толчок ДЗ порой является внезапным, может быть более сильным и разрушительным и очень трудно поддается прогнозу на основе существующих сейсмопрогностических методов. Технология мониторинга сильных землетрясений на основе метода сейсмической энтропии [Акопян,

1998, 2013, 2016, 2017; Акопян, Рогожин, 2013; Akopian, 2013, 2014; Акопян и др., 2017] позволяет по-новому интерпретировать и объяснять пространственно-временные связи между уже известными землетрясениями, в том числе понимать, выделять и количественно изучать природу ДЗ. Продемонстрируем это на примерах ДЗ в сейсмических системах (СС), выявленных в разных регионах мира.

### АЛТАЙ

К двойным землетрясениям мы причисляем Тувинские землетрясения 27 декабря 2011 г.,  $M = 6.7$  и 26 февраля 2012 г.,  $M = 6.8$  [Рогожин и др., 2012; Овсяченко и др. 2014, 2016а, б]. Второй очаг сработал спустя 2 мес после первого. За подготовку этих землетрясений ответственна СС Алтай с пороговой магнитудой  $M_{th} = 6.6$  (рис. 1), которая была описана в работе [Акопян и др., 2017]. Эта работа содержит описание прогноза первого Тувинского землетрясения, который был сделан в Бюллетеене по прогнозу землетрясений № 04-1 от 15 октября 2011 г. Прогноз проводился методом сейсмической энтропии на основе расчета трековых и энергетических диа-



**Рис. 1.** Контуры сейсмической системы Алтай с  $6.6 \leq M < 7.0$  и эпицентры сильных землетрясений. Штриховкой показана ОСЗ, включающая сильные землетрясения 1938, 1970, 1990, 2011 и 2012 гг. Пунктиром показана область землетрясений-индикаторов с 2005 по 2011 гг. (светлые кружки)

грамм. При этом учитывалось пространственное распределение эпицентров сильных землетрясений, объединенных в однородную сейсмотектоническую зону (ОСЗ) (заштрихованная область на рис. 1).

В методе энтропийной сейсмологии ОСЗ выделяется на основе закона производства сейсмической энтропии и включает сильные землетрясения с близкими механизмами [Акопян, 1998]. ОСЗ – не разлом и не линеамент; она выделяется на основе линейного распределения точек неустойчивости сильных землетрясений в атракторе. Это динамическое понятие, характеризующее зону максимальных концентраций напряжений на определенном пространственно-временном интервале. ОСЗ может включать сегменты как одного, так и разных активных разломов, а также сегменты палеоразломов, не проявлявших активности на протяжении сотен и тысяч лет.

Место первого Тувинского землетрясения было предсказано по активизации землетрясений-индикаторов с 2005 по 2011 гг. Зона этих землетрясений на северо-восточной оконечности ОСЗ, имеющая размеры порядка 200 на 400 км (показана пунктирной линией на рис. 1), оставалась в состоянии затишья до 2005 г. Видно, что землетрясения-индикаторы 2005–2011 гг. окружают очаговую область ожидаемого сильного землетрясения. Первое Тувинское землетрясение произо-

шло в практически асейсмичном районе хребта Академика Обручева и хорошо изучено [Еманов и др., 2012].

Постараемся понять механизм взаимосвязи двух Тувинских землетрясений и рассмотрим, как можно было прогнозировать второе из них. Ключом для понимания взаимосвязи Тувинских землетрясений являются особенности их механизмов и динамика их подготовки. На рис. 2 показаны фокальные механизмы очагов и предполагаемые ориентации подвижек по афтершоковым процессам. В очаге первого Тувинского землетрясения преобладают правосторонние горизонтальные подвижки в направлении СЗ–ЮВ. Он приурочен к сегменту или ответвлению в юго-восточном направлении Каахемского глубинного разлома, который западнее имеет широтное простиранье.

Второе Тувинское землетрясение по механизму очага имеет преимущественно взбросовую компоненту, а с учетом афтершоков – ЮВ-субширотное простиранье. Можно предположить, что это сдвинутый сегмент субширотного продолжения Каахемского разлома на восток.

На то, что в зоне Тувинских землетрясений в последние годы происходили активные деформации, указывают результаты ежегодных GPS-измерений в Алтае-Саянском регионе, начиная с 2000 г. [Тимофеев и др., 2014; Calais et al., 2003]. На рис. 3 приведены фрагменты карт активных

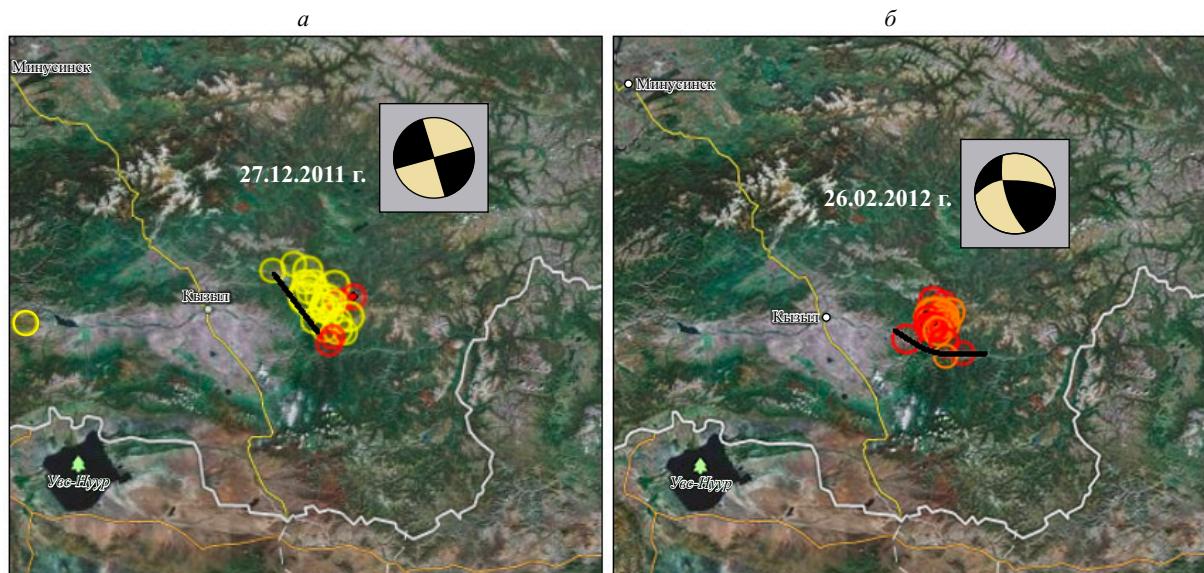


Рис. 2. Механизмы очагов и ориентации плоскостей смещений по афтершокам первого (а) и второго (б) Тувинских землетрясений

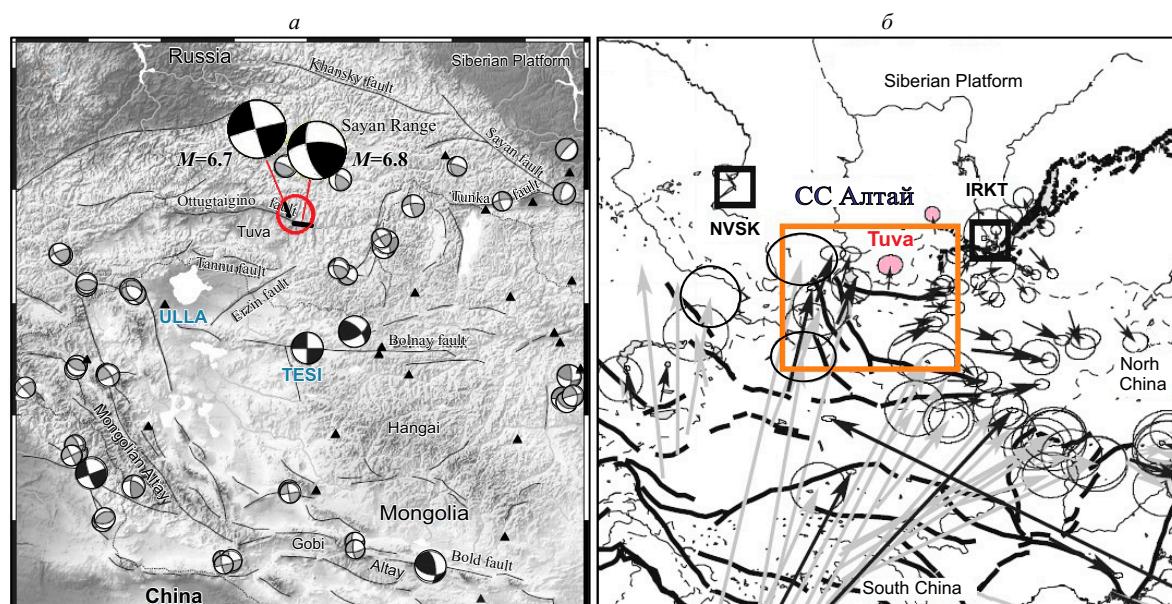


Рис. 3. Активные разломы и механизмы крупных землетрясений в районе СС Алтай (а) и Скорости GPS-измерений относительно Евразии (б). Треугольники – расположения станций GPS-измерений. Эллипсы соответствуют уровню надежности 95%. Прямоугольником показана область СС Алтай

разломов, механизмов очагов и GPS-измерений из работы [Calais et al., 2003].

На рис. 3, а мы привели механизмы очагов первого и второго Тувинских землетрясений (кружочком показана область локализации их эпицентров). На рис. 3, б видно, что в эпицентральной области Тувинских землетрясений выделяется локальная эллипсо-

образная аномалия скоростей по GPS-измерениям относительно Евразии (для наглядности мы выделили прямоугольником границы СС Алтай). Регистрация скоростей по GPS-измерениям показывает, что внутриплитовые укорачивания в северном направлении в сторону Республики Тыва на западе Монголии происходят со скоростью 3 мм/год.

Была проведена оценка тектонических составляющих современных движений Саянского и Тувинского регионов. В среднем по региону с 2000–2011 гг. смещение на СВ-В направлении происходило со скоростью  $\sim 1.1$  мм/год. Примечательно, что в локальной области эпицентров Тувинских землетрясений средние горизонтальные скорости в 2004–2011 гг. были относительно высокими ( $\sim 4$  мм/год).

Покажем, что первое Тувинское землетрясение является триггером второго. По теории энтропийной сейсмологии это возможно, если энергия второго землетрясения больше первого. В рамках СС Алтай рассмотрим сейсмическую подсистему в границах пунктирной области на рис. 1 и назовем ее СПС Тува. Выберем величину пороговой магнитуды для этой подсистемы между магнитудами двух Тувинских землетрясений, равную  $M_{th} = 6.8$ . Тогда первое Тувинское землетрясение в подсистеме будет являться землетрясением-индикатором, магнитуда которых  $M < M_{th}$ , а второе – сильным землетрясением ( $M \geq M_{th}$ ). С 1966 г. в подсистеме наблюдалась активизация слабой и умеренной сейсмичности, что дает возможность построить в ней трековую диаграмму.

На рис. 4 показана трековая диаграмма подготовки второго Тувинского землетрясения в подсистеме, на которой видно, что первое Тувинское

землетрясение действительно является триггером второго. Поскольку в подсистеме нет достоверной статистики исторических сильных землетрясений, то по одной траектории точно определить пороговую магнитуду и построить область неустойчивости (аттрактор) невозможно. В таких случаях мы прибегаем к анализу траектории. Внутри сейсмического цикла по двум чувствительным землетрясениям-индикаторам 1972.02.26,  $M = 5.6$  (границная область Тува-Бурятия-Монголия), 1991.12.27,  $M = 6.4$  (Бусингольское землетрясение) можно построить верхнюю касательную линию к траектории.

Анализ показывает, что эту касательную, с некоторым приближением, можно принять за экстраполяцию зоны неустойчивости в подсистеме в сторону малых значений энтропии, поскольку эти землетрясения-индикаторы в СС Алтай давали старт новым сейсмическим циклам (после сильных землетрясений 1970 и 1990 гг. соответственно), т.е. они отклоняли систему от устойчивости после наступления равновесия [Akopian, 2015].

Однако в подсистеме Тува эти землетрясения выполняют несколько иную функцию. Здесь они существенно приподнимают и приближают траекторию к зоне неустойчивости, но сильное землетрясение с  $M \geq 6.8$  в подсистеме, из-за малых значений энтропии в 1972 и 1991 гг., не могло

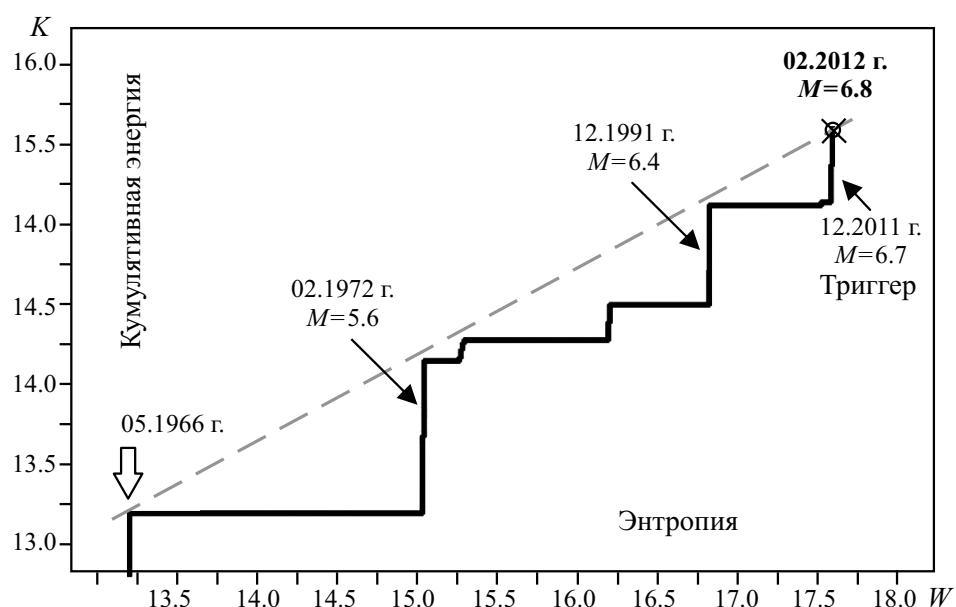


Рис. 4. Трековая диаграмма подготовки второго Тувинского землетрясения в подсистеме

происходить. Как видно на трековой диаграмме, первое Тувинское землетрясение в конце 2011 г. полностью восполнило энергетический дефицит, соответствующий магнитуде  $M = 6.7$ , и за 50-летний период в третий раз возвратило подсистему в зону неустойчивости при максимальном значении энтропии  $W = 17.6$ , после чего спустя два месяца произошло второе Тувинское землетрясение.

Итак, первое Тувинское землетрясение предсказывается в СС Алтай. После этого, на основе проведенного анализа в подсистеме Тува, можно было предсказать в рамках нескольких месяцев второе землетрясение с  $M = 6.8$  и, что очень важно, на протяжении 50-летнего периода такое сильное землетрясение можно было исключить, поскольку траектория в основном находилась ниже зоны неустойчивости. Одновременный мониторинг в СС Алтай с пороговой магнитудой  $M_{th} = 6.6$  и в СПС Тува с пороговой магнитудой  $M_{th} = 6.8$ , охватывающей эпицентральную зону первого, позволил бы по сейсмической активизации за 50-летний период последовательно прогнозировать оба Тувинских землетрясения.

Чтобы понять, что скрывается за иерархическим системным подходом мониторинга двойных землетрясений в методе сейсмической энтропии, необходимо прибегнуть к механизмам очагов и кинематике тектонической модели очаговых зон, объясняющих механизм взаимосвязанности двух очагов. Но прежде чем рассмотреть и обсудить тектоническую модель такой взаимосвязи, приведём еще один пример двойных землетрясений.

### Нью-Мадрид

Классическим примером ДЗ являются исторические землетрясения 1811.12.16,  $M = 7.3$  и 1812.02.07,  $M = 7.5$  на разломе Нью-Мадрид в штате Миссури (США) [Bakun, Horner, 2004]. Эта аномальная внутрив плитовая сейсмоактивная зона известна тем, что здесь в 1811 и 1812 гг. произошёл каскад разрушительных землетрясений (см. рис. 5, а). Природа такой сейсмической активности внутри плиты объясняется тем, что здесь земная кора скрывает реликтовую рифтовую зону, которая периодически (раз в 250–500 лет) приводит к накоплению и разрядке напряжений [Tuttle et al., 2002]. Здесь была выявлена СС Нью-Мадрид с пороговой магнитудой 7.4 и две подсистемы с пороговыми магнитудами 7.0, охватывающие штаты Иллинойс, Миссури, Арканзас, Теннеси, Кентукки и Индиана [Акопян, 2015].

Как видно на врезке рис. 5, а, СС Нью-Мадрид очень велика, поскольку она была выявлена на основе слабой, но рассеянной по большой площади сейсмичности. Поскольку информация о слабой сейсмичности для Нью-Мадридских землетрясе-

ний в доинструментальном периоде отсутствовала, для восстановления их подготовки мы использовали свойство автомодельности СС. Из накопленного опыта, зная приблизительно критическую величину энтропии при потере устойчивости для землетрясений с  $M = 7.5$ , спустя почти два века можно восстановить возможный сценарий траектории подготовки каскада разрушительных Нью-Мадридских землетрясений и линейную зону неустойчивости для самого сильного из них.

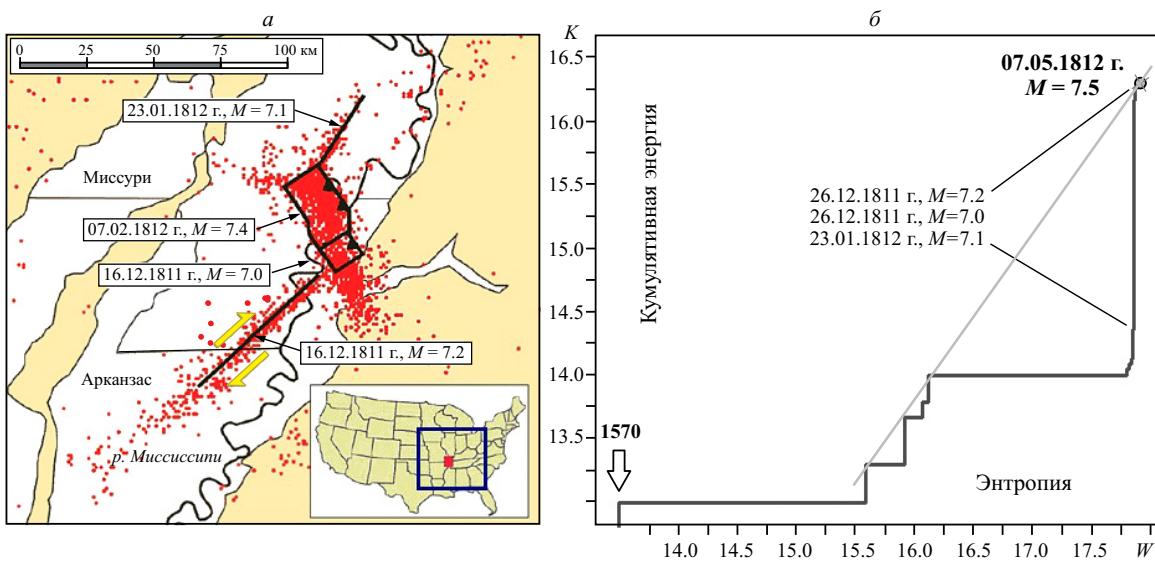
Такое моделирование приведено на рис. 5, б. При моделировании траектории здесь также было важно, что последнее землетрясение каскада было энергетически самым сильным, что позволяет выбрать пороговую магнитуду равной 7.4, а предварительные сильные землетрясения каскада считать землетрясениями-индикаторами (триггерами последнего).

При моделировании мы учитывали, что на трековых диаграммах течение времени по траектории неоднородно и зависит от кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов. В СС происходит замедление «сейсмического времени» по сравнению с обычными часами [Akopian, 2017]. Чем больше кумулятивная энергия, тем выше поднимается траектория и тем быстрее она приближается к точке неустойчивости. Медленнее всего движется точка по самой нижней траектории.

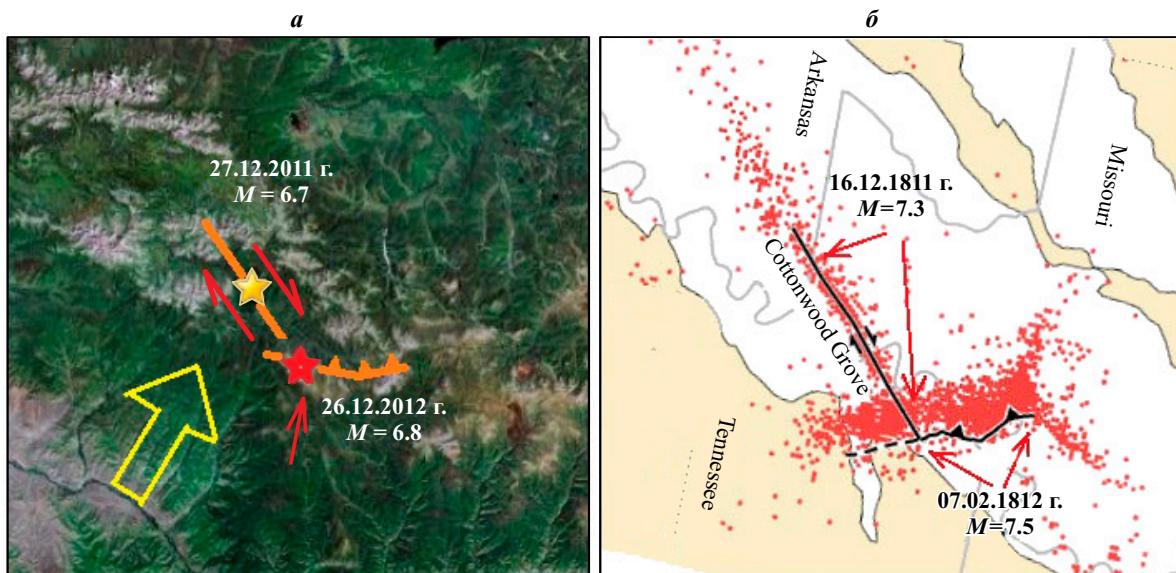
Во внутрив плитовой зоне сейсмические процессы протекают значительно медленнее, поэтому сейсмичность слабая. Учитывая это обстоятельство, моделирование траектории проводилось начиная с 1570 г. На фоне слабой сейсмичности мы ввели несколько относительно сильных землетрясений-индикаторов с магнитудами  $4.5 < M < 5.3$  таким образом, чтобы к 1811 г. накопилась энтропия  $W \approx 17.8$  (соответствующая потере устойчивости землетрясений с  $M \sim 7.5$  в других системах).

В результате процесс накопления энтропии и её приближения к критическому значению растянулся на 240 лет, и при малой кумулятивной энергии к 1811 г. (приблизительно равной энергии одного землетрясения с  $m_b = 5.8$ ) траектория накопила большую энтропию. По этой причине на конечном этапе происходит каскад энергетически более сильных землетрясений, компенсирующих колоссальный дефицит энергии. На рис. 5, б видно, что три сильных землетрясения за 1 мес 23 сут существенно подняли трек подготовки землетрясения в СС Нью-Мадрид, восполнив дефицит кумулятивной энергии за столетия, и 7 февраля 1812 г. привели к катастрофе.

Используя вышеприведенные данные, сопоставим очаговые зоны ДЗ в Туве и в зоне Нью-Мадрид. На рис. 6 показаны кинематические модели очаговых зон этих ДЗ.



**Рис. 5.** Каскад сильных Нью-Мадридских землетрясений: *а* – тектоника, афтершоки и разрывы в очагах (во врезке большим квадратом показаны границы СС Нью-Мадрид); *б* – моделирование траектории подготовки с 1570 г.



**Рис. 6.** Двойные землетрясения в Туве в Российской Федерации (*а*) и Нью-Мадридской зоне в центральном регионе США (*б*)

Для наглядности карта на рис. 6, *б* повернута по часовой стрелке на 100 градусов. Рисунки наглядно показывают однотипный триггерный механизм тектонической взаимосвязи очагов таких двойных землетрясений, выявленный методом сейсмической энтропии (рис. 4, 5, *б*). Видно, что первый очаг является «упором» для второго и объясняет, почему магнитуда второго землетрясения больше

первого. Геометрия L-образных разломов на границе двух блоков, фокальные механизмы парных очагов и распределения афтершоков подтверждают, что горизонтальные правосторонние подвижки при первом очаге высвобождают напряжения на одном крыле и способствуют взбросовым процессам на другом крыле. Продолжительность процесса такого взаимодействия двух очагов – порядка 2 мес.

### ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ

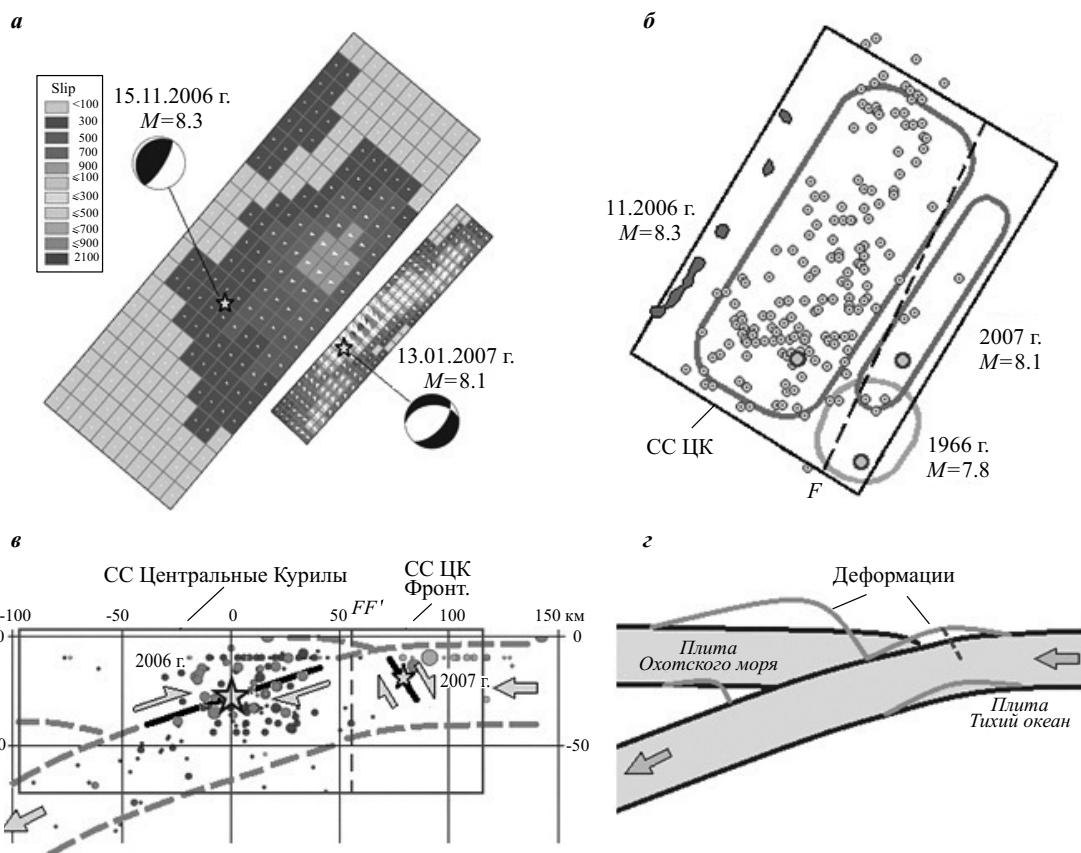
К двойным землетрясениям относятся сильные Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г.,  $M = 8.3$  и 13 января 2007 г.,  $M = 8.1$  на Центральных Курилах (ЦК) с разницей во времени около 2 мес. В работе [Акопян, 2016] на основе метода сейсмической энтропии было дано объяснение этим событиям. На рис. 7, а показаны механизмы очагов и плоскости подвижек этих землетрясений.

Первое землетрясение имеет механизм взброса, а второе – сброса. На рис. 7, б, в показаны границы СС ЦК Тыловая и СС ЦК Фронтальная (в плане и разрезе, разделенные по плоскости FF') с  $M \geq 7.8$ , которые ответственны за подготовку двойных землетрясений. В отличие от предыдущих случаев, где подготовка двойных землетрясений происходила в системе и ее подсистемах, подготовка двойных землетрясений в ЦК происходит в пограничных системах. Важно отметить, что эти пограничные системы расположены не по простирианию желоба, а поперек. Механизм одновременной деформации погружающейся и надви-

гающейся плит перед двойными землетрясениями в субдукционной зоне схематически показан на рис. 7, г.

Такая картина объясняет взаимозависимость и последовательность срабатывания очагов двух сильнейших землетрясений. СС, выделенные в других субдукционных зонах, например, в Японии, на Камчатке, в Чили [Akopian, Kocharyan, 2014], показывают, что типичная активизация и подготовка сильных землетрясений в субдукционных зонах описывается в тыловых системах, расположенных по простирианию желоба, а землетрясения во фронтальной части – довольно редкое событие.

На рис. 8 совмещены фрагменты траекторий подготовок двух сильнейших землетрясений 2006 и 2007 гг. во фронтальной и тыловой системах ЦК, которые подтверждают процесс одновременного накопления энтропии. Для надежного количественного прогноза второго землетрясения в погружающейся плите статистики пока недостаточно. Двойные землетрясения в слу-



**Рис. 7.** Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.: а – механизмы очагов; б – граница СС ЦК, землетрясения-индикаторы и очаговые зоны; в – плоскости подвижек в разрезе; г – механизм деформаций до землетрясений. По плоскости FF' СС ЦК разделяется на две части: фронтальную и тыловую (погружающуюся)

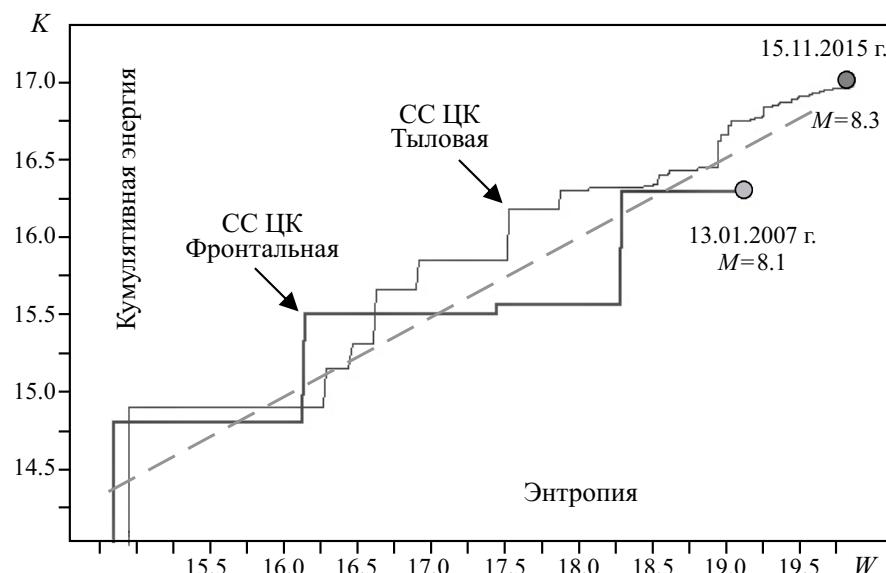


Рис. 8. Траектории подготовок сильных парных землетрясений в тыловой и фронтальной СС ЦК

чае Курил имеют следующие особенности: второе землетрясение происходит с чуть меньшей магнитудой, чем первое; афтершоковые области не пересекаются; механизм первого очага – взброс, второго – сброс; разница во времени около 2 мес. Мониторинг сейсмичности, накопление энтропии во фронтальной зоне на протяжении 90 лет в области ЦК и разница во времени между парными землетрясениями позволяют прогнозировать накопление напряжений и возникновение второго сильного землетрясения в погружающейся плите.

#### ПАКИСТАН–АФГАНИСТАН

Но по частоте происхождения поистине «родиной» парных землетрясений является Пакистан. Особенностью сильных землетрясений в системе Пакистан–Афганистан является то, что в большинстве случаев они возникают парами сильное – относительно слабое или относительно слабое – сильное; некоторые пары имеют триггерный характер. Эти особенности выявляются и прогнозируются методом сейсмической энтропии. Здесь была выявлена иерархия СС Пакистан–Афганистан (протяженностью 1300 км, глубиной до 80 км, рис. 9) с пороговыми магнитудами 6.6, 7.1, 7.5. По градации, приведенной в [Акопян и др., 2017], точность прогноза в этих системах IV уровня (плохая).

Сейсмичность обусловлена направленным к северу движением Индийской плиты, ее взаимодействием в северо-западной части с Евразийской и Афганской плитами, в западной части – с Аравийской плитой в районе Белуджистана. Тектоника и сейсмичность юго-западного Пакистана в районе

Макран отражает сложную границу взаимодействия блока Лут в Иране с окружающими плитами. На севере система граничит с зоной сжатия, подвига и глубокофокусных землетрясений Памира–Гиндукуша. В очагах сильных землетрясений доминируют левосторонние сдвиговые движения и взбросы.

Перечислим некоторые парные землетрясения: 1956.06.09,  $M = 7.6$  и (спустя 3 мес 7 сут) 1956.09.16,  $M = 6.7$  (Афганистан); 1975.10.03,  $M = 6.8$  и в тот же день (спустя 12 ч)  $M = 6.4$ ; 1997.02.27,  $M = 7.3$  и (спустя 22 мин)  $M = 6.0$ ; 2008.10.28,  $M = 6.4$  и (спустя 12 ч)  $M = 6.6$ ;

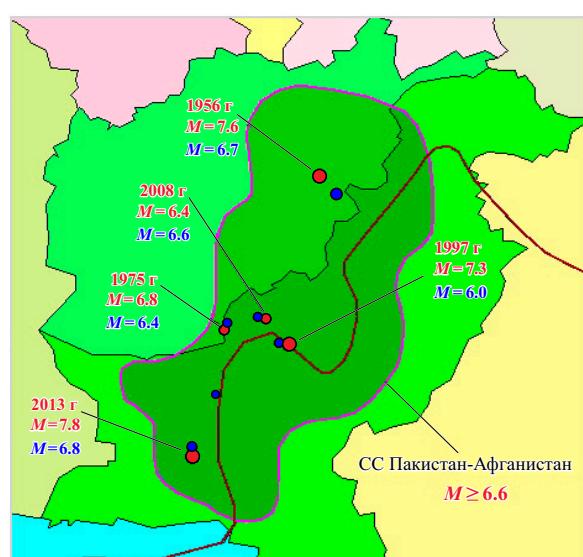


Рис. 9. Двойные землетрясения в СС Пакистан–Афганистан

2013.09.24,  $M = 7.8$  и (спустя 5 сут) 2013.09.28,  $M = 6.8$ . Эпицентры этих ДЗ и границы СС Пакистан–Афганистан показаны на рис. 9. Все эти ДЗ, в отличие от предыдущих случаев, имеют похожие фокальные механизмы и близки по времени в очаге (разница по времени варьируется от нескольких дней до часов и даже минут), а по магнитудам разнятся больше, чем ДЗ других регионов. Если бы не относительно высокие значения магнитуды слабого из землетрясений пары (энергия которой, как правило, больше, чем суммарная энергия всех афтершоков), то правомерность причисления их к сильным форшокам или афтершокам была бы оправдана.

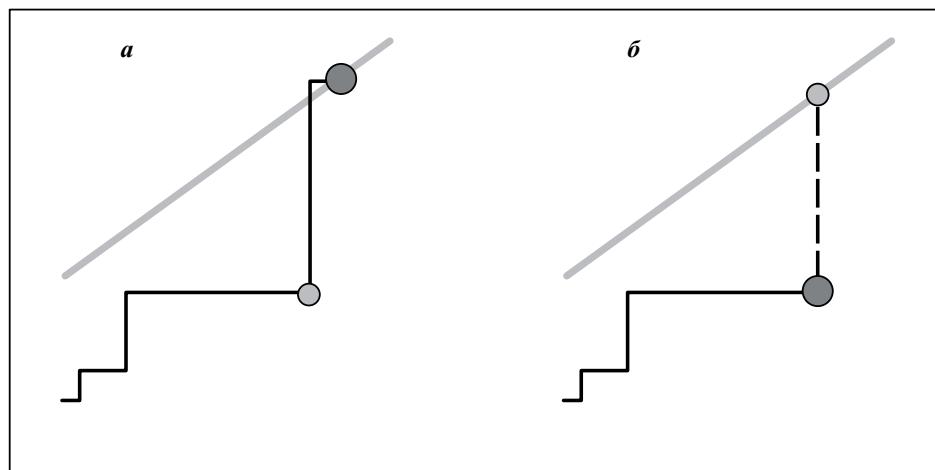
Парные проявления энергетически сильных очагов в коротком интервале времени на фоне афтершоков являются довольно сложными и малоизученными событиями. ДЗ представляют интерес по той причине, что они вызывают дополнительные разрушения и жертвы, поэтому необходимо понять их причину и прогнозировать подобные землетрясения. Проявления сейсмичности в виде ДЗ в энтропийной сейсмологии объясняются дефицитом энергии землетрясений-индикаторов на протяжении сейсмических циклов. Действительно, во всех случаях наблюдения двойных землетрясений в СС Пакистан–Афганистан траектория их подготовок развивалась ниже линейной зоны неустойчивости, а на момент реализации ДЗ трек имел дефицит кумулятивной энергии, равный магнитуде более слабого из толчков (рис. 10).

Таким образом, слабое землетрясение пары в энтропийной сейсмологии является самостоятельным землетрясением-индикатором в соответствующих системах (в случае событий 1956 и 2013 гг. ДЗ разделены пороговой магнитудой 7.5; в слу-

чае 1997 г. – пороговой магнитудой 7.1; в случае 2008 г. – магнитудой 6.6). На рис. 10, а схематически показан случай парных землетрясений 2008 г., когда землетрясение с малой магнитудой опережает сильное землетрясение. В этом случае первое землетрясение является одновременно не только индикатором и триггером, но и сильным форшоком, поскольку происходит в очаговой зоне ожидаемого сильного землетрясения. Напомним, что в методе сейсмической энтропии триггер сильного землетрясения находится в рамках СС, но при этом может находиться как вблизи, так и далеко от очаговой зоны сильного землетрясения и не состоять с ним в паре [Акопян, 1998].

Несколько сложнее поддаются объяснению три остальных случая ДЗ, когда магнитуда второго землетрясения пары меньше, чем первого. В традиционной сейсмологии нет технологии выявления особой роли сильного повторного толчка, поэтому такие толчки просто приписываются к афтершокам. Их природа связана как со спецификой тектонической активности в регионе в целом, так и с нетипичными процессами разрывообразования в локальных очаговых областях сильных землетрясений, которые мы попытаемся изучить на основе трековых диаграмм.

На рис. 10, б схематически показана подготовка и реализация сильного землетрясения в случаях ДЗ 1957, 1997 и 2013 гг., когда траектория располагалась снизу в опасной близости к линейной зоне неустойчивости. В этих случаях сильное землетрясение пары происходило ниже зоны неустойчивости на величину энергии, равной энергии второго землетрясения пары. За короткое время второй толчок приподнимает траекторию и почти полностью компенсирует дефицит энергии между ли-



**Рис. 10.** Схематическое изображение парных землетрясений для случаев слабое – сильное (а) и сильное – слабое (б)

нейной зоной неустойчивости и точкой реализации сильного землетрясения. Второй толчок, как бы постфактум, играет роль землетрясения-индикатора, триггера, которое должно было произойти в рамках системы до сильного землетрясения, т.е. функционально должно отличаться от афтершоков.

Обычная афтершоковая активность состоит из многочисленных энергетически слабых толчков после сильного землетрясения; она заполняет очаговую область сильного землетрясения и приводит ее в равновесие с окружением [Akopian, 2015]. Это происходит в локальной области внутри СС, поскольку размеры СС намного больше очаговых зон сильных землетрясений (см. рис. 9). Второй толчок пары (с некоторым запаздыванием по времени) выполняет несколько иную, региональную функцию – приводит в равновесие весь объем системы с локальной очаговой областью. Энтропийный подход показывает, что функционально второе землетрясение является не сильным афтершоком, а «запоздавшим» самостоятельным землетрясением-индикатором, выступающим в паре с сильным.

Таким образом, второй, более слабый, толчок каждой пары землетрясений 1957, 1997 и 2013 гг. в СС Пакистан–Афганистан будем считать самостоятельным землетрясением, сложным образом переплетенным с первым и образующим с ним ДЗ. Если это соответствует действительности, то в очагах таких ДЗ должны быть скрыты специфические особенности, которые мы постараемся выявить при детальном исследовании. Из трех ДЗ выберем землетрясения 2013 г. в Белуджистане, очаговые зоны которых хорошо изучены. Геометрия и продолжительность времени распространения разрыва в очаге сильного землетрясения 2013 г. были детально исследованы в работах [Avouac et al., 2014; Jolivet et al., 2014].

Пара землетрясений 2013 г. в Белуджистане. Землетрясение 24 сентября 2013 г.,  $M = 7.8$  произошло в самой большой, но малонаселенной провинции Пакистана Белуджистан на глубине 15–20 км. Более 300 000 человек оказались в зоне воздействия, погибло 825 человек, более 440 были ранены. Левосторонние подвижки происходили по площадке  $190 \times 20$  км вдоль разлома Хошаб (Hoshab fault). Второй толчок 28 сентября 2013 года,  $M = 6.8$ , произошедший севернее первого на меньшей глубине (10–15 км), привел к дополнительным разрушениям и гибели по крайней мере 22 человек. Самые сильные афтершоки имели  $m_b = 5.8$ ; 5.6 и 5.5 и произошли в первый день, спустя минуты и часы после сильного толчка на глубине более 20 км.

На необычность механизма подвижек этого землетрясения указывали многие сейсмологи.

Например, распространение афтершоков с 24 по 28 сентября происходило к северу от эпицентра противоположно направлению распространения основного разрыва. Напротив, в области реализации максимального момента к ЮЗ от эпицентра было зарегистрировано только несколько афтершоков после сильного второго толчка 28 сентября. По этой причине в работе [Avouac et al., 2014] отмечалось, что в случае сильного землетрясения 24 сентября 2013 г. афтершоки нельзя использовать для определения основных характеристик землетрясения.

На то, что землетрясение было аномальным, указывают и карты интенсивности сейсмического воздействия, опубликованные на сайте Геологической службы США (USGS) сразу после землетрясения 24 сентября и (уточненная) спустя 10 сут, 4 октября 2013 г. Как видно на рис. 11, вторая карта существенно отличается от первой. Разрыв протягивался с СВ на ЮЗ на 200 км.

Протяженные разрывы и пространственно сложные распределения смещения часто проявляются сегментированием разломов. Сегментация разломов как ключевой фактор зарождения, распространения и приостановки разрыва была упомянута в работе [Wesnousky, 2006]. При землетрясении 2013 г. СВ часть сегмента разлома выходила на поверхность. Прокальвывание на большом протяжении к ЮЗ происходило на малой глубине между поверхностью и глубиной 10 км. и не содержало значительной сегментации косейсмического скольжения на значительной части разлома. Разрыв, начатый вдоль субвертикальной плоскости разлома на СВ, превратился в крупное землетрясение при изгибе плоскости разлома в южном направлении. Было показано [Jolivet et al., 2014], что подвижка распространялась по изогнутому сегменту разлома длиной 160 км после зарождения на субвертикальном сегменте с низким сейсмическим потенциалом на участке 30 км (см. рис. 12).

Распространение по изогнутому участку, из-за гладкой геометрии, происходило в виде косейсмической ползучести. Фактически необъяснимый характер афтершоковой активности, разбиение геометрии разлома на сегменты 30 км и 160 км и характер подвижек (сегментация) во времени и есть результат проявления ДЗ от 28 сентября с  $M = 6.8$  и 24 сентября с  $M = 7.8$ , выявленного методом сейсмической энтропии. Несмотря на то, что энергетически сильное землетрясение произошло на 4 сут раньше, окончательная картина формирования момента и геометрии очагов прояснилась спустя 10 сут, после остановки косейсмических глубинных подвижек в ЮЗ изогнутом сегменте разлома.

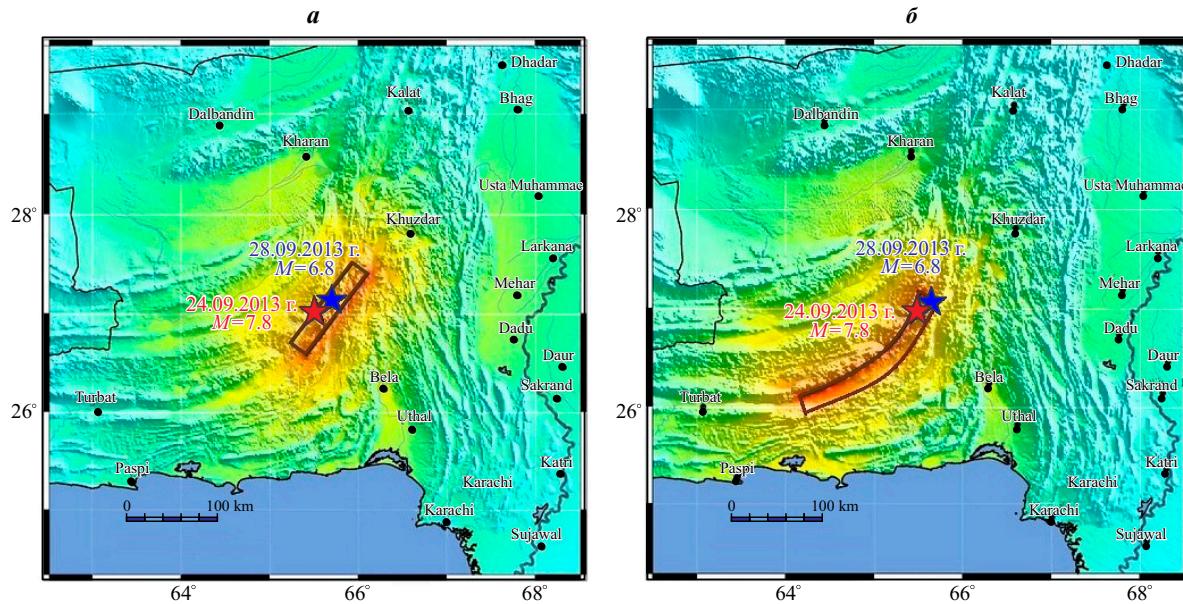


Рис. 11. Интенсивность сейсмического воздействия после землетрясения 24.09.2013 г., обозначенного красной звездочкой (синей звездочкой обозначено землетрясение 28.09.2013 г.). а – карта, опубликованная сразу после землетрясения 24 сентября; б – карта, опубликованная 4 октября

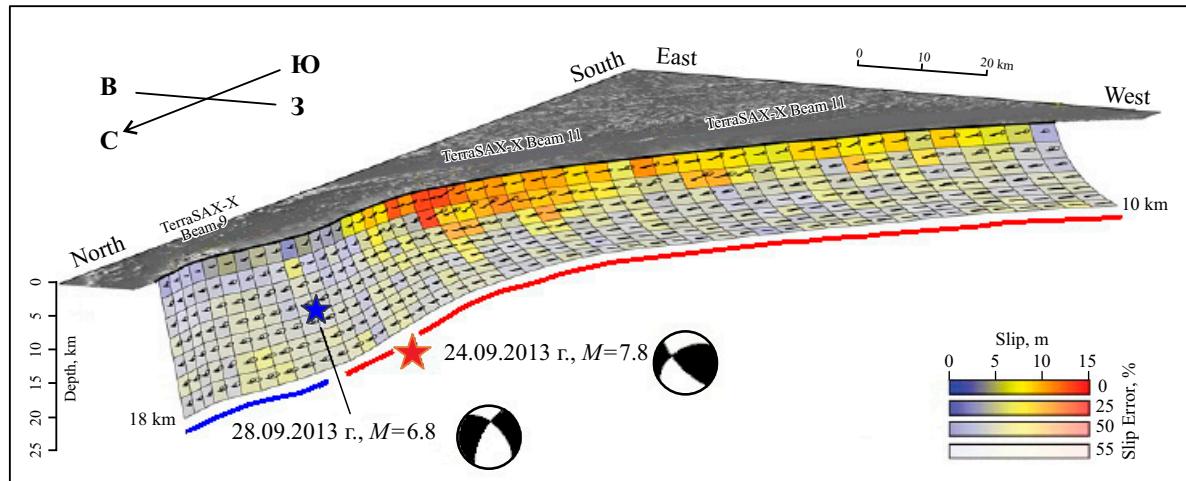
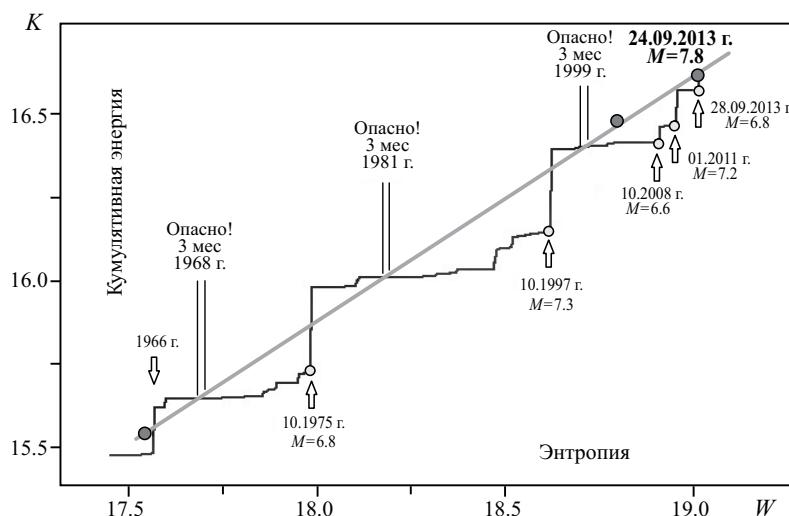


Рис. 12. 3D-геометрия и средние косейсмические подвижки в плоско-изгиблой модели разлома

По динамике формирования геометрии очагов землетрясение с  $M = 6.8$  было подготовлено раньше (к 28 сентября) на плоском близвертикальном сегменте разлома, и только после этого продолжилось формирование момента очага землетрясения с  $M = 7.7$  в течение 10 сут к 4 октября на изогнутом протяженном участке длиной 160 км. Характер геометрии показывает, что относительно слабое землетрясение пары был триггером медленного формирования очага более сильного землетрясения.

**Траектория подготовки.** Несколько подробнее опишем траекторию подготовки и прогноз последнего разрушительного землетрясения 24 сентября 2013 года в СС Пакистан–Афганистан с пороговой магнитудой  $M_{th} = 7.5$ , где все землетрясения с  $M < 7.5$  считаются индикаторами. Подготовка этого землетрясения началась после 1956 г. и продолжалась 57 лет. На рис. 13 приведен укрупненный фрагмент траектории подготовки этого землетрясения на трековой диаграмме. Метод сейсмической энтропии с очень большой надежностью дает «от-



**Рис. 13.** Укрупненный фрагмент подготовки двойного землетрясения 2013 года в СС Пакистан–Афганистан с пороговой магнитудой  $M_{th} = 7.5$

рицательный» прогноз и тем самым поднимает эффективность реальных прогнозов. За 57 лет в СС было опасно в общей сложности 9 мес (по 3 мес в 1968, 1981 и 1999 гг., когда траектория пересекала линейную зону неустойчивости).

Это значит, что 98.3% времени мониторинга в системе было безопасно, землетрясения с  $M \geq 7.5$  не ожидались. Траектория в основном находилась ниже линейной зоны неустойчивости, что является особенностью подготовки сильных землетрясений в СС Пакистан–Афганистан. На рис. 13 видна роль сильных землетрясений-индикаторов с магнитудами в диапазоне  $6.6 \leq M < 7.5$ , которые не дают траектории далеко удаляться от зоны неустойчивости и скачкообразно возвращают ее в ближнюю зону. Такую роль выполняли парные землетрясения 1975, 1997 и 2008 гг.

В 2011 г. эту роль сыграло необычное глубокофокусное землетрясение Далбандин (18 января,  $M = 7.2$ , средние разрушения, погибли 7 человек) с нормальным механизмом в относительно сейсмически спокойном регионе на ЮЗ Пакистана [Martin, Kakar, 2012]. С одной стороны, возникновение такого нетипичного землетрясения 2011 г. близ границы СС объясняется большим отклонением от линейной зоны неустойчивости при высоких значениях энтропии; с другой, его энергия не полностью компенсировала дефицит кумулятивной энергии. На трековой диаграмме видно, что это землетрясение сыграло решающую роль в подготовке двойного землетрясения 2013 г., которое произошло спустя ~ 2.5 года по механизму, описанному на рис. 10, б.

## Обсуждение результатов

ДЗ выделяются на основе трековых и энергетических диаграмм и возникают в СС, когда траектория развивается на протяжении десятков лет с дефицитом кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов, т.е. при высоких значениях энтропии находится ниже зоны неустойчивости. ДЗ – это самостоятельные землетрясения, выступающие в связке. Посредством тесного пространственно-временного энергетического взаимодействия они выполняют разные, взаимно дополняющие друг друга функции в едином сейсмотектоническом процессе, когда возникают критические ситуации в СС.

На основе продолжительности времени между ними, ДЗ можно разбить на три вида: I – близкие по времени (от минуты до нескольких суток) с переплетенными (запутанными) механизмами очагов (типа взброс – сдвиг); II – с интервалом в 1.5–2.0 мес на разломах L-образного типа (сдвиговой разлом – взброс), возникающие во внутрив плитовых зонах; III – с интервалом от 1 до 2 мес, возникающие в зонах субдукции с разными механизмами (первый – подвиг плит, взброс, второй – разрыв в подвигающейся плите с механизмом сброса). Приведенная классификация позволяет выявить и разработать критерии количественного прогноза обоих ДЗ.

В СС наблюдаются и другие случаи сильных землетрясений с близкими эпицентрами и временем в очаге, но мы по разным причинам не причисляем их к ДЗ. Приведем несколько примеров таких землетрясений. Каскад близких землетря-

сений в 2016 г. (24 августа,  $M = 6.2$ , 26 и 30 октября,  $M = 6.1$  и  $M = 6.7$ ) в центральной Италии с нормальными механизмами мы не причисляем к ДЗ, поскольку все они имели подготовку и предсказываются в соответствующих системах и подсистемах Италии с пороговыми магнитудами 5.8, 6.2, 6.6.

Вблизи границ СС могут близко располагаться эпицентры двух сильных землетрясений, произошедших почти одновременно. Такое наблюдается, если они находятся в разных системах, т.е. граница систем проходит между ними. Обычно принадлежность к разным системам подтверждается

геометрией распространения афтершоковой области. К таким землетрясениям относятся, например, катастрофическое землетрясение Суматра-Андаман 26 сентября 2004 г.,  $M = 9.0$  и сильное землетрясение на севере Суматры 28 марта 2005 г.,  $M = 8.5$ . Несмотря на то, что эпицентры этих землетрясений находились на расстоянии 200 км друг от друга, они располагались в разных системах (первое в СС Андаман-Никобар, второе в СС Суматра) и имели независимые траектории подготовки, поэтому мы не причисляем их к ДЗ. Изучению таких землетрясений будут посвящены отдельные публикации.

## ЛИТЕРАТУРА

- Акопян С.Ц.** Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.
- Акопян С.Ц.** Сейсмические системы Японии: энтропия и мониторинг мегаземлетрясения Токио 11.03.2011 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 2. С. 67–90.
- Акопян С.Ц.** Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 61–82.
- Акопян С.Ц.** Энтропия, мониторинг сейсмичности на Армянском нагорье и динамика заполнения Ахурянского водохранилища // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44, № 1. С. 71–80. DOI: 10.21455/VIS2017.1-4
- Акопян С.Ц., Рогожин Е.А.** Моделирование кинематики Тавро-Кавказского региона и динамика подготовки сильных землетрясений с  $M \geq 7.1$  // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 2. С. 5–24.
- Акопян С.Ц., Бондар В.Г., Рогожин Е.А.** Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Филина А.Г.** Тувинское землетрясение 27.12.2011 г. и его афтершоки // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т.4, NZ2002. DOI: 10.2205/2012NZ000112
- Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Кужугет К.С., Бутанаев Ю.В., Ларьков А.С., Новиков С.С.** Результаты полевых сейсмологических исследований Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2014. С. 57–79. [http://ipc-publisher.ru/collections\\_1.aspx?id\\_sb=11](http://ipc-publisher.ru/collections_1.aspx?id_sb=11)
- Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кужугет К.С., Бутанаев Ю.В.** Геологические исследования Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Вопросы инженер-
- ной сейсмологии. 2016. Т. 43, № 1. С. 5–28.
- Овсяченко А.Н., Вакарчук Р.Н., Рогожин Е.А., Бутанаев Ю.В., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С.** Тектоническая позиция, геологические проявления и тектонофизическое значение Тувинских землетрясений 2011–2012 г. // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы Наук о Земле. Москва, 2016. С. 502–506.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С.** Тектоническая позиция и предварительные данные о геологических проявлениях Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39, № 2. С. 69–78.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Лунев Б.В.** Поля смещений блоков Алтая-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 3. С. 481–497.
- Akopian S.Ts.** Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of long-term prediction of large earthquakes: By examples of the Armenian Upland, North-Western Iran, Italy and Central California. Moscow: Triumph Publishing, 2013. 92 p.
- Akopian S.Ts.** Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: Energy balance and entropy funnels // Geophys. J. Int. 2015. V. 201. P. 1618–1641. DOI: 10.1093/gji/ggv096
- Akopian S.Ts.** Entropy seismology and the view of cosmology: Seismic formalism and alphabet of evolution // Nat. Ac. of Sci. of RA Electronic Journal of Natural sciences. 2017. № 1 (28). P. 53–73.
- Akopian S.Ts., Kocharian A.N.** Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. 2014. V. 196. P. 580–599. DOI: 10.1093/gji/ggt398
- Avouac J.-P., Ayoub F., Wei S., Ampuero J.-P., Meng L., Leprince S., Jolivet R., Duputel Z., Helmberger D.** The 2013, Mw 7.7 Balochistan earthquake, energetic

- strike-slip reactivation of a thrust fault // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 391. P. 128–134. DOI:10.1016/j.epsl.2014.01.036
- Bakun W.H., Hopper M.G.* Magnitudes and locations of the 1881–1812 New Madrid, Missouri, and the 1886 Charleston, South Carolina, earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2004. V. 94, No. 1. P. 64–75.
- Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Amarjargal S., Deverchere J.* GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, B10. P. 2501. DOI:10.1029/2002JB002373
- Jolivet R., Duputel Z., Riel B., Simons M., Rivera L., Minson S.E., Zhang H., Aivazis M.A.G., Ayoub F.,*
- Leprince S., Samsonov S., Motagh M., Fielding E.J.* The 2013 Mw 7.7 Balochistan earthquake: Seismic potential of an accretionary wedge // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2014. V. 104, No. 2. P. 1020–1030. DOI: 10.1785/0120130313
- Martin S.S., Kakar D.M.* The 19 January 2011 Mw 7.2 Dalbandin earthquake, Balochistan // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2012. V. 102 (4). P. 1810–1819. DOI:10.1785/0120110221
- Tuttle M.P., Schweig E.S., Sims J.D., Lafferty R.H., Wolf L.W., Haynes M.L.* The earthquake potential of the New Madrid seismic zone // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2002. V. 92. P. 2080–2089.
- Wesnousky S.G.* Predicting the endpoints of earthquake ruptures // *Nature*. 2006. V.444, No. 7117. P. 358–360.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**АКОПЯН Самвел Цолакович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-90-95. E-mail: sakopian@yandex.ru

## DOUBLE EARTHQUAKES, THEIR NATURE AND FORECAST BY THE METHOD OF SEISMIC ENTROPY

S.Ts. AKOPIAN

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**ABSTRACT.** Double earthquakes are strong earthquakes close in time, place and magnitude. This is quite rare and difficult to explain events. Elucidation of the nature of their occurrence is important for forecasting. The method of seismic entropy, involving the results of studies of processes in the sources of strong earthquakes by other methods, allows to identify the nature of such earthquakes, to determine them as independent earthquakes with a specific tectonic relationship, to distinguish them from other cases of close but independent earthquakes, as well as to distinguish them against the background of foreshocks and aftershocks. Double earthquakes identified in the seismic systems located in different seismotectonic situations in the Altai, in the Kuril Islands, in the Central United States, but indeed their "homeland" is Pakistan. Characteristic features on which their classification is carried out are studied.

**KEYWORDS:** kinematic model, track diagram, seismic entropy, instability analysis, seismicity monitoring

#### ABOUT THE AUTHOR

**AKOPIAN Samvel Tsolakovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya, 10, building 1. Phone: (499) 254-90-95. E-mail: sakopian@yandex.ru

**CITE THIS ARTICLE AS:** Akopian S.Ts. Double earthquakes, their nature and forecast by the method of seismic entropy, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology), 2018, Vol. 45, No. 2, pp. 33–46. [in Russian]. DOI: 10.21455/VIS2018.2-3

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>, 2019, Volume 55, Issue 2.