

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ЗАКОН ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ И АНСАМБЛИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2016 г. С. Ц. Акопян

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

E-mail: sakopian@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.03.2015 г.

Выявлены закономерности, которые на основе сейсмостатистики управляют временной эволюцией динамики подготовки сильных землетрясений в дискретных замкнутых объемах литосферы, сейсмических системах (СС). Эта концепция была сформулирована ранее как феноменологический подход, основанный на сейсмической энтропии для мониторинга сильных землетрясений в реальном масштабе времени. Сейсмические параметры кумулятивной энергии и энтропии содержат энергетическую-временную память о предыдущих землетрясениях в выделенном объеме, что позволяет описывать пространственно-временную неравновесную динамику активного объема литосферы Земли в режиме реального времени. Теоретически выведен степенной закон между информационной энтропией и кумулятивной энергией, подтверждающий ранее выявленные эмпирические закономерности. В СС сильные землетрясения определенного магнитудного диапазона объединяются в ансамбли, образуя сейсмические циклы, периодически восстанавливающие равновесное состояние системы. Сильные землетрясения ансамбля стремятся со временем заполнять СС. Конфигурация и размер СС, минимальный параметр действия приводят к избирательности и дискретности понятия магнитуды землетрясения в зависимости от масштаба системы. Каждая СС имеет некоторый минимальный порог магнитуд, выше которого нарушается закон Гутенберга–Рихтера, а землетрясения индикаторы, управляемые распределением Пуассона в рамках закона производства энтропии, играют решающую роль в подготовке сильных землетрясений. Некоторые результаты продемонстрированы на примере недавних сильных землетрясений в центральных Курилах.

DOI: 10.7868/S0002333716060016

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмологию как науку о землетрясениях можно условно разделить на две части. Первая, включающая регистрацию сейсмических событий, изучение очага и распространение сейсмических волн, хорошо изучена и интенсивно развивается (см., например, [Аки, Ричардс, 1983]). А вторая часть, изучающая сейсмические процессы в реальной среде, приводящие к подготовке сильных землетрясений, находится в зачаточном состоянии, поскольку отсутствует теория описания сейсмических процессов, опирающаяся на сейсмостатистику (каталоги землетрясений). В классической механике информационной единицей, метрикой, является материальная частица (масса), в электричестве — заряд, в статистической физике и квантовой механике молекулы, атомы, электроны, протоны и другие элементарные частицы. В сейсмологии такой информационной единицей может служить элементарное микроземлетрясение [Акопян, 1995]. Теория, основанная на сейсмоисточниках, построенная, по аналогии с механикой, на основе сейсмического действия, может количественно описывать и объяснять закономер-

ности сейсмичности в реальной геологической среде и прогнозировать их развитие во времени. Сложность построения статистической теории в сейсмологии имеет объективные трудности. Здесь мы имеем дело со статистикой, которая существенно отличается от статистики в классической физике. В классической статистике система состоит из множества, в общем, равнозначных частиц (материальных точек, атомов, молекул). В сейсмологии имеем дело с неравнозначной статистикой, “частицы” системы (землетрясения) по энергии имеют большой разброс. Число (статистика) “частиц” системы уменьшается при переходе к энергетически значимым событиям (крупным землетрясениям), поэтому методы обычной статистики становятся неприемлемыми при описании сильных землетрясений. В сейсмостатистике существуют и развиваются отдельные методы и подходы, опирающиеся на эмпирические закономерности, из которых самый известный это закон повторяемости Гутенберга–Рихтера (ГР) [Gutenberg, Richter, 1954]. Однако этот закон не физический, в нем не сохраняется размерность. Еще в 1981 году японский сейсмолог К. Касахара отмечал: “Несмотря

на многие исследования, остается непонятным, почему высвобождение энергии следует закону ГР” [Касахара, 1985]. Закон ГР нарушается в области больших магнитуд при уменьшении статистики и шага времени осреднения. К недостаткам закона ГР при описании сейсмических процессов относятся и отсутствие строгих критериев выбора сейсмоактивного объема [Акопян, 1998; 2007]. В результате появляются неограниченные возможности выборки статистики из большого массива данных и большой простор исследований (в зависимости от предпочтений сейсмолога). Проблема выбора сейсмоактивного объема возникает и в задачах прогнозирования землетрясений [Костров, 1974; Dobrovolsky et al., 1979], и при вероятностной оценке сейсмической опасности [Jordan et al., 2011]. Подходы, основанные на решении задач сейсмичности и динамики подготовки землетрясений с применением механики и лабораторных моделей, позволяют в общих чертах решать частные задачи [Райс, 1982; Соболев, 1993]. При переходе к реальным средам для проверки механических моделей отсутствует необходимая эмпирическая информация, поскольку накопление напряжений и деформаций в активных структурных элементах литосферы во времени недоступны для прямых измерений с требуемой точностью [Акопян, Рогожин, 2013]. Введение параметров кумулятивной энергии, числа состояний, сейсмической энтропии в сейсмостатистику позволило выявить некоторые закономерности и построить теорию количественного описания сейсмических процессов [Акопян, 2013]. Выделение объема (конфигурации на поверхности и глубины) сейсмически активной литосферы по определенным критериям, ответственным за подготовку землетрясений определенного энергетического уровня, является важным шагом в сложной задаче динамики землетрясений. Закономерности, выявленные эмпирически, в дальнейшем были обоснованы теоретически [Акопян, Кочарян, 2013]. Была разработана теория описания сейсмических процессов для открытых диссипативных систем на основе сейсмостатистики, позволяющая описывать процессы возникновения катастроф в виртуальном пространстве время, энергия и энтропия [Акопян, 2015]. СС стремится к максимально вероятным макроскопическим состояниям с критической неустойчивостью, где происходит восстановление равновесия посредством сильного землетрясения. СС считается определенной только тогда, когда сильные землетрясения образуют канонический ансамбль (статистически) независимых сейсмических событий [Ландау, Лифшиц, 1964; Пригожин, 1985]. В статье излагаются основные физические принципы и закономерности, лежащие в основе метода сейсмической энтропии, приводится теоретиче-

ское обоснование ранее полученных эмпирических закономерностей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим сейсмически активный регион, находящийся в состоянии сжатия с позиций плитовой тектоники. Литосфера активного региона имеет сложную иерархическую плитоблоковую структуру со специфическими сейсмическими свойствами. Для моделирования такой структуры были введены ряд сейсмических параметров и определений. Каждое землетрясение рассматриваем как точечный источник сейсмических волн с пространственно-временными координатами и энергией, φ_i , λ_i , h_i , t_i , E_i , где φ , λ широта и долгота, h фокальная глубина очага, t время в очаге землетрясения. Упругая сейсмическая энергия излучения E_i определяется через магнитуду землетрясения M_i [Gutenberg, Richter, 1956]:

$$\lg E_i = \alpha + \gamma M_i. \quad (1)$$

При значении параметров $\alpha = 4.8$ и $\gamma = 1.5$ энергия измеряется в Дж. В таком подходе пространственное расположение разрыва в очаге заменяется точкой на глубине, гипоцентром, где зарождается разрыв в момент его первого динамического движения. Т.е. объемные характеристики источника (разрывы, фокальные механизмы, и так далее) не учитываются. СС являются масштабными формированиями, которые включают сегменты активных разломов, способных генерировать сильные землетрясения. Они занимают замкнутый объем литосферы V , внутри которых происходит подготовка сильных землетрясений. На рис. 1 схематично изображена СС, которая включает плоскости реальных контактных неоднородностей (асферитис) на поверхностях разломов [Scholz, 2002]. Характерные параметры системы также показаны на рисунке. Нашей целью является выявление закономерностей, позволяющих найти правильные границы объема СС (глубины H и конфигурации L на поверхности).

Первоначальный объем СС выбирается на основе плито-тектонической модели региона, в дальнейшем границы уточняются на основе сейсмических закономерностей. СС характеризуется пороговой магнитудой M_{th} . Все землетрясения с магнитудами больше или равным пороговому значению $M \geq M_{th}$ называются сильными, а землетрясения с магнитудами $M_{min} \leq M < M_{th}$ считаются землетрясениями индикаторами, здесь M_{min} является минимальной магнитудой представительности землетрясений в региональном каталоге. Интервал времени между двумя последовательными сильными землетрясениями в СС называется сейсмическим циклом, $T_j = t_j - t_{j-1}$, где t_j и t_{j-1} времени в очаге сильных землетрясений. Изменения

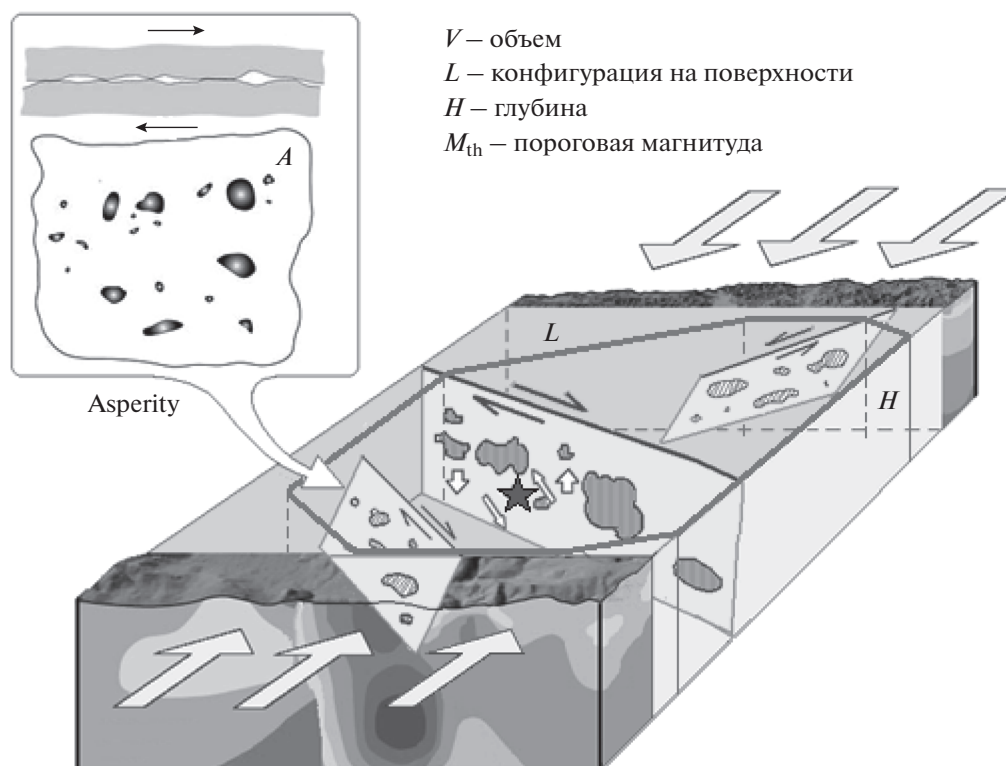


Рис. 1. Схематическое изображение гипотетической СС с конфигурацией на поверхности L , глубиной H и плоскостями активных разломов с контактными неровностями A (асферитис) при внешнем сжатии.

параметров внутри сейсмических циклов будем обозначать индексом i , а сейсмические циклы будем нумеровать индексом j ($j = 1, 2, \dots, N$), где N это количество реализованных сейсмических циклов или количество сильных землетрясений. Текущий временной интервал в любом сейсмическом цикле Травен $T = t - t_{j-1}$. Количественное описание сейсмических процессов (или математическое моделирование) определим как установление функциональной зависимости между параметрами сильных землетрясений и кумулятивными параметрами землетрясений индикаторов.

Приведем основные принципы математического моделирования сейсмических процессов в СС. Для этого требуется представительный каталог землетрясений с $M \geq M_{\min}$ и предварительная плито-тектоническая модель региона. За единичный интервал времени δt для расчетов можно взять секунду, минуту, час, месяц и так далее. Предположим, что к моменту времени t (начиная с некоторого начального момента времени t_0) завершены $N - 1$ циклов. Полная энергия излучения в сейсмическом цикле к моменту времени t определяется параметром кумулятивной энергии E_c , которая равна суммарной излученной энергии всех землетрясений индикаторов (рис. 2):

$$E_c(t) = \sum_{i=1}^{\tilde{N}(t)} E_i, \quad (2)$$

где \tilde{N} число всех землетрясений индикаторов с энергиями $E_i \geq E_{\min}$, зарегистрированных в объеме V системы после последнего сильного землетрясения t_{N-1} . На рис. 2 показана схема расчета $E_c(t)$ после гипотетического сильного землетрясения в момент времени t_0 . Для описания изменения состояния системы во времени введем сейсмический параметр $S_N(t)$, который аналогичен действию в механике Ньютона:

$$S_N(t) = (t - t_{N-1}) E_c - \sum_{i=1}^{\tilde{N}(t)} (t_i - t_{N-1}) E_i, \quad (3)$$

где t_i и E_i — времена возникновения землетрясений индикаторов и их энергия излучения соответственно. Выражение (3) для текущего момента времени $T = t - t_{j-1}$ внутри сейсмического цикла j может быть записано в компактной форме:

$$S = T E_c - \sum_{i=1}^{\tilde{N}} T_i E_i. \quad (4)$$

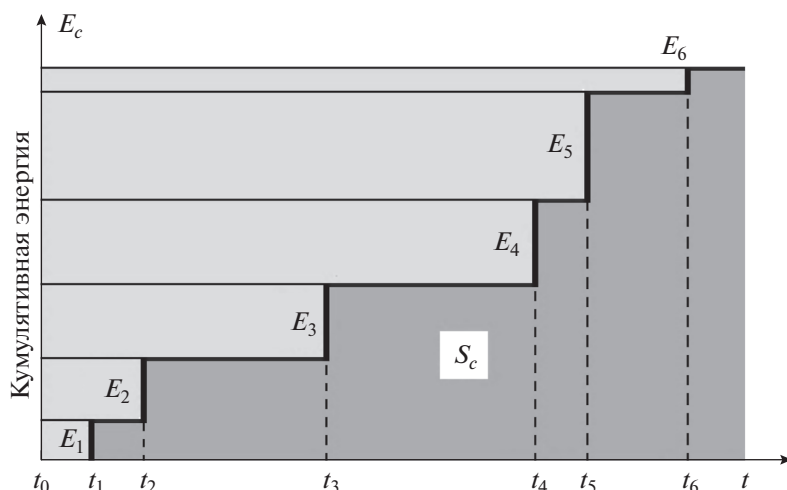


Рис. 2. Схематическое изображение ступенчато возрастающей функции кумулятивной энергии $E_c(t)$ в зависимости от времени внутри сейсмического цикла. Показаны значения энергии E_i и соответствующие времена t_i ($i = 1-6$) шести землетрясений индикаторов. Параметр $S_c(t)$ равен площади под функцией энергии $E_c(t)$.

Параметр $S(t)$, как показано на рис. 2, описывает площадь под функцией кумулятивной энергии $E_c(t)$. Сейсмический параметр $S(t)$ растет значительно быстрее, чем ступенчато растущий параметр кумулятивной энергии. Оба параметра $S(t)$ и $E_c(t)$ являются неубывающими функциями времени. Для удобства, чтобы избежать осложнений, связанных с появлением больших чисел в сейсмологии, мы заменяем параметры (2) и (3) соответствующими десятичными логарифмами:

$$K_c = \lg E_c \quad W(t) = \lg S(t), \quad (5)$$

где K_c является кумулятивным энергетическим классом землетрясений индикаторов, а W имеет смысл энтропии, аналогичной физической энтропии в термодинамике.

Кумулятивный параметр энергии позволяет хранить память о выделившейся энергии, а зависимость от времени позволяет хранить информацию о временах и хронологию прошлых событий (землетрясений индикаторов). На практике эти параметры могут быть легко рассчитаны на основе существующих каталогов землетрясений. Таким образом, в любой момент времени внутри сейсмического цикла состояние СС определяется парой параметров E_c и S (или K_c и W).

Определение СС существенно отличается от определения системы в классической механике [Ландау, Лифшиц, 1973]. Для выявления физического смысла введенных параметров (2) и (3) проведем некоторый сравнительный анализ. В классической механике система состоит из N материальных точек в пространстве. Одновременное задание всех обобщенных координат q_i и скоростей \dot{q}_i определяет положение системы и позво-

ляет предсказать движение в будущие моменты времени на основе принципа наименьшего действия. Движение системы математически описывается дифференциальными уравнениями второго порядка по отношению к функциям $q(t)$, интегрирование которых позволяет определить траекторию движения механической системы. Такой подход, однако, приводит к усложнению задачи. Функция действия механической системы (в терминах Гамильтониана), при сохранении энергии ($E = \text{const}$) вдоль траектории движения от t_0 до t , может быть записана в виде [Ландау, Лифшиц, 1973]

$$S = -E(t - t_0) + \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^N p_i dq_i, \quad (6)$$

где p_i и q_i являются каноническими импульсами и координатами материальных точек. Несмотря на внешнюю схожесть и одинаковую размерность ($\text{энергия} \times \text{время}$), уравнения (3) и (6) значительно отличаются друг от друга содержанием. Сейсмическое действие (3) отличается знаком от механического, так как оно описывает изменение (развитие) открытой системы во времени, в то время как действие (6) описывает движение закрытой консервативной механической системы в пространстве. В отличие от классической физики, где канонические координаты описывают движение, параметры (2) и (3) описывают число возможных состояний не отдельных частиц, а всей системы в целом в текущий момент времени с учетом всей истории эволюции СС. Поведение системы как целого, как некоторого специфического объема литосферы, существенно упрощает задачу и изменяет смысл пространства и времени.

В геологической среде выделяется некоторая активная плито-блоковая структура с взаимосвязанными внутренними и внешними свойствами, сохраняющимися и развивающимися во времени. СС, как и биологические объекты, не вечны, они рождаются, “живут” и “умирают” в течение геологических эпох, когда все особенности структур, поддерживающих внутреннее и внешнее взаимодействие, разрушаются и тектоническая активность прекращается.

Тектонические силы, обусловленные движением плит, приводят к напряжениям и деформациям в литосфере, а в некоторых локальных объемах геологической среды и к разрывным нарушениям с высвобождением упругой и неупругой энергии. Однако напряжения и деформации в больших объемах среды не являются параметрами, которые можно надежно регистрировать для решения задач динамики и зарождения неустойчивости. По этой причине мы существенно упрощаем задачу и описываем энергетическое состояние системы как целого, посредством хорошо регистрируемых в сейсмологии параметров. В результате упрощенного подхода, описание состояния СС осуществляется меньшим числом параметров, то есть менее подробно, чем при классической механике. Упрощенный подход приводит к потере информации и к неопределенности. Задача, которая решается в сейсмических циклах, это снятие возникшей неопределенности — уменьшение количества рассматриваемых вариантов, и в итоге выбор одного, наиболее вероятного состояния из числа возможных. Информация сильного землетрясения ансамбля полностью снимает возникшую неопределенность. В этом и заключается управляющая роль информационной энтропии. Есть некоторое сходство между нашим подходом и определением статистической системы [Ландау, Лифшиц, 1964]. Статистическое состояние замкнутой системы в целом, находящейся в состоянии покоя (при отсутствии поступательного и вращательного движения), зависит только от энергии. Из семи аддитивных независимых интегралов движения (энергии, трех компонент вектора импульса и трех компонент углового момента), которые полностью определяют статистические свойства замкнутой системы, остается только энергия. Однако в нашем подходе система открытая, так что энергия не является интегралом движения, а становится зависимым от времени. Т.е. время, входящее в параметр S , наряду с энергией, становится независимым параметром, характеризующим состояние системы.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЭНТРОПИЯ

Временная зависимость кумулятивной энергии (2) имеет очень прозрачный физический смысл. Неубывающая функция E_c показывает на-

правление течения сеймотектонических процессов в объеме V со временем; она также хранит память о выделившейся упругой сейсмической энергии. Параметр S в уравнении (3) хранит память о количестве излучаемой (упругой) энергии и информацию о временах всех землетрясений индикаторов. Существенным здесь является то, что даже во время сейсмического затишья, когда совокупная выделившаяся сейсмическая энергия E_c остается практически постоянной, параметр $S(t)$ линейно растет со временем. Это означает, что само отсутствие сейсмической активности является весьма важной информацией, содержащейся в параметре S , для описания поведения динамической структуры системы. Таким образом, чем больше время наблюдения, тем больше информации мы получаем. Поведение системы зависит от процессов на неровностях контактных поверхностей (разломов) при внешнем сжатии. Разрывы, ползучесть, потоки флюидов, микротрещины, ослабление и упрочнение и другие процессы, которые происходят в локальных доменах системы (но не обязательно в очаговых зонах землетрясений), это сложные необратимые процессы, происходящие в системе с течением времени. Эти процессы, действуя коллективно, описывают динамическое поведение СС. Функция S в (3) содержит одновременно пространственно-временную и энергетическую информацию о состоянии среды СС.

Для математического моделирования СС от микроскопического уровня до макроскопического была введена метрика: “минимальная” информационная единица. Мы выбрали микроскопическую порцию энергии $E_h = 1$ Дж, которая однозначно определяет величину элементарного объема V_h источника СС и его линейный размер l_h :

$$V_h = \frac{E_h}{\epsilon}; \quad l_h = (V_h)^{1/3}, \quad (7)$$

где $\epsilon = 10^{-4}$ Дж см⁻³ максимальная плотность потенциальной энергии, которую может накопить единица объема горной породы [Tsuboi, 1956]. Магнитуда элементарного землетрясения с энергией $E_h = 1$ Дж, вычисленная по формуле (1), будет равна $M_h = -3.2$, линейный размер разрыва в очаге $l_h \approx 22$ см. Характерные времена в очаге определяются скоростью распространения разрушения (~ 3 км/с) и скоростью смещения частиц вдоль микроразрыва (~ 100 см/с). Они будут иметь соответственно значения $\tau_{s1} = 6.7 \times 10^{-5}$ с и $\tau_{s2} = 0.2$ с. Исходя из этого, метрическую единицу времени δt_h , задающую минимальный шаг времени, можно взять больше этих величин, например, равной 1 с. Столь малая величина достаточна, чтобы описывать эволюцию реальных сейсмических про-

цессов и подготовку сильных землетрясений на основе сейсмостатистики.

С учетом необходимой точности регистрации времени и энергии землетрясений был введен элементарный параметр действия h_s для самого слабого микроземлетрясения с сейсмической энергией $E_h = 1$ Дж, зарегистрированного в течение 1 с [Акопян, 1995]:

$$h_s = E_h \delta t_h = 1 \text{ Дж с.} \quad (8)$$

Это действие включает в себя единичный (элементарный) источник, микроземлетрясение объема $V_h \approx 10^4 \text{ см}^3$, который достаточен для генерации порции сейсмической энергии излучения, равной 1 Дж. Минимальная базовая единица излучения является масштабной мерой пространственно-энергетической неоднородности в системе. На практике выбор элементарной порции сейсмической энергии определяется уровнем сейсмических шумов, чувствительностью сейсмических приборов и размерами системы и может быть больше чем (8).

Энтропия как мера беспорядка является фундаментальным понятием для характеристики сложности динамики природных процессов, может быть определена и в сейсмостатистике. По аналогии с физической энтропией в термодинамике [Ландау, Лифшиц, 1964], введение кумулятивного параметра W в логарифмической шкале (5) определяет сейсмическую энтропию:

$$W = \lg \frac{S}{h_s}, \quad (9)$$

где, как показано ниже, безразмерный параметр S/h_s определяет общее число возможных энергетических состояний для СС за время, прошедшее с момента последнего сильного землетрясения. Т.е. в энтропийном подходе в сейсмологии статистикой является не число землетрясений N , а число возможных энергетических состояний $E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cN}$, которые определяются параметром S/h_s . Характерный размер “квантового” микроземлетрясения находится в сантиметровом диапазоне, в то время как характерный пространственный масштаб межмолекулярных сил приходится на длины порядка ангстрема (10^{-8} см). Иначе говоря, объем элементарного микроземлетрясения содержит около $(10^9)^3 \sim 10^{27}$ молекул. Возникновение сложного из такого огромного числа частиц создало простую объемную макроструктурную единицу h_s , которая является характерным (микроскопическим) масштабом упорядоченности для описания СС. Равновесные структуры в термодинамике определены на молекулярном уровне, а в сейсмологии на уровне элементарного микроземлетрясения. Сейсмическая энтропия не описывает термодинамические характеристики геологических сред. В сейсмических циклах на-

чальное однородное состояние СС менее структурировано, нежели конечное.

Очевидно, что W равно нулю для $S = h_s$, которое соответствует основному состоянию с минимальной энергией (1 Дж). СС в этом базовом состоянии (в некоторый начальный момент этапа эволюции) определяется как идеально-однородная. Первичная СС включала только пространственные неоднородности (трещины), не превосходящие базовую элементарную единичную трещину. В (9) энтропия стремится к бесконечности при $h_s \rightarrow 0$, что означает энтропия непрерывного распределения бесконечно большая. Однако, выбирая h_s конечной, мы переходим к дискретности и к неопределенности начального состояния (8). Начальное состояние $h_s = E_h \delta t_h$ никогда не может быть известно точно — даже теоретически, поскольку проведение каждого измерения требует конечного времени. Итак, начальное состояние конечно и определяется точностью ΔE_h и Δt_h наших измерений. Выбирая “шаги квантования”, мы приходим к неравновесным системам и к конечным значениям энтропии. Для простоты, всюду ниже мы будем использовать безразмерные параметры $S/h_s \rightarrow S$, $E_c/E_h \rightarrow E_c$, $t/\delta t_h \rightarrow t$. Индекс c кумулятивности энергии может быть опущен, если специально не оговорено.

ВЫРОЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Как было установлено в работе [Акопян, 1998], функция S равна общему количеству возможных состояний системы в сейсмических циклах. Обсудим этот вопрос подробнее и докажем этот постулат. Формально изобразим элементарное состояние СС в виде ячейки с безразмерной площадью $S = h_s = 1$ (это следует из формулы (4), при $T_1 = 0$, $T = \delta t_h$, $E_c = E_1 = E_h$). Назовем эту ячейку базовым землетрясением (БЗ) с минимальным энергетическим уровнем и нулевой энтропией ($W = 0$), а такое начальное состояние системы определим как идеально однородным сейсмическим равновесным состоянием. Отметим, что БЗ является метрикой (единичной мерой) кумулятивной энергии землетрясений индикаторов и параметра S . Например, если кумулятивная энергия в единицу времени возросла на три БЗ, это означает, что произошло одно землетрясение индикатор с энергий, равной трем БЗ (количество БЗ не равно числу землетрясений индикаторов). Мы также для простоты будем считать, что в такой идеальной однородной системе землетрясения индикаторы происходят случайно и без сопровождения шумов. При $S = 1$, система имеет только одно состояние БЗ, которое имеет единичную энергию, $E = 1$. Далее, при $S = 2$, которое соответствует системе с двумя ячейками, то есть

систему, которая может существовать в двух состояниях с различными энергиями, $E = 1$ и 2 . Состояние с энергией $E = 1$ существует для двух последовательных (временных) интервалов, в то время как состояние $E = 2$ с двумя энергиями БЗ существует во втором промежутке времени. При $S = 3$, имеем состояния с тремя клетками (БЗ) и три возможных состояния с разными кумулятивными энергиями, $E \leq S$: состояние $E = 1$ соответствует одному значению энергии БЗ для трех последовательных интервалов; состояние $E = 2$ соответствует случаю одного БЗ на второй секунде и двум энергиям БЗ на третьей секунде; состояние с энергией $E = 3$ соответствует случаю, когда на третьей секунде происходит толчок в три единицы БЗ. Перечисленные три состояния имеют разные значения кумулятивной энергии E . При $S = 4$, имеем четыре конечных состояния системы, с кумулятивными энергиями $E = 1, 2, 3$ и 4 , соответственно. Однако, как видно на рис. 3, состояния с $S = 4$ и $E = 2$ вырождено, так как имеем два конечных состояния с одинаковой энергией, $E = 2$. Состояние с фиксированным значением S называется вырожденным, если система может прийти в это конечное состояние (двумя и более) различными путями, но с одинаковой конечной энергией E . Число всех возможных путей достижения вырожденного состояния назовем степенью вырождения. Все возможные состояния при $S = 5$ и 6 показаны на рис. 3. Детальное рассмотрение на уровне клеток показывает, что для любого заданного значения S число N всех возможных конечных состояний кумулятивной энергии СС всегда равно S ($N = S$). Эти конечные состояния ($N = S$) на рис. 3 обозначены темными клетками.

Любое текущее (конечное) состояние СС может быть представлено точкой $q_i = q(S_i, E_{ci})$ на диаграмме траектории $\{S, E_c\}$. Ступенчатая траектория, соединяющая начало координат с текущим состоянием, называется траекторией. Каждый скачок на траектории (пути) или ступенька на клеточной диаграмме на рис. 3 соответствует землетрясению индикатору. Кроме того, число n всех возможных путей (траекторий) в конечные состояния при $S > 3$ больше чем N ($n > N$), потому что некоторые из состояний вырождены. Количество вырожденных состояний и их степень вырождения постепенно увеличивается с увеличением S . Степень вырождения (m_i) текущего состояния зависит от числа возможных траекторий m_i , которые могут привести систему в это состояние. Очевидно, что:

$$\sum_{i=1}^S m_i = n. \quad (10)$$

Для случайных событий, рассматриваемых здесь, все дискретные значения кумулятивной энергии $E \leq S$ в СС достижимы. Так, если мы рассмотрим

энергетические состояния системы (рис. 3) без учета возможных путей прихода в эти состояния, то все энергетические состояния будут иметь равную вероятность. Учет истории излучения сейсмической энергии приводит к некоторой избирательности энергетических состояний системы, что имеет большое значение для физики подготовки сильного землетрясения. Таким образом, для данного S вырождение энергетических состояний поднимает совокупный уровень их "посещаемости" и делает некоторые состояния более вероятными. Энтропия (9) описывает энергетические состояния СС в отсутствие вырождения ($N = S$). Далее мы перейдем к определению информационной энтропии для СС, используя распределение вероятностей энергетических состояний для случайных сейсмических событий.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

Предположим, что для каждого фиксированного значения параметра S имеется дискретное множество состояний СС с различными кумулятивными энергиями E_{ci} , где $i = 1, 2, \dots, S$ (S число возможных энергетических состояний СС). Рассматривая землетрясения индикаторы как полностью случайные события, введем вероятность p_i обнаружения СС в состоянии с кумулятивной энергией E_{ci} , с учетом вырождения (10) этих энергетических состояний:

$$p_i = \frac{m_i}{n}, \quad \text{где } 0 < p_i < 1, \quad \sum_{i=1}^S p_i = 1. \quad (11)$$

По аналогии с энтропией Шеннона [Shannon, 1948; Николис, Пригожина, 1989], мы определим сейсмическую информационную энтропию как

$$\langle W \rangle = - \sum_{i=1}^S p_i \lg p_i, \quad (12)$$

где распределение p описывает наиболее вероятное распределение состояний кумулятивной энергии землетрясений индикаторов объема V в любой момент времени. В сейсмологии целесообразно использовать десятичный логарифм по основанию, вместо двоичного, используемого в энтропии Шеннона. Из формулы (12) видно, что для сильно упорядоченной системы с $p_i = 1$ для одного из возможных значения i и $p_i = 0$ для всех других значений i , информационная энтропия имеет нулевую неопределенность, $\langle W \rangle = 0$. Это соответствует, например, состоянию СС после сильного землетрясения, когда имеется достоверная информация о СС. При равномерном распределении $p_i = \tilde{p} = 1/S$ (без учета вырождения, т.е. без учета истории подготовки), количество информации, необходимое для полного определения состояния СС, максимальна и рав-

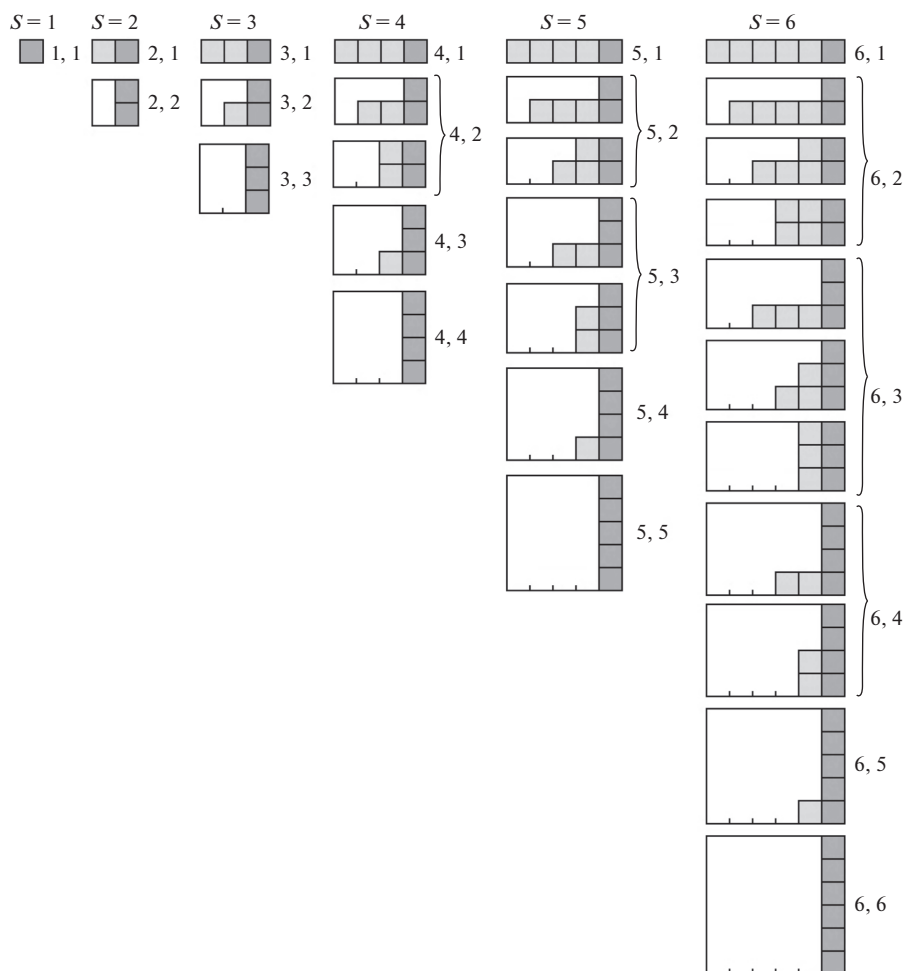


Рис. 3. Все возможные энергетические состояния системы при $S = 1-6$. Одна элементарная клетка (единичный квадрат) описывает базовое землетрясение. С правой стороны каждой колонки приведены соответствующие значения параметров состояния S и кумулятивной энергии E , (S, E) . Состояния с $S \leq 3$ не вырождены; вырождение состояний увеличивается с $S \geq 4$. Вырожденные состояния показаны фигурными скобками. Темные квадраты обозначают конечные состояния для каждого значения S .

на $\langle W \rangle_{\max} = \lg S$. Очевидно, что максимум информационной энтропии или состояние максимальной неопределенности (12) соответствует энтропии (хаотической) СС (9). Подставляя (11) в выражение (12), находим

$$\langle W \rangle = \lg n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^S m_i \lg m_i. \quad (13)$$

Уравнения (13) переходит в (9) при $m_i = 1$ и $n = S$, то есть при отсутствии вырождения.

На рис. 4 показано изменение информационной энтропии $\langle W \rangle$ в зависимости от S в диапазоне от 1 до 23, для двух кривых: верхняя кривая соответствует равномерному распределению вероятностей (без учета истории), а нижняя соответствует максимуму вероятности некоторых состояний, которые выделяются с учетом вырождения

(с учетом истории). Вырождение энергетических состояний существенно уменьшает количество возможных энергетических состояний и увеличивает точность исхода предсказаний при возрастании S . Поскольку вырождение начинается только с $S = 4$ (при $S > 3$), то для состояний с $S = 1, 2, 3$ эти кривые совпадают.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СОСТОЯНИЙ

Проведем более детальные исследования неравномерного распределения вероятностей с привлечением вырождения (11). Используя треугольник Паскаля в качестве модели [Колмогоров и др., 1982], построим треугольную матрицу СС, отражающую “посещаемость” состояний СС. В этом треугольнике каждый матричный элемент указывает число возможных траекторий прихода в те-

Таблица 1. Треугольник Паскаля вероятностей состояний системы при $S = 1-12$. Пояснения приведены в тексте

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	n	\tilde{p}	\hat{E}
S															
1	1.00												1	1.00	—
2	0.50	0.50											2	0.50	—
3	0.33	0.33	0.33										3	0.33	—
4	0.20	0.40	0.20	0.20									5	0.25	2
5	0.14	0.28	0.28	0.14	0.14								7	0.20	2, 3
6	0.10	0.20	0.30	0.20	0.10	0.10							11	0.17	3
7	0.07	0.20	0.27	0.20	0.13	0.0	0.07						15	0.14	3
8	0.05	0.18	0.23	0.23	0.14	0.09	0.05	0.05					22	0.13	3, 4
9	0.03	0.14	0.21	0.21	0.17	0.10	0.07	0.03	0.03				29	0.11	4
10	0.02	0.12	0.20	0.21	0.17	0.12	0.07	0.04	0.02	0.02			42	0.10	4
11	0.02	0.09	0.18	0.20	0.18	0.13	0.09	0.05	0.04	0.02	0.02		56	0.09	4
12	0.01	0.08	0.17	0.20	0.17	0.13	0.09	0.07	0.04	0.03	0.01	0.01	77	0.08	4

пяти состояний $S = 13-17$; $\hat{E} = 6$ для шести состояний $S = 18-23$ и т.д. Мы можем написать рекуррентное соотношение

$$S_{\hat{E}} = S_{\hat{E}-1} + \hat{E}, \quad (14)$$

которое при $\hat{E} = 7$ дает $S_7 = 23 + 7 = 30$, и так далее. Рекуррентное соотношение (14) можно записать в виде:

$$S_{\hat{E}} = \sum_{n=1}^{\hat{E}} n + 2, \quad \hat{E} = 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

где появляется число 2, так как первые три состояния СС на рис. 3 не вырождены. Это означает, что дискретное число состояний СС $S_{\hat{E}}$ определяется через сумму натурального ряда значений кумулятивной энергии. Дискретный набор чисел, $S_{\hat{E}} = 3, 5, 8, 12, 17, 23, 30, 38, 47, 57, 68, \dots$ отличаются на 2 единицы от известных “магических” чисел треугольника Паскаля [Conway, Guy, 1996]. При больших значениях S приближенная зависимость между параметрами \hat{E} и S может быть интерполирована степенной зависимостью

$$E = \beta S^a, \quad (16)$$

где β и a константы, $0 < a < 1$. Найденное распределение вероятностей, как видно на рис. 6, близко к распределению Пуассона, $P(x, \lambda) = \frac{1}{x!} \lambda^x e^{-\lambda}$ [Rade, Westergren, 2004] с двумя параметрами (x, λ) . Здесь $x = 1, 2, 3, \dots$ является фактическое число появления события, λ является ожидаемым числом события в течение данного интервала. Заменяя $x = E$ и $\lambda = \hat{E}$, функцию Пуассона для СС запишется в виде:

$$p(E) = \frac{1}{E!} (\hat{E})^E e^{-\hat{E}}. \quad (17)$$

Используя эту формулу и рекуррентное соотношение (14), мы можем примерно рассчитать распределение вероятностей для любого конечного интервала $E \in [1, S]$.

Траектория состояния СС определяется движущейся точкой $q(t) = q(S, E_c)$ на трековой диаграмме (рис. 7). Каждый скачок на траектории соответствует землетрясению индикатору. В начале сейсмического цикла траектория развивается хаотично. Но с течением времени между параметрами S и E_c начинается взаимодействие, и траектория притягивается к наиболее вероятному состоянию кумулятивной энергии, к степенному закону (16) (рис. 7). В идеальной системе (изначально однородной), такое поведение траектории является внутренним свойством системы, управляемым посредством кумулятивных сейсмических параметров (2), (3), создающих первичную неоднородность. Зависимость (16) также может иметь место в более сложной реальной СС с существующими сейсмическими неоднородностями.

Неустойчивость в СС возникает, начиная с $E = 10^{-1.8} S$, при $S = 8.0-9.5 \times 10^3 h_s$, поэтому первые критические значения кумулятивной энергии будут равны $E = 125-137$. Эта энергия будет соответствовать неустойчивости — микроземлетрясения с магнитудой $M_s = -1.8$, т.е. микроземлетрясения индикаторы с $-3.2 \leq M < M_{th} = -1.8$ подготавливают относительно сильные микроземлетрясения с $M \geq -1.8$. На языке разрывов в очагах землетрясений это означает, что в самых маленьких СС (с характерными размерами в 10–30 м) происходят микроземлетрясения с разрывами от 22 до 150 см, которые приводят к образованию макроразрывов

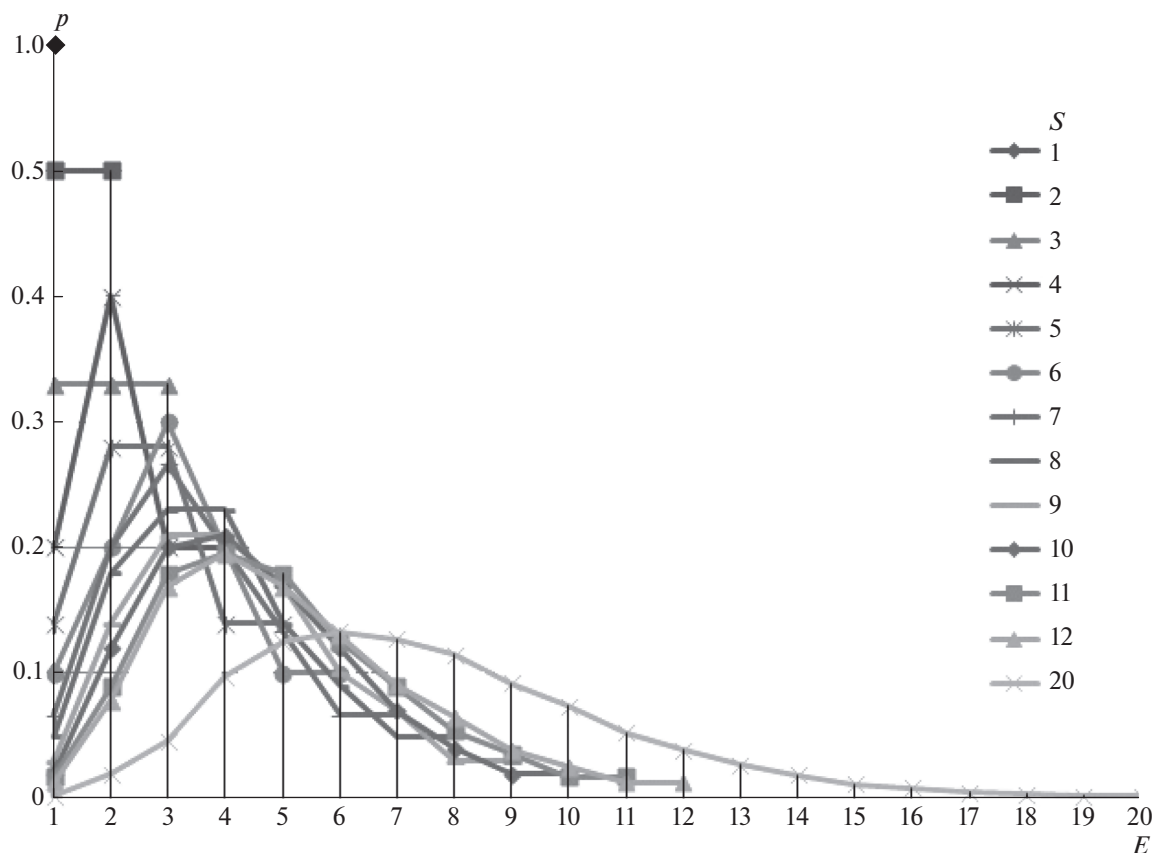


Рис. 6. Графики распределения вероятности кумулятивной энергии для состояний системы, при $S = 1-12, 20$.

от 2 до 4 м. Видимо, первичные неоднородности на заре эволюции возникали в крошечных СС, затем, со временем, разрастались. Важно отметить, что период инструментальных наблюдений для реальных СС очень мал по сравнению со временем эволюции продолжительностью в сотни тысяч и миллионов лет. В течение такой продолжительной эволюции СС наследовали основные первичные и накапливали вновь приобретенные неоднородности [Hillers et al., 2007].

Константы a и β степенного закона (16) описывают динамику неравновесных процессов в циклах, приводящих к возникновению значимых для рассматриваемого объема сейсмических неоднородностей. В СС присутствуют шумы, связанные с мелкими неоднородностями (трещинами). Данные каталогов землетрясений также имеют некоторые энергетические ограничения снизу, связанные с чувствительностью сейсмических приборов. Поэтому при рассмотрении реальных систем, необходимо укрупнить единичный параметр (8) и h_s выбирать в соответствии с самой слабой энергией микроземлетрясений, представленных в каталоге. Например, если представительность землетрясений в каталоге начинается с магнитуды $M = 3.0$ (в соответствии с

(1) это соответствует $E = 10^{9.3}$ Дж), то параметр действия может быть выбран, намного больше (8), то есть $\tilde{h}_s = 10^{9.3} h_s$. Таким образом, понятие минимальной структурной неоднородности для СС укрупняется, как только мы заново переопределяем \tilde{h}_s путем укрупнения параметра h_s . Мы видим, что, по аналогии с квантовой механикой, сейсмические источники излучают энергию, упакованную маленькими порциями, “квантами”. Для иерархии СС разных объемов (включающих разломы разных масштабов) размер максимальных квантов излучения не одинаков. Они крошечны для маленьких, маленькие для малых разломов, средние для больших разломов и большие для мегаразломов.

Наша цель — выявить такие конфигурации СС, сильные землетрясения и землетрясения индикаторы, в которых удовлетворяли (16) во всех сейсмических циклах. Константы a и β в степенном законе (16) отражают динамические характеристики геологических структур, ответственных за сильные землетрясения. На практике они определяются на основе статистики за определенный период сейсмических наблюдений и поэтому отражают динамику за этот ограниченный

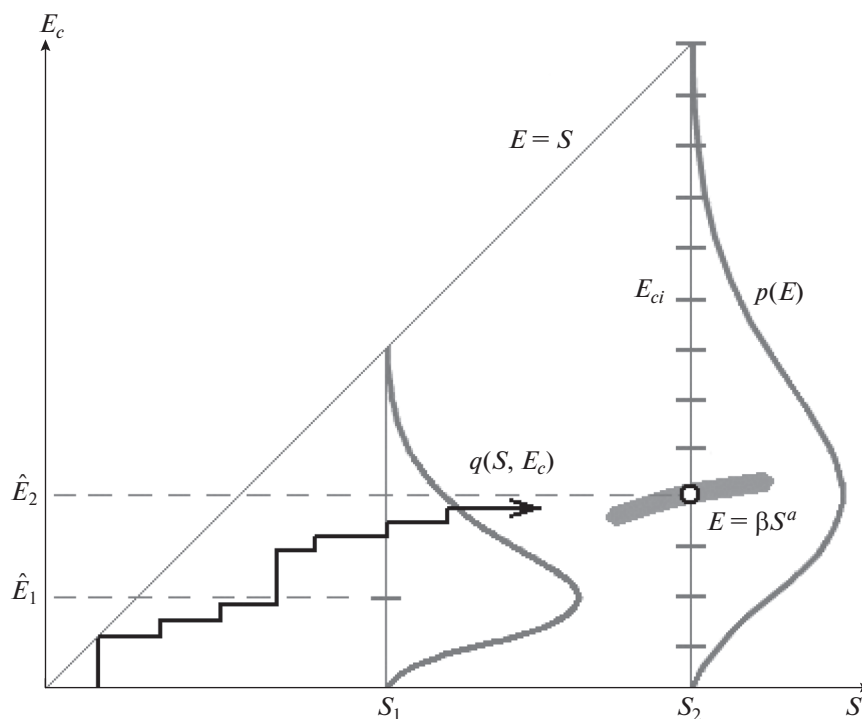


Рис. 7. Схематическое изображение развития траектории на трековой диаграмме: \hat{E}_1 и \hat{E}_2 — наиболее вероятные значения кумулятивной энергии в состояниях S_1 и S_2 , соответственно; E_{ci} — это число различных дискретных значений (уровней) кумулятивной энергии при S_2 ; $p(E)$ — функция распределения вероятности в интервале $E \in [1, S_2]$. Жирная дуга показывает область неустойчивости $E = \beta S^a$, которая притягивает траекторию $q(S, E_c)$.

промежуток времени. Они также зависят от числа завершившихся сейсмических циклов за время наблюдений.

Возникает вопрос, какова физика вероятности и почему система в наиболее вероятных состояниях должна терять устойчивость? Для этого необходимо понять, как определяется вероятность. В привычных для нас событиях (подбрасывание монеты или игра в рулетку), обычная математическая вероятность является отражением неполноты нашего знания. Однако эти вероятности не отражают никаких фундаментальных физических свойств. Напротив, вероятность, введенная на основе естественных сейсмических событий, имеет более глубокий смысл, она отражает реальные физические процессы возникновения неустойчивости. При наличии необходимой информации о напряжениях и деформациях в земле, о внутреннем строении среды, можно было бы точно решить задачу зарождения неустойчивости с привлечением мощных компьютеров, и предсказать когда произойдет землетрясение. Однако такой информации нет. Как было отмечено в разделе “Постановка задачи”, мы существенно упрощаем задачу и описываем состояние системы посредством хорошо регистрируемых в сейсмологии параметров. В результате, упрощенный подход приводит к по-

тере информации, к неопределенностям и вероятностному описанию состояния среды. Принципиальным является то, что критическое поведение СС определяется не отдельными землетрясениями индикаторами, а приурочено к наиболее вероятным состояниям их суммарной энергии. Итак, ответ на поставленный вопрос следующий — вероятность появляется из-за упрощений и рассмотрения коллективных свойств землетрясений системы, а обязательная потеря устойчивости за конечный интервал времени происходит и из-за наличия верхнего предела прочности горных пород. В действительности закон (16) выявлен автором экспериментально и проверен путем многократного повторения “экспериментов” в СС, расположенных в разных регионах мира. Здесь дано лишь теоретическое обоснование. Как ни парадоксально, но вероятностный подход из-за неполноты наших знаний может привести к точным математическим законам (16). Однако вероятность несколько расширяет возможности точного исхода и позволяет предсказать появление необычных событий, которые сильно отличаются от наших ожиданий. Отметим, что по аналогичному принципу устроена и квантовая механика [Ландау, Лифшиц, 2004], наличие у материи волновых свойств подразумевает, что фундаментальное описание ма-

терии должно иметь вероятностный характер. В отличие от квантовой механики, которая описывает частицы на микроскопическом уровне, наша теория применима к макроскопическим объектам. В следующем разделе покажем, что, когда закономерность (16) выполняется для совокупности сильных землетрясений с одними и теми же константами α и β , то внутри выделенного объема СС сильные землетрясения объединяются в ансамбль с независимыми сейсмическими циклами.

АНСАМБЛЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Методы механики разрушения горных пород были адаптированы для описания разломообразования в очаге сильных землетрясений [Anderson, Whitcomb, 1973; Mjachkin et al., 1975; Соболев, Пономарев, 2003]. Эти модели очагов землетрясений были разработаны на основе сравнения данных лабораторных исследований с наблюдаемыми предвестниками землетрясений. Такой подход к проблеме подготовки и прогноза землетрясений на языке нашего подхода описывает только локальную (очаговую) область среды СС. Однако параметры среды за пределами очаговой области сильного землетрясения также могут влиять на процесс подготовки и излучения сейсмической энергии [Костров, 1974; Rice, 1980]. В отличие от традиционных подходов мы рассматриваем большие объемы геологической среды, ответственные за подготовку ансамблей сильных землетрясений. Определение СС для сейсмически активной области литосферы также концептуально отличается от произвольного выбранного пространства — временного домена, используемого для идентификации предвестников перед возникновением конкретной сейсмической неустойчивости (главного толчка) в заранее выбранном месте и заданной магнитуды [Dobrovolsky et al., 1979]. В отличие от такого подхода, в нашем случае расположение и величина прогнозируемого сильного землетрясения внутри СС не известны заранее. Кроме того, множество землетрясений индикаторов содержат информацию как о состоянии СС в каждом моменте времени, так и историю подготовки сильных землетрясений в регионе. Таким образом, модель подготовки землетрясения, основанная на выборе локального очага, ведет к потере информации о взаимодействии различных разломных структур, коллективно участвующих в едином сеймотектоническом процессе. Именно специфический объем геологической среды с определенной геометрией (конфигурацией на поверхности и глубиной, рис. 1), будучи сложным тектоническим образованием, реагирует на внешнее воздействие, периодически отклоняясь от состояния равновесия и восстанавливая новое состояние равновесия. В такой открытой системе полная выделившаяся энергия землетрясений индикаторов недостаточна

для восстановления равновесия, пока не произойдет сильное землетрясение.

Трековая диаграмма это изображение ступенчатых траекторий развития состояний СС во времени на плоскости $\{K, W\}$, определяемых по формулам (5). Аттрактор представляет собой ограниченную область на трековой диаграмме, включающую множество критических точек $\{K_j, W_j\}$, к которым притягиваются траектории сильных землетрясений СС. На рис. 8 показан аттрактор на диаграмме траекторий в виде удлинненного эллиптического “облака”. Такое облако образуется для хорошо определенной СС в результате кооперации сильных землетрясений, которые объединяются в ансамбль. Разброс точек $\{W_j, K_j\}$ ансамбля занимают ограниченные интервалы по осям, $W_{\min} \leq W_j \leq W_{\max}$ и $K_{\min} \leq K_j \leq K_{\max}$. Мы предполагаем, что в начале каждого сейсмического цикла, при отсутствии чувствительной сейсмической активности ($E \leq E_h$), СС находится в равновесии недалеко от начала координат (рис. 8). Каждая траектория начинается с области равновесия вблизи начала координат (треугольная заштрихованная область). На протяжении сейсмического цикла траектория приближается к аттрактору и завершается сильным землетрясением в некоторой критической точке внутри аттрактора. После сильного землетрясения и последующих афтершоков, система возвращается к началу координат (пунктирная стрелка на рис. 8), устанавливая новое равновесное состояние. Эволюция системы состоит из многократного повторения сейсмических циклов.

Рассмотрим N сейсмических циклов (N число сильных землетрясений с $M \geq M_{th}$), разделенных временами t_1, t_2, \dots, t_N . Каждый завершившийся цикл характеризуется числом состояний сейсмической системы S_1, S_2, \dots, S_N и параметром кумулятивной энергии E_1, E_2, \dots, E_N . Вместо рассмотрения сейсмических циклов как состояний системы в разные моменты времени t_j , мы можем формально рассмотреть N подсистем, которые находятся в N различных макроскопических состояниях S_j . Если все сейсмические циклы независимы, то полная энтропия СС, состоящей из формальных подсистем в состояниях S_j , будет равна сумме отдельных энтропий W_j подсистем:

$$W(S) = \sum_{j=1}^N W(S_j), \quad \text{где } S = \prod_{j=1}^N S_j \quad (19)$$

при условии $S_j < S_{\max}$; то есть энтропия СС является аддитивной величиной от энтропии подсистем. На макроскопическом уровне эти функции удовлетворяют дифференциальному уравнению [Николис, 1989; Акопян, 1995]:

$$S \frac{d^2 W}{dS^2} + \frac{dW}{dS} = 0. \quad (20)$$

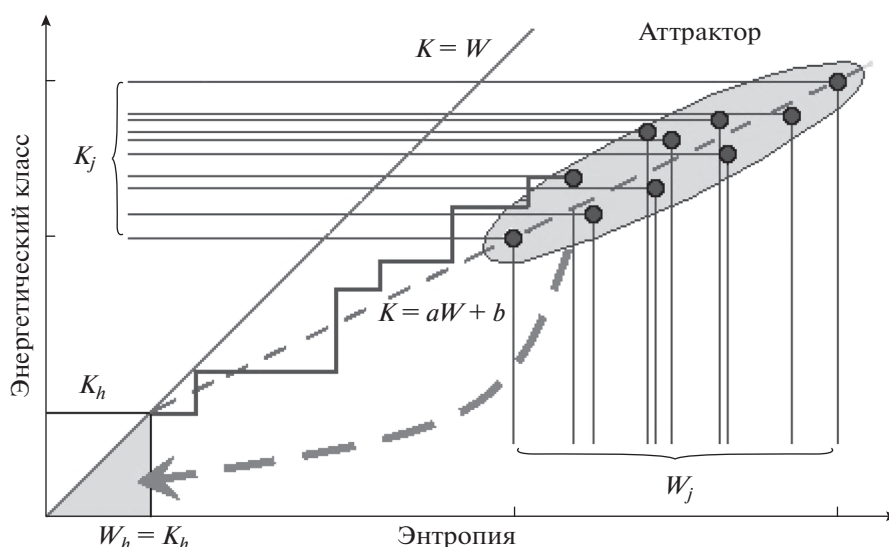


Рис. 8. Аттрактор для ансамбля сильных землетрясений – эллиптическое “облако”, растянутое вдоль прямой линии. Диагональ $K = W$ соответствует равновесному состоянию. K_h – пороговый энергетический класс. Ступенчатая линия – траектория, которая начинается от области равновесия вблизи начала координат (треугольная затемненная область) и с течением времени попадает в критическую точку аттрактора. После завершения каждого сейсмического цикла система возвращается в начало, чтобы начать новый цикл (пунктирная стрелка).

Общее решение дифференциального уравнения второго порядка (20) имеет вид:

$$W = c_1 \lg S + c_2, \quad (21)$$

где c_1 и c_2 произвольные постоянные. При возрастании времени (при больших значениях S), траектории сейсмических циклов стремятся к состоянию, управляемому степенным законом (16). После логарифмирования (16), с учетом формул (5), между энтропией W и кумулятивным энергетическим классом $K = \lg E$ может быть установлено простое соотношение:

$$K = aW + b, \quad \text{при } W \geq W_{\min}, \quad \text{где } b = \lg \beta. \quad (22)$$

Если параметры K_j и W_j удовлетворяют уравнению (22) во всех сейсмических циклах для одних и тех же констант a и b , то считаем, что СС определена. В таком случае мы говорим, что все сильные землетрясения СС объединяются в ансамбль с постоянными параметрами a , b , поскольку они происходят вблизи линии (22). Итак, критические точки $\{K_j, W_j\}$ сильных землетрясений ансамбля, для формальных подсистем j в ограниченном диапазоне $W_{\min} \leq W_j \leq W_{\max}$ группируются вблизи прямой (22). Из формулы (21) для энтропии \tilde{W} формальной СС определим константы c_1 и c_2 для частного решения \tilde{K} , удовлетворяющего уравнениям (20) и (22):

$$c_1 = a, \quad c_2 = b, \quad \tilde{W} = \tilde{K} = a \sum_{j=1}^N W(S_j) + b. \quad (23)$$

Условие (23) означает, что сейсмические циклы сильных землетрясений являются независимыми только тогда, когда они объединяются в ансамбли. После каждого сильного землетрясения ансамбля система (с некоторой степенью точности) приходит в равновесие и восстанавливает сейсмически однородное состояние. Этот результат показывает, что соотношение (16), полученное между информационной энтропией и кумулятивной энергией для динамических процессов СС, далеких от равновесия, имеет фундаментальное значение. Оно описывает крупномасштабные неоднородности в геологических средах, в которых образуются сильные землетрясения ансамбля, периодически приводящие СС в равновесное состояние. Ниже приведем примеры ансамблей сильных землетрясений для реальных систем.

АТТРАКТОРЫ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Зависимость (22) и ансамбли сильных землетрясений эмпирически были выявлены для СС Сахалин, Армянское Нагорье, Италия, Иран и Центральная Калифорния [Акопян, 1998; Akopian, 2013]. На практике, чтобы найти уравнение (22), необходимо решить обратную задачу регрессии. Для этого на основе выборки данных из каталогов землетрясений рассчитываются параметры W_j и K_j для N завершившихся сейсмических циклов ($N \geq 2$), то есть $\{W_j, K_j\}$, $j = 1, 2, \dots, N$. Метод расчета линии регрессии приведен в [Akopian, Kocharian, 2013]. За двадцать лет были изучены более 100 представительных ансамблей сильных землетря-

Таблица 2. Расчетные параметры аттрактора 18 сейсмических систем, расположенных в порядке убывания пороговой магнитуды M_{th} . T – время описания сейсмических процессов (в годах), заканчивающихся 2014 г.; L_m – максимальная протяженность системы (в км); N – количество закончившихся сейсмических циклов; a, b параметры линии регрессии (22); M_h минимальная магнитуда значимых землетрясений индикаторов; M_{max} – максимальная магнитуда сильных землетрясений ансамбля; ε параметр ошибки корреляции и r коэффициент корреляции

СС	M_{th}	T	L_m	N	a	b	M_h	M_{max}	$\varepsilon, \%$	r
Мега Япония (МЯ)	8.4	118	1700	3	0.317	11.121	7.5	9.1	0.8	1.00
Мега Чили (МЧ)	8.3	108	3000	5	0.485	7.802	6.5	9.1	2.2	0.99
Тибет (Ти)	7.8	181	2750	6	0.465	8.172	6.6	8.6	1.7	0.98
Камчатка (Ка)	7.8	114	1050	6	0.460	8.071	6.3	8.5	1.2	0.91
Хоккайдо (Хо)	7.8	114	790	10	0.470	8.113	6.6	8.4	1.6	0.91
Япония (Я)	7.8	108	1700	14	0.644	4.952	5.5	8.4	1.5	0.94
Тайвань (Та)	7.7	113	500	6	0.489	7.450	5.9	8.1	0.9	0.91
В Турция (ВТ)	7.2	184	1000	6	0.455	7.496	5.4	7.9	0.8	0.97
Ц Курилы (Ку)	7.1	98	330	5	0.436	8.160	5.8	7.8	1.9	0.98
Арм. Нагорье (АН)	6.6	184	1000	16	0.565	5.540	4.9	7.5	2.7	0.82
Италия (Ит)	6.2	160	1280	19	0.500	6.680	5.2	7.3	2.1	0.93
Большой ЛА (БЛА)	6.2	202	260	6	0.635	4.185	4.1	6.7	0.9	0.92
СВ Иран (Ир)	6.2	110	930	7	0.498	6.528	5.0	7.3	2.1	0.97
Сахалин (Сах)	6.2	108	990	5	0.580	4.937	4.3	7.5	2.6	0.99
Ц Калифорния (ЦК)	6.0	149	350	19	0.486	6.598	4.9	7.0	2.2	0.88
З Кавказ (ЗК)	6.0	109	600	6	0.612	4.144	3.7	6.8	2.6	0.99
Лос Анжелес (ЛА)	5.8	112	260	10	0.562	5.002	4.1	6.6	1.0	0.91
Паркфилд (П)	5.5	134	60	5	0.595	4.189	3.5	6.2	0.8	0.98

сений в разных сейсмоактивных регионах мира, с пороговыми магнитудами $5.5 \leq M_{th} \leq 8.4$. Параметры a, b в уравнении (22) для этих ансамблей землетрясений находятся в диапазонах: $0.35 < a < 0.82$, $3.0 < b < 11.5$. Как правило, параметр b возрастает с укрупнением СС (увеличением пороговой магнитуды и размеров). Рассчитанные значения a, b и другие сейсмические параметры для 18 СС с различными пороговыми магнитудами M_{th} приведены в табл. 2 (системы приведены в порядке убывания пороговой магнитуды M_{th}). Пороговые магнитуды M_{th} и M_{max} показывают нижние и верхние пределы для магнитуд сильных землетрясений ансамбля ($M_{th} \leq M < M_{max}$). СС и аттракторы, приведенные в табл. 2, могут служить основой и для организации наземно-космической системы мониторинга на больших территориях, с использованием различных предвестников землетрясений [Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003], в том числе регистрируемых из космоса [Бондур, Зверев, 2005; Бондур, Смирнов, 2005].

При построении аттракторов был использован иерархический подход, при котором система делится на подсистемы с понижением пороговой магнитуды. При таком подходе землетрясения индикаторы с высокой магнитудой большей системы могут перейти в разряд сильных землетрясений в подси-

стемах. Так, СС Япония является подсистемой СС Мега Япония, СС Армянское нагорье является подсистемой СС Восточная Турция, а СС Паркфилд является подсистемой СС Центральная Калифорния. Размеры первых двух подсистем совпадают с размерами соответствующих систем, в то время как размер подсистемы Паркфилд намного меньше, чем размер СС Центральная Калифорния. Подробно СС Мега Япония, Япония, Армянское Нагорье и Восточная Турция, а также результаты мониторинга разрушительных землетрясений Тохoku (11 марта 2011) и Ван (23 октября 2011) даны в работах [Акопян, 2013; Акопян, Рогожин, 2013; Akopian, 2014]. Отметим, что при переходе от мегасистем к подсистемам, катастрофические землетрясения, сохраняющиеся в подсистеме, выпадают из ансамбля сильных землетрясений подсистемы. В подсистеме они могут вовсе не иметь подготовки или математическая область неустойчивости на трековой диаграмме для них выходит за рамки эллипсообразной зоны неустойчивости. Как правило, они образуют локальную область неустойчивости над аттрактором. Это свойство подсистем позволяет выявлять сильные форшоки и триггеры перед катастрофическими землетрясениями. Такое триггерное землетрясение произошло в Японии 9 марта 2011

с $M = 7.5$, в подсистеме Север Хонсю за два дня перед катастрофическим землетрясением Тохоку.

На границе двух СС может произойти сильное землетрясение, за подготовку которой ответственны обе системы. Как правило, выделившаяся энергия такого граничного землетрясения (или магнитуда) бывает завышенной по сравнению с ансамблем сильных землетрясений в контактирующих системах. Такие землетрясения включаются в ансамбль сильных землетрясений для обеих СС. К таким землетрясениям причисляется Хоккайдское землетрясение Токачи Оки, 26 сентября 2003, $M = 8.3$, в подготовке которого принимали участие СС Япония и СС Южные Курилы — Хоккайдо. Все сильные землетрясения ансамбля имеют подготовку. Вблизи границ СС могут близко располагаться эпицентры двух сильных землетрясений происшедших 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 катастрофическое землетрясение Суматра-Андаман от 26 сентября 2004, $M = 9.0$ и сильное землетрясение на севере Суматры от 28 марта 2005, $M = 8.5$. Несмотря на то, что эпицентры этих землетрясений находились на расстоянии 200 км, они располагались в разных системах (первое в СС Андаман-Никобар, второе в СС Северная Суматра).

Иногда наблюдаются случаи группировки землетрясений вблизи порогового значения магнитуд M_{th} . Те землетрясения из этой группы, которые имеют магнитуду, меньше чем пороговое значение, причисляются к землетрясениям индикаторам, и данная система не отвечает за их подготовку. Такая проблема возникла при изучении последовательности Паркфилдских землетрясений с $M = 5.6–6.2$ на сегменте разлома Сан Андреас. Эта группа землетрясений входила как в СС Центральная Калифорния, так и в подсистему Паркфилд, которые имеют разные пороговые магнитуды 6.0 и 5.5. В результате селективной реакции этих систем Паркфилдские землетрясения по магнитуде разделились на две группы. За подготовку землетрясений с $M \geq 6.0$ из этой группы (1857, 1922 и 1934 гг.) была ответственна СС Центральная Калифорния, а за подготовку землетрясений с $5.5 \leq M < 6.0$ (1981, 1901, 1966 и 2004 гг.) СС Паркфилд. Незнание этих закономерностей и привело к провалу в 1985–1993 гг. Паркфилдского эксперимента по прогнозу землетрясений, которая была ошибочно основана на среднем периоде повторяемости (~22 года) всех землетрясений Паркфилдского сегмента [Parkfield, 1988; Roeloffs, 2000]. Это означает, что выборка землетрясений по пространству и магнитудам для расчета повторяемости в задачах сейсмической опасно-

сти, сейсмического риска и прогнозирования землетрясений должна производиться на основе некоторого правила, которое задает СС. В традиционных подходах при выявлении повторяемости и построения карт сейсмической опасности отсутствуют строгие математические критерии количественного выбора пороговых магнитуд, границ разломных зон и областей проявления сейсмичности на поверхности Земли, по-разному ответственных за подготовку землетрясений. Отсутствие такого системного подхода приводило к многочисленным ошибкам карт сейсмической опасности и к неожиданным сильным землетрясениям. Перечислим некоторые из сильных землетрясений, которые вопреки картам сейсмической опасности, привели к большим человеческим жертвам. К таким землетрясениям относятся: Тангшан (Китай) 1976.07.28, $M = 7.8$; Спитак (Армения) 1988.12.07, $M = 6.9$; Паркфилд (США) 2004.09.28, $M = 5.9$; Йоджкарта, Ява (Индонезия) 2006.05.26, $M = 6.3$; Сычуань (Китай) 2008.05.12, $M = 7.3$; Ява (Индонезия) 2009.09.02, $M = 7.0$; Гаити 2010.01.12, $M = 7.2$; Пакистан 2011.01.18, $M = 7.2$, Тохоку 2011.03.11, $M = 9.0$; Ван 2011.10.23, $M = 7.3$. Выявленные СС, ответственные за подготовку этих землетрясений, и мониторинг, проведенный автором с 2000 года, показывает, что их можно было с некоторой точностью предсказать (до 2000 года — ретроспективно).

Если сильные землетрясения ансамбля полностью заполняют основные неоднородности внутри СС, то можно считать, что аттрактор такой системы хорошо определен и большой сейсмический цикл завершен. В плохо определенных системах локальные разломные зоны, в ограниченном временном интервале (от 1 до 6 месяцев), могут находиться в неустойчивом состоянии. Если за это время сильное землетрясение не произойдет, то система вновь переходит в устойчивое состояние. В сумме эти нереализованные временна составляют не более 2–3% от продолжительности сейсмических циклов. С течением времени зоны неустойчивости сильных землетрясений, как правило, стремятся заполнить основные неоднородности внутри СС. Это свойство ансамбля сильных землетрясений проявилось, например, при изучении сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона в виде концепции “сейсмической брешы” [Федотов, 1965; 2005]. Подход на основе СС позволяет обосновать и математически точно найти границы области, магнитудные интервалы сильных землетрясений для выявления “сейсмической брешы” и распространить ее на другие сейсмоактивные регионы мира. Однако реальная неустойчивость и подготовка сильного землетрясения не всегда возникают в области “сейсмической брешы”, а зависят от локальной структуры аттрактора и поведения приближающейся к ней траектории.

Ансамбли с большим числом сейсмических циклов позволяют более точно описывать распределение точек неустойчивости внутри сейсмического аттрактора, а их траектории позволяют выявлять устойчивые области между точками. Аттракторы не статические образования, они отражают динамику сейсмотектонических структур систем и после каждого сильного землетрясения уточняются. Изучение детальной структуры аттрактора позволяет следить за перемещением области неустойчивости внутри системы от одной разломной зоны к другой, в соответствии с которой меняются и результаты прогноза [Акопян, 2013]. Если внутри СС указывается зона ожидания сильного землетрясения, то автоматически в других местах внутри системы сильное землетрясение исключается, т.е. контролируется весь объем системы. В зависимости от того, как траектория приближается к аттрактору, можно предсказать механизм и различные проявления сейсмичности, наблюдаемые перед сильными землетрясениями, например, сейсмические рои, затишья, триггеры, форшоки и афтершоки [Акопян, 1998; Akopian, Porov, 2010].

Расчетные значения ошибок корреляции ϵ и коэффициента корреляции r для систем табл. 2 варьируются в диапазоне от $0.8\% \leq \epsilon \leq 2.7\%$ процента и $0.82 \leq r \leq 1$. Коэффициент корреляции является мерой фрагментации и разветвленности разломных структур СС, которые генерируют сильные землетрясения. Для хорошо определенных СС Армянское нагорье, Центральная Калифорния, Италия и Япония, с большим количеством завершившихся сейсмических циклов коэффициенты корреляции низкие: 0.82, 0.88, 0.93 и 0.94. Низкий коэффициент корреляции для Армянского нагорья означает, что фрагментация здесь высокая, в то время как для Японии она меньше. Особое внимание в методе сейсмической энтропии уделяется необычным землетрясениям. К таким относятся двойные землетрясения и землетрясения с нормальным механизмом, которые плохо прогнозируются, или вовсе не имеют подготовки в системе. Они происходят редко, поэтому статистики пока мало. Ниже, на примере необычной сейсмической активизации в центральных Курилах в 2006–2009 гг., покажем, как в таких случаях работает метод сейсмической энтропии и как можно трансформировать аттрактор.

ДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ АТТРАКТОРА СС ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ

В 2006 (30 сентября, $M = 7.2$ и 15 ноября, $M = 8.3$), 2007 (13 января, $M = 8.1$) и в 2009 г. (15 января, $M = 7.5$) в Центральных Курилах (ЦК) произошла серия необычайно сильных для этого региона землетрясений. На основе метода сейсмической энтропии попытаемся описать подготовку

этих событий. До этих событий в ЦК была выявлена СС, ответственная за подготовку ансамбля из пяти сильных землетрясений с $7.1 \leq M < 7.8$ (табл. 2). Катастрофические землетрясения 2006 и 2007 гг. с магнитудами $M \geq 7.8$ выпадали из ансамбля и не имели подготовку в этой системе. Природа такой парной сейсмичности трудно интерпретируема из-за отсутствия исторических аналогов. Однако накопленный опыт позволяет описать их подготовку на основе СС. На рис. 9а показаны механизмы очагов и плоскости подвижек двух сильнейших землетрясений по данным http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/poster/2007/2007_KurilComparison.php. Первое имеет механизм взброса, а второе – сброса. Очаги этих двух землетрясений хорошо изучены [Lay et al., 2009; Raeesi, Atakan, 2009; Злобин, Полец, 2009], поэтому мы не будем останавливаться на их подробном описании.

На рис. 9б показаны границы СС ЦК с $M \geq 7.1$, которая на северо-востоке граничит с СС Камчатка – С Курилы, а на юго-западе с СС Ю Курилы – Хоккайдо. Там же показаны землетрясения индикаторы и очаговые зоны трех мегаземлетрясений с $M \geq 7.8$. На рис. 9в показана система и плоскости подвижек в разрезе. Механизм одновременной деформации погружающихся и надвигающихся плит перед землетрясениями, схематически показанный на рис. 9г, объясняет взаимозависимость и последовательность срабатывания очагов двух сильнейших землетрясений. Распределение землетрясений индикаторов и конфигураций очаговых зон позволяет разделить СС ЦК по плоскости FF' (пунктирная линия на рис. 9б, 9в) на две части: фронтальную и тыловую (погружающуюся). Это позволило разъединить подготовку и афтершоковые области мегаземлетрясений 2006 и 2007 гг. Все расчеты были проведены на основе каталога землетрясений с $M_s \geq 5.0$, начиная с 1916 г. (после сильного землетрясения от 31 октября 1916, $M = 7.8$, рис. 9б). Подготовку землетрясения 1916 г. невозможно было восстановить из-за отсутствия представительного каталога до этого события. Во фронтальной части желоба, внутри Тихоокеанской плиты, с 1916 года происходили два сильных землетрясения с близкими механизмами очагов (на глубине 45 км): первое – 16 марта 1963, $M = 7.4$; второе – 15 января 2009, $M = 7.5$ (рис. 10а). Разделение по линии FF' позволило вывести эти (плохо прогнозируемые) землетрясения из системы и улучшить качество прогноза. Аттрактор А-I тыловой СС ЦК с пороговой магнитудой 7.1 приведен на Рис. 10б. Он включает точки неустойчивости пяти сильных землетрясений 1925, 1951, 1954, 1964 и землетрясения от 30.09.2006. Они, как клавиши, заполняют тыловые зоны В, С, Д, Е системы (рис. 10а, 10в). Та же конфигурация тыловой СС (рис. 9б) с более высокой пороговой магнитудой 7.8 ответственна за подготовку мегазем-

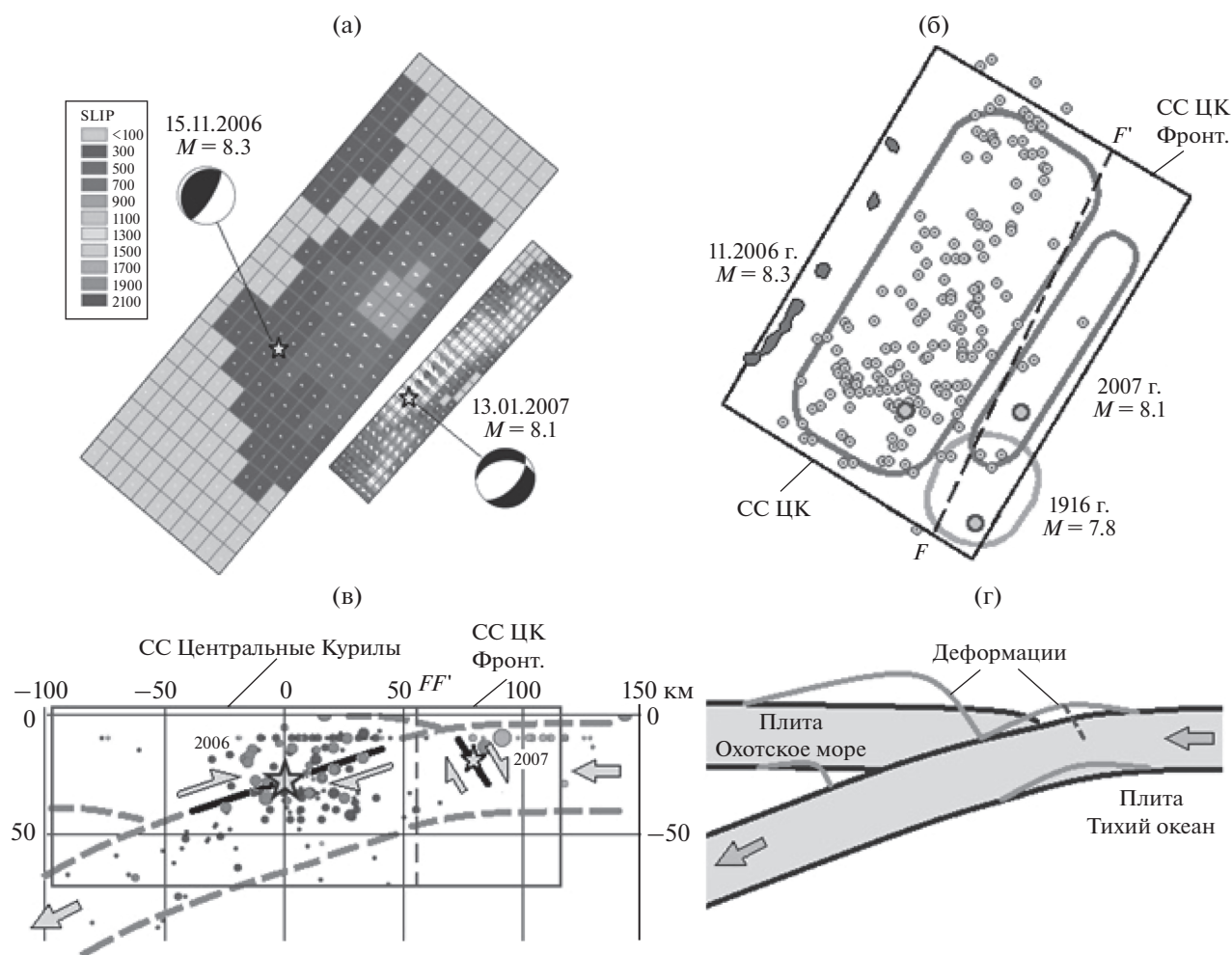


Рис. 9. Курильские землетрясения 15 ноября 2006 и 13 января 2007: (а) — механизмы очагов; (б) — граница СС ЦК, землетрясения индикаторы и очаговые зоны; (в) — плоскости подвижек в разрезе; (г) — механизм деформаций до землетрясений. По плоскости FF' СС ЦК разделяется на две части: фронтальную и тыловую (погружающуюся).

летрясения от 15 ноября 2006, $M = 8.3$. На рис. 10б показана траектория подготовки этого мегаземлетрясения и аттрактор А-III, состоящий из одной точки. Область землетрясений индикаторов тыловой СС совпадает с афтершоковой областью мегаземлетрясения. Это подтверждает, что мега-система определена правильно. В подготовке землетрясения от 15 ноября 2006 принимали участие все сильные землетрясения тыловой СС ЦК с $M \geq 7.1$. Скачок перед точкой неустойчивости на рис. 10б показывает, что землетрясение 2006.09, $M = 7.2$ сыграло роль триггера для мегаземлетрясения 2006.11, $M = 8.3$. Если бы аттрактор А-III был бы заранее известен, то мегаземлетрясение можно было бы предсказать за 45 дней. Аналогичная ситуация наблюдалась и в СС Япония, за два дня до мегаземлетрясения Тохоку от 11 марта 2011 [Акопян, 2013].

Итак, землетрясения 1963, 2007 и 2009 гг. оказались во фронтальной зоне, восточнее линии FF'

(рис. 10а). Рассмотрим, как можно описать их подготовку. Особенности механизма очагов и деформаций (рис. 9в, 9г) указывают, что между сильными землетрясениями фронтальной и тыловой зоны должна быть причинно-следственная связь [Lay et al., 2009; Raeesi, Atakan, 2009]. Наличие такой связи подтверждается перекрестными расчетами в гибридной системе, т.е. в системе, где землетрясения индикаторы берутся из тыловой СС ЦК, а сильные землетрясения из фронтальной зоны. Действительно, на рис. 10б видно прекрасное согласие точек неустойчивости мегаземлетрясений 2006, $M = 8.3$ и 2007, $M = 8.1$ (А-III) и точки неустойчивости землетрясений 1963, $M = 7.5$ и 2009, $M = 7.4$ (А-II). Т.о., землетрясения фронтальной зоны можно прогнозировать в гибридных системах с пороговыми магнитудами 7.4 и 7.8. Некоторый аналог гибридной системы мы имели на Кавказе. Там также землетрясения индикаторы Кавказского сектора пространственно

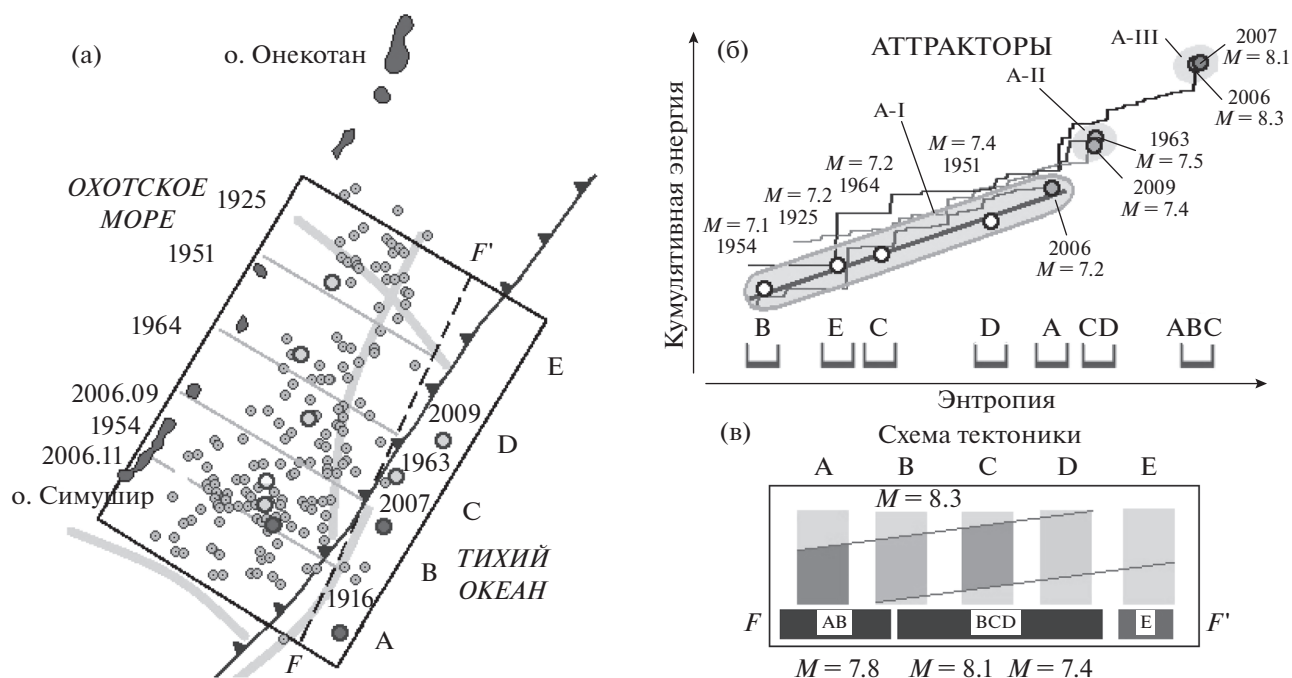


Рис. 10. Иерархия систем в ЦК: (а) — эпицентры сильных землетрясений с $M > 7.0$ и зоны А–Е; (б) — совмещенные фрагменты трековых диаграмм и аттракторы трех СС: А–I с $M \geq 7.1$, А–II с $M \geq 7.4$ и А–III с $M \geq 7.8$; (в) — схема проявления очаговых зон в тыловой и фронтальной зоне внутри СС. А–Е — зоны проявления сильных землетрясений на карте и соответствующие области неустойчивости в аттракторах.

не совпадали с сильными землетрясениями Армянского нагорья [Акопян, Рогожин, 2013].

Двойные землетрясения с близкими магнитудами наблюдались и в других СС. Как правило, при двойных событиях, как и в случае с Курилами, наблюдаются следующие закономерности: второе землетрясение происходит чуть с меньшей магнитудой, чем первое; разница во времени ~2 месяца; механизмы очагов существенно отличаются друг от друга.

Итак, метод сейсмической энтропии позволил выявить локальные зоны на трековой диаграмме, которые объясняют необычную активизацию землетрясений в ЦК и доказывают причинную связь между сильными землетрясениями тыловой и фронтальной зон. Средний период подготовки землетрясений в ЦК за столетний период наблюдений: с магнитудами $M = 7.1-7.4$ в тыловой системе ~18 лет; с магнитудами $M = 7.4-7.5$ во фронтальной зоне ~47 лет; катастрофических землетрясений с $M \geq 7.8$ в тыловой и фронтальной зонах — по 90 лет. Для сравнения, средний период повторяемости сильных землетрясений с $M \geq 7.8$ в СС Камчатка — С Курилы 19 лет, а СС Ю Курилы — Хоккайдо 11 лет. Это указывает, что тыловая СС ЦК на низком энергетическом уровне, “клавишной тектоникой”, координирует динамику взаимодействия соседних систем при субдукционных процессах. А тыловая и фронтальная системы в ЦК, взаимодействуя на вы-

соком энергетическом уровне, выравнивают накопленные боковые горизонтальные напряжения сжатия, образованные по простирацию желоба в Курило-Камчатской дуге на больших временных интервалах.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА ГУТЕНБЕРГА–РИХТЕРА

Подход на основе СС позволяет количественно определить рамки применимости закона ГР. В начале сейсмического цикла землетрясения индикаторы происходят случайным образом, но со временем они начинают конкурировать и кооперировать друг с другом. Мы можем определить минимальный значимый энергетический уровень (магнитуду) землетрясений индикаторов, с которого начинается новая траектория. Верхний энергетический уровень начального однородного равновесного состояния может быть определен путем экстраполяции (22) до пересечения с диагональной линией равновесия ($K = W$) (рис. 8):

$$K_h = b/(1-a). \quad (24)$$

Мы предполагаем, что ниже этого значения траектории близки к состоянию равновесия [Акопян, 2015]. Отклонение траекторий от равновесного состояния для ансамбля землетрясений в СС становится существенным, когда энергия земле-

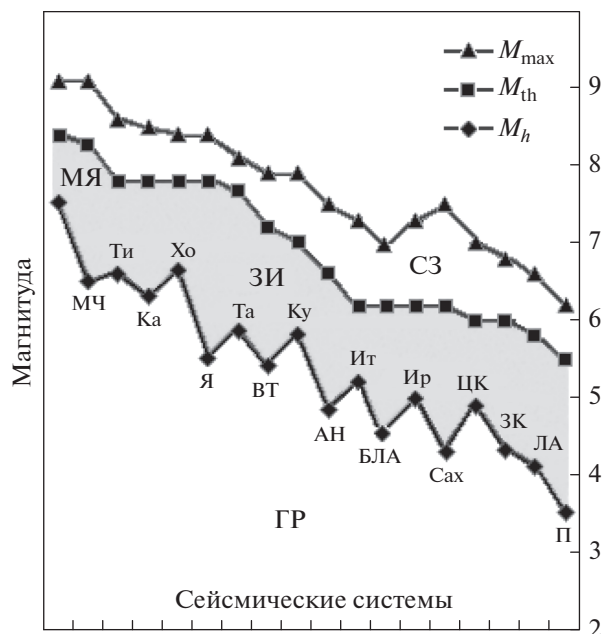


Рис. 11. Пороговые магнитуды для 18 СС: ГР – область магнитуд, где выполняется закон Гутенберга–Рихтера; ЗИ – область землетрясений индикаторов (заштрихована); СЗ – область сильных землетрясений. Сокращения имен СС приведены в табл. 2.

трясений индикаторов больше, чем $E \geq 10^{K_h}$. Используя (24), можем найти необходимую минимальную энергию землетрясения индикатора, которое дает старт траектории:

$$E_h = 10^{b/(1-a)}. \quad (25)$$

Магнитуда такого землетрясения M_h определится по формуле (1). Таким образом, новый цикл сейсмической активности начинается с землетрясения индикатора с $M \geq M_h$. Физический смысл пороговой магнитуды M_h , которая является верхним магнитудным пределом закона ГР, дан в работе [Акопян, 2015]. В табл. 2 приведены пороговые значения M_h и максимальные магнитуды сильных землетрясений, а на рис. 11 показаны пороговые магнитуды M_h , M_{th} и M_{max} для 18 СС. Основным вклад энергии в траекторию подготовки сильного землетрясения происходит от землетрясений индикаторов в диапазоне магнитуд $M_h \leq M \leq M_{th}$, где закон ГР, как правило, нарушается. Здесь мы имеем в виду закон ГР, рассчитанный в сейсмических циклах внутри объема СС с минимальным шагом магнитуд $\Delta M = 0.2$. Закон ГР соблюдается в области $M < M_h$, где имеется большая статистика слабых землетрясений, но их вклад в кумулятивную энергию незначителен. Другими словами,

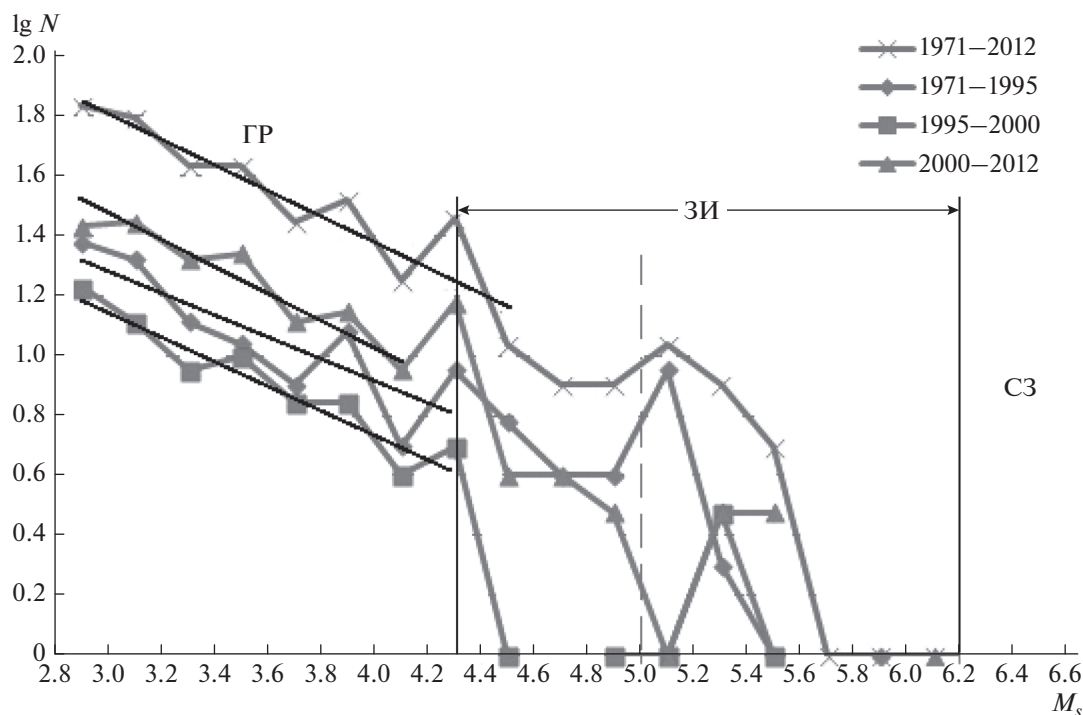


Рис. 12. Закон Гутенберга–Рихтера, рассчитанный в соответствии с параметрами СС Сахалин для четырех временных интервалов, начиная с $M_{min} = 2.8$ и магнитудным шагом $\Delta M = 0.2$. В диапазоне $4.3 < M < 6.2$ землетрясения индикаторы (ЗИ) не коррелируются с законом ГР; СЗ – область сильных землетрясений.

закон ГР это закон “наоборот” — когда сейсмолог хочет описывать повторяемость сильных землетрясений, ему приходится рассматривать большие интервалы и шаги осреднения по времени и ухудшать точность результатов. В результате этого карты сейсмической опасности, являющиеся нормативной основой для строительных норм и правил, составляются с учетом повторяемости в 500, 1000 и 5000 лет [Комплект ..., 1999], все время, удаляясь от реальности. Эти осредненные карты не отражают реальную динамику подготовки сильных землетрясений ансамбля (подготовка которых происходит в десятки лет) и часто приводят к катастрофическим ошибкам.

Среднеквадратичная ошибка при определении наклона графика повторяемости обратно пропорциональна квадратному корню от числа землетрясений. Нарушение закона ГР при $M \geq M_h$ связано с уменьшением числа землетрясений в сейсмическом цикле и увеличением (стандартной) ошибки в наклоне графика повторяемости. Подробнее область применимости закона ГР на примере четырех сейсмических циклов СС Сахалина показана на рис. 12. В диапазоне $4.3 < M < 6.2$ землетрясения индикаторы отклоняются от эмпирического закона ГР и происходят случайным образом. Эти землетрясения индикаторы вносят основной вклад в кумулятивную энергию и играют решающую роль в подготовке ансамбля сильных землетрясений. СС и аттракторы открывают возможность построения новых, динамических карт сейсмической опасности для временных окон от 50 лет до 1 года в области магнитуд, где нарушается закон ГР, а имеет место закон производства сейсмической энтропии (16).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически выведена степенная (в логарифмическом масштабе линейная) зависимость между кумулятивной сейсмической энергией и энтропией, которая на основе сейсмостатистики позволяет контролировать критическое поведение сейсмогенных структур, ответственных за подготовку сильных землетрясений, и управляет эволюцией систем. Кластеризация землетрясений вблизи критических точек в аттракторе для ансамбля сильных землетрясений отражает динамику гетерогенного поведения локальных разломных структур внутри СС. Трековые диаграммы и аттракторы описывают динамику поведения геологической среды в зависимости от сеймотектонических ситуаций и могут быть использованы для мониторинга и прогнозирования землетрясений на всех этапах подготовки (долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном). Они могут служить основой и при создании глобальной наземно-космической системы мониторинга сильных землетрясений. Аттракторы и трековые

диаграммы описывают и объясняют различные проявления сейсмической активности (рои, затихия, форшоки, афтершоки, триггеры). На примере центральных Курил показано применение метода для объяснения аномального каскада сильных землетрясений. Введение концепции СС с характерными дискретными значениями пороговых магнитуд, позволяет по новому классифицировать землетрясения на сильные, индикаторы и слабые в зависимости от масштаба сеймотектонических структур и характера решаемых задач. В новом подходе статистика землетрясений внутри объема среды, которая не подчиняется закону ГР с увеличением точности (с уменьшением временного шага осреднения) и с увеличением магнитуды землетрясений, заменяется статистикой числа возможных энергетических состояний системы, которая увеличивается со временем и приводит к более точным результатам. Это открывает возможность построения динамических карт сейсмической опасности на коротких временных интервалах (от года до десятка лет).

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту за ценные замечания, которые улучшили статью.

Исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0108).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х томах. М.: Мир. 1983. 880 с.
- Акопян С.Ц. Энтропия сейсмической системы и новый сейсмический закон // Докл. РАН. 1995. Т. 340. № 4. С. 531–535.
- Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.
- Акопян С.Ц. Диссипативные сейсмические системы, энтропия и возможности создания системы прогноза “Сейсмической погоды”. Альманах “Деловая Слава России”, III выпуск. 2007. С. 42–46.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы Японии: энтропия и мониторинг мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 67–90.
- 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.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование земли из космоса. 2005. № 3. С. 37–52.

- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Злобин Т.К., Полец А.Ю. Очаговые зоны катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M_w = 8.3$) и 13 января 2007 г. ($M_w = 8.1$) и глубинное строение земной коры средних Курил // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 54–63.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 263 с.
- Колмогоров А.Н., Журбенко И.Г., Прохоров А.В. Введение в теорию вероятности. Библиотека “Квант”. 1982. М.: Наука. 160 с.
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Масштаб 1 : 8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / Уломо В.И., Шумилин Л.С. М. 1999. 57 с.
- Костров Б.В. Сейсмический момент, энергия землетрясения и сейсмическое течение горных масс // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 1. С. 23–40.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. Теоретическая физика Т. 5. М.: Наука. 1964. 570 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. Теоретическая физика Т. 1. М.: Наука. 1973. 207 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Курс теоретической физики. Т. 3. М.: Физматлит. 2004. 800 с.
- Николис Г. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. М.: Мир. 1989. 490 с.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. М.: Мир. 1989. 345 с.
- Пригожин И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках. М.: Наука. 1985. С. 15.
- Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир. 1982. 217 с.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Федотов С.А. О закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66–93.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 302 с.
- Akopian S.Ts. Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of long-term prediction of large earthquakes: By examples of Armenian Upland, North-Western Iran, Italy, and Central California. Moscow, Triumph. 2013. P. 92.
- Akopian S.Ts., Kocharian A.N. Critical behavior of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. 2013. doi 10.1093/gji/ggt398
- 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.
- Akopian S.Ts. Monitoring and forecast of the Van earthquake (October 23, 2011) in the seismic system Tavro-Caucasus // Book of Abstracts, Second ECEES, Istanbul, Aug. 25–29. 2014.
- Akopian S.Ts., Popov E.A. 2010. Monitoring induced seismicity based on seismic entropy method // Abstracts, Induced Seismicity ECGS–FKPE Workshop, 15–17 November, Luxembourg. 2010. P. 3–4.
- Anderson D.L., Whitcomb J.H. The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction. Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System, P. 417–426 / eds Kovach R.L., Nur A. 1973. Stanford Univ. Press.
- Conway J.H., Guy R.K. The book of numbers. Springer-Verlag. 1996. P. 68–70.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageoph. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena, 2nd ed. Princeton: Prin. Univ. Press. 1954. 310 p.
- Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and energy of earthquakes // Ann. Geofis. 1956. V. 9. P. 1–15.
- Hillers G., Mai P.M., Ben-Zion Y., Ampuero J.-P. Statistical properties of seismicity of fault zones at different evolutionary stages // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. P. 513–533.
- Jordan T.H. et al. Operational earthquake forecasting: state of knowledge and guidelines for utilization // Ann. Geophys. 2011. V. 54. P. 315–391.
- Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Hutko A.R., Furlong K., and Rivera L. The 2006–2007 Kuril Islands great earthquake sequence // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B11308, doi 10.1029/2008JB006280
- Mjachkin V.I., Brace W.F., Sobolev G.A., Dicterich J.H. Two models for earthquake forerunners // Pure. appl. Geophys. 1975. V. 113. P. 169–181.
- Parkfield. The Prediction and the Promis. Earthquakes, Volcanoes, USGS, V. 20. 2. 1988. 92 p.
- Rade L., Westergren B. Mathematics Handbook for Science and Engineering. 5th edn. 2004. Springer-Verlag. 562 p.
- Raeesi M., Atakan K. On the deformation cycle of a strongly coupled plate interface: The triple earthquakes of 16 March 1963, 15 November 2006, and 13 January 2007 along the Kurile subduction zone // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B10301, doi 10.1029/2008JB006184
- Rice J. The mechanics of earthquake rupture. Physics of the Earth's Interior. P. 555–649 / Dziewonski A.M., Boschi E. North-Holland. 1980.
- Roeloffs E. The Parkfield, California earthquake experiment: an update in 2000 // Curr. Sci. 79. 2000. P. 1226–1234.
- Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 2nd edn. 2002. Cambridge Univ. Press. 472 p.
- Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell Syst. Tech. J. 1948. V. 27. P. 379–423, 623–656.
- Tsuijboi C. Earthquake energy, earthquake volume, after-shock area, and strength of the Earth's crust // J. Phys. Earthq. 1956. V. 4. P. 63–66.