

УДК 550.34.013.4 + 550.343.6

PACS 91.30.Ab Px, 91.45.Ga

АНАЛИЗ УРАЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 4 СЕНТЯБРЯ 2018 НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ

С.Ц. Акопян

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

Автор для переписки: С.Ц. Акопян, e-mail: sakopian@yandex.ru

Аннотация. В работе исследуется подготовка недавнего Уральского землетрясения 4 сентября 2018 г. с применением метода сейсмической энтропии. На основе иерархии сейсмических систем анализируются специфические особенности возникновения слабых, но чувствительных землетрясений во внутриплитовых зонах, дается классификация таких сейсмических систем на энергетически низшем уровне. Технология позволяет интерпретировать необычные проявления сейсмичности в прошлом, выявлять динамику медленного накопления и разрядки напряжений за десятки и сотни лет, оценивать возможность появления более сильного землетрясения в будущем. Количественно исследованы условия возникновения чувствительного землетрясения в районе Белоярской АЭС. Показано, что сеймотектонические особенности структур Урала не могут привести к подготовке сильного разрушительного землетрясения, однако мониторинг появления слабых, но чувствительных землетрясений важен для предотвращения возможных техногенных и экологических катастроф на индустриальных объектах и АЭС.

Ключевые слова: динамическая модель, трековая диаграмма, сейсмическая энтропия, внутриплитовые землетрясения, мониторинг сейсмичности

Цитирование: Акопян С.Ц. Анализ Уральского землетрясения 4 сентября 2018 на основе метода сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 55, № 4. С. 37–46. DOI: 10.21455/VIS2018.4-3

ВВЕДЕНИЕ

На границе Челябинской области и Республики Башкортостан 4 сентября 2018 г. произошло ощутимое землетрясение с $M = 5.4$ (везде в статье под M понимается магнитуда по объемным волнам). Это землетрясение относится к слабым внутриплитовым, подготовка которых происходит медленно на протяжении десятков и сотен лет. Классическим примером внутриплитовых землетрясений является каскад исторических разрушительных землетрясений 1811 и 1812 гг. на разломе Нью-Мадрид в штате Миссури (США) [Bakun, Norrey, 2004], которые мы изучили и ретроспективно смоделировали их подготовку методом сейсмической энтропии [Акопян, 2015, 2018]. На большей части своей территории внутриплитовые зоны сейсмически неактивны. Природа сейсмической активности внутри плиты как на Урале, так и в центральной части США объясняется тем, что здесь в земной коре скрыты реликтовые рифтовые зоны, наличие которых периодически (на протяжении сотен лет) может приводить к медленному

накоплению и разрядке напряжений [Tuttle et al., 2002].

В классической сейсмологии землетрясения классифицируются на сильные и слабые по масштабу и интенсивности из воздействия и определяются единой шкалой. В энтропийной сейсмологии сильные и слабые землетрясения — это относительные понятия, связанные с характером решаемой задачи и концепцией сейсмической системы (СС). СС — это объем геологической среды, выделяемый на основе закона производства сейсмической энтропии и ответственный за подготовку ансамбля сильных землетрясений [Akopian, Kocharian, 2014]. Введение концепции СС позволяет выявить нижний M_h и верхний M_{th} пороги магнитуд землетрясений, которые количественно разделяют землетрясения на сильные (с $M \geq M_{th}$), землетрясения-индикаторы ($M_h \leq M < M_{th}$) и слабые ($M < M_h$) в зависимости от масштаба сеймотектонической структуры. Обычно внутриплитовые СС по размерам намного больше, чем системы в сейсмоактивных зонах на грани-

цах плит, поскольку из-за медленных процессов сейсмичность здесь слабая и рассеяна на большой площади.

В пределах Среднего Урала неоднократно фиксировались сейсмические события с магнитудой более 4.0 и интенсивностью на поверхности 6–7 баллов. Уральские землетрясения, ввиду густонаселенности и развитой промышленности этой территории, имеют некоторую техногенную составляющую (обвальную, связанную с масштабными горными выработками, здесь происходят подземные гидравлические удары и взрывы с выбросом грунта), однако значительная часть землетрясений Урала имеет тектоническую природу. Впервые о землетрясениях на Урале упомянуто в работе [Орлов, 1879].

Наиболее сильно ощущавшиеся исторические землетрясения на Урале датированы с 1798 г., и, к удивлению автора, довольно хорошо описаны [Кошубин и др., 2001, Землетрясения на Урале, 2018]. Несмотря на то, что, в отличие от катастрофических землетрясений в центральной части США, Средний Урал характеризуется относительно слабой сейсмичностью, суть природы их подготовки на языке энтропийной сейсмологии одинакова. Пороговые магнитуды M_{th} СС на Урале (ввиду разных историй тектонического развития) и магнитуды сильных землетрясений намного ниже. Анализ исторических данных и инструментальных наблюдений последних лет убедительно показывает, что землетрясения с проявлениями на поверхности в 5–6 баллов происходят в пределах Среднего и Южного Урала (отмечено прямоугольником на рис. 1).

Эти землетрясения, конечно, не представляют прямой угрозы населению, однако в густонаселенном индустриальном районе при небольшой глубине гипоцентров могут привести к экологическим катастрофам и, косвенно, повлиять на жизнедеятельность человека. Большинство гражданских и промышленных объектов рассчитано лишь на 5-балльные сотрясения. Особо следует отметить сооружение повышенной опасности — Белоярскую АЭС, находящуюся в 40 км северо-восточнее Екатеринбурга. Даже небольшие разрушения, вызванные локальными землетрясениями на таких объектах, могут привести к катастрофическим экологическим последствиям и повлиять на жизнедеятельность человека, поэтому очень важно изучение природы уральских землетрясений, их мониторинг и прогноз.

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Для мониторинга и прогноза ансамблей сильных землетрясений в сейсмоактивных зонах применяется иерархический подход. При таком подходе СС разбиваются на подсистемы, те, в свою

очередь разбиваются на подподсистемы и т.д. При этом понижается пороговая магнитуда прогнозируемых сильных землетрясений и, как правило, уменьшаются и размеры систем (рис. 2, а). Одно и то же землетрясение в СС может быть землетрясением-индикатором, а в подсистеме — быть сильным и прогнозироваться. Мониторинг иерархии СС сверху вниз позволяет детализировать и прогнозировать слабую сейсмичность и одновременно повышает точность и надежность прогнозов сильных землетрясений в СС верхнего энергетического уровня.

При выборе конкретного объекта (например, площадки АЭС) производится мониторинг снизу вверх (рис. 2, б) в иерархии только тех СС, в которые попадает выбранный объект. Такой подход позволяет по-новому определять магнитуду проектного землетрясения ($M_{ПЗ}$) и максимально расчетного ($M_{МРЗ}$) для площадки АЭС [Нормы проектирования..., 1989] и осуществлять их эффективный мониторинг.

Развитие метода сейсмической энтропии от больших систем к малым и снижение пороговых магнитуд землетрясений [Акопян, Kocharian, 2013] до микроскопических (наномагнитуды от – 3 до 0, размеры — десятки и сотни метров) позволяет применять метод сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли и при разработке сланцевого газа [Акопян, 1915]. Метод сейсмической энтропии дает возможность контролировать индуцированную и триггерную сейсмичность естественного и техногенного характера [Акопян, 2017б].

В работах [Акопян, 2013, 2016, 2017а; Акопян, Рогожин, 2013; Акопян и др., 2017; Акопян, 2013; Акопян, Kocharian, 2013] описаны многочисленные СС, выявленные в разных сейсмоактивных регионах мира с сильной и слабой сейсмичностью. На рис. 3 дано схематическое обобщение областей аттракторов для этих СС. На трековой диаграмме иерархия СС (аттракторы) разделена на три области А, В и С. Точками показаны возрастающие значения параметра действия h_s (параметра, характеризующего фоновый размер трещины в СС) на диагонали равновесия: А — область землетрясений, вызывающих повреждения и разрушения; В — внутриплитовые активные области, опасные для производственных сооружений, коммуникаций, нефтегазовых разработок, площадок АЭС; С — область микросейсмичности.

Справа на рис. 3 приведены характерные размеры СС. Параметр действия h_s возрастает, в связи с укрупнением пороговой магнитуды землетрясений индикаторов M_{th} , при переходе от малых СС к большим. Пороговая магнитуда характеризует минимальный энергетический уровень однородности в системе. Таким образом, для иерархии

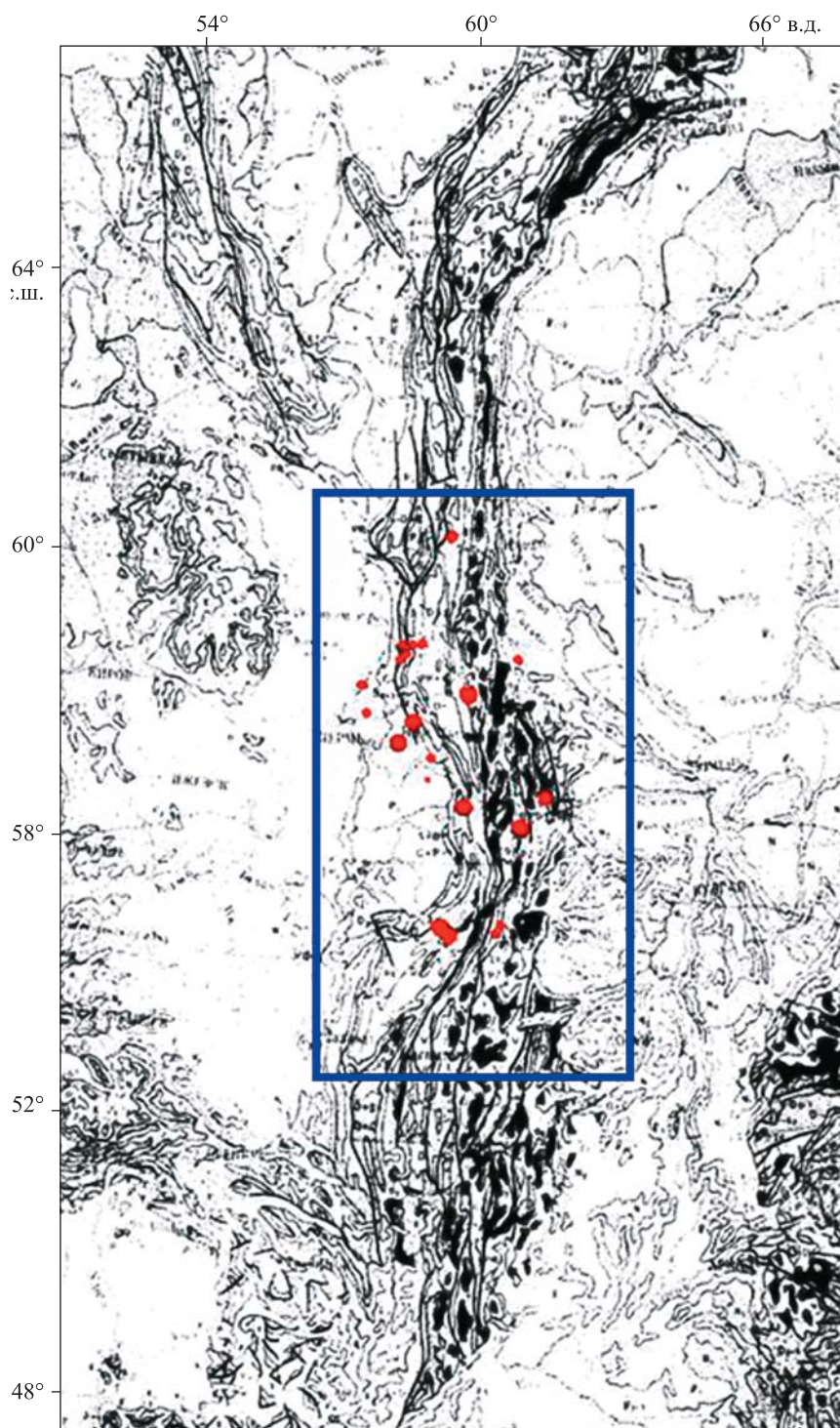


Рис. 1. Тектоника Урала и область проявления сейсмичности в пределах Среднего и Южного Урала

СС, включающих разломы разных масштабов, размер квантов энергии излучения (землетрясений-индикаторов) не одинаков. Они крошечны для маленьких СС с пороговыми магнитудами «сильных» землетрясений $M_{th} = -1.8-3.3$ (область С), средние для малых СС с $M_{th} = 3.4-5.0$

(область В) и большие для СС с $M_{th} = 5.1-9.0$ (область А).

По-видимому, первичные неоднородности на заре эволюции литосферы возникали в крошечных системах (маленькая «зернистость»), затем со временем постепенно поднимались по иерар-

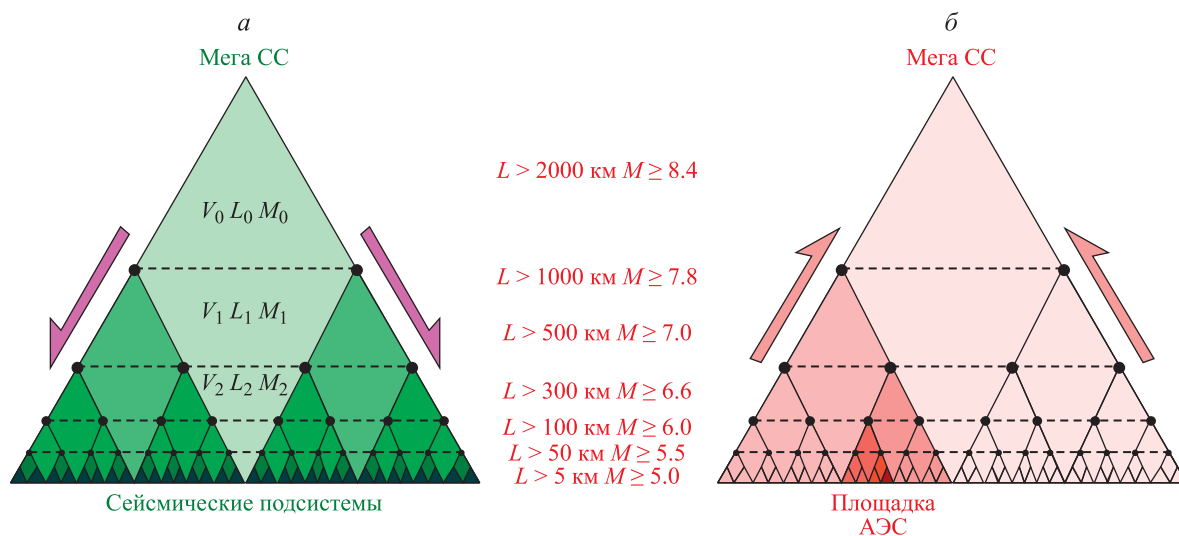


Рис. 2. Пирамида иерархии СС (характерные размеры и пороговые магнитуды): *а* – мониторинг сверху вниз; *б* – мониторинг снизу вверх

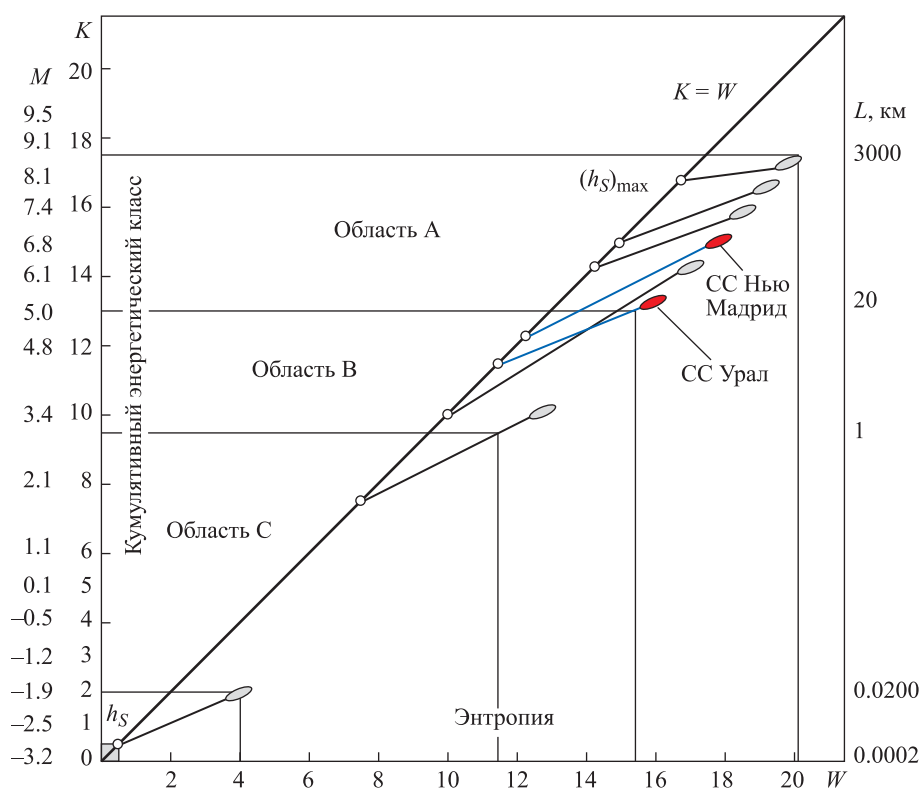


Рис. 3. Схематическая иллюстрация иерархии аттракторов при возрастании размеров L СС и пороговых магнитуд. Возрастание минимального параметра действия h_s показано точками на диагонали равновесия. А — область опасных землетрясений, вызывающих повреждения и разрушения; В — опасная область для технических сооружений; С — область микросейсмичности

хической структуре вверх (укрупнялись, средняя «зернистость») и т.д. Отметим, что период инструментальных наблюдений для СС очень мал по сравнению с временем их эволюции продолжительностью в сотни тысяч и миллионы лет. Однако одновременное существование СС в разных сеймотектонических ситуациях позволяет реконструировать эволюцию СС на разных геологических этапах времени. В течение такой продолжительной эволюции СС наследовали основные первичные и накапливали вновь приобретенные неоднородности [Shaw, 2004; Hillers et al., 2007].

Внутриплитовые сейсмически активные зоны в центральной части США и на Урале также унаследовали признаки активных тектонических процессов, происходивших сотни миллионов лет назад. Методический подход выявления и мониторинга СС для таких зон будет несколько отличаться от СС, расположенных в современных сейсмически активных областях на границах плит. Отметим, что во внутриплитовых СС «сейсмическое время» замедляется [Akorian, 2015] по сравнению с сейсмически активными зонами. Аттракторы для СС Нью-Мадрид и Урал находятся в области А, но землетрясения-индикаторы находятся в области В (рис. 3). Такая картина характерна для внутриплитовых зон со слабой сейсмичностью.

СЕЙСМИЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ ОЧАГА

Уральское землетрясение 4 сентября 2018 г. возникло под действием превалирования напряжений сжатия, ориентированных на юго-юго-восток, и рас-

тяжения, направленных на запад-юго-запад. Обе плоскости наклонены к горизонту под близкими углами. Тип движения по плоскости — правосторонний сдвиг с компонентами взброса согласно USGS NEIC и взброс согласно GFZ. Уральские горы находятся на стыке двух тектонических плит — Русской платформы и Западно-Сибирской плиты. Механизм очага показывает, что в районе дугообразной деформации на Среднем Урале действуют сжимающие напряжения северо-западного направления. Сейсмическая активность за последние 10 лет в регионе уральского землетрясения показана на рис. 4, б.

СЕЙСМИЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ ОЧАГА

На основе каталогов землетрясений и тектоники была выявлена СС Урал с пороговой магнитудой $M_{th} = 5.3$ и ее подсистема с $M_{th} = 4.8$. На рис. 5 показаны контуры СС Урал и эпицентры землетрясений-индикаторов с $M < 5.3$ (маленькие кружки) и сильных землетрясений с $M \geq 5.3$ (большие кружки). СС Урал имеет протяженность 950 км (для сравнения, СС Нью-Мадрид имела протяженность 1900 км). Также на рис. 5 показано местоположение Белоярской АЭС.

В табл. 1 приведены параметры эпицентров сильных землетрясений и значения кумулятивных параметров в сейсмических циклах СС Урал и ее подсистеме. По градации надежности прогнозов [Акопян и др., 2017] СС Урал причисляется к IV (плохому) уровню, когда число завершившихся циклов $2 \leq N < 5$, а подсистема — к посредствен-

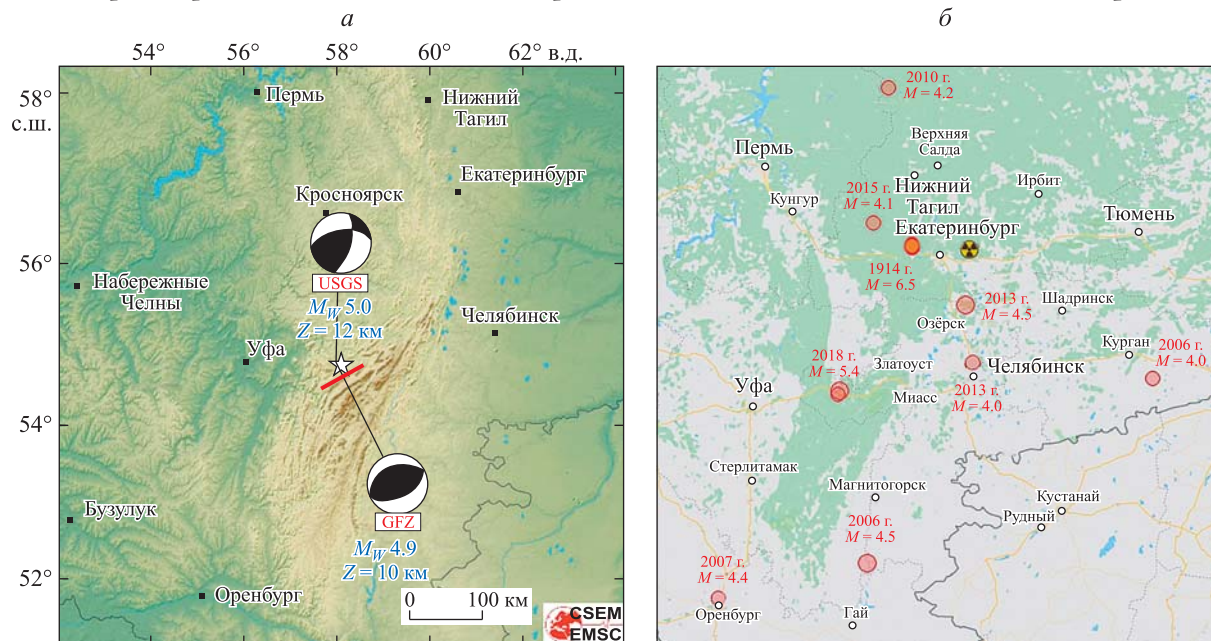


Рис. 4. а — механизм очага Уральского землетрясения; б — эпицентры слабых землетрясений с $M > 4.0$ в регионе за последние 10 лет

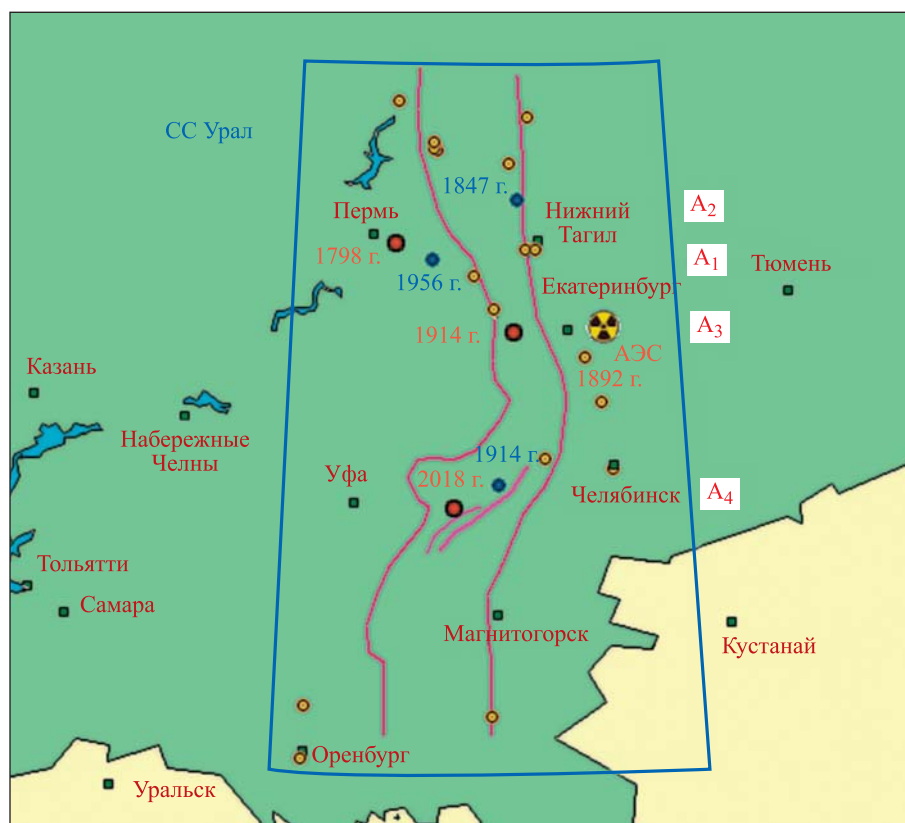


Рис. 5. Границы СС Урал, землетрясения-индикаторы (маленькие кружки) и сильные землетрясения (большие кружки). Маленькие темные кружки — сильные землетрясения в подсистеме

ным ($N \geq 5$). До Уральского землетрясения 2018 г. в системе мы имели всего один завершившийся сейсмический цикл, а землетрясения с $M \geq 5.6$ пока не наблюдались.

Вероятность Уральского землетрясения 2018 г. по энтропии [Акопян, 2013] была равна в системе 49.28%, а в подсистеме 97.08%. В подсистеме хорошо прогнозируется и землетрясение от 17 авгу-

Таблица. Сильные землетрясения, значения кумулятивных параметров K_c , W_c и вероятности по энтропии P_w в сейсмических циклах СС Урала

j	Дата	φ	λ	K_s	M_s	K_c	W_c	P_w (%)
Сейсмическая система Урал, $M \geq 5.3$, $\bar{T} = 110$ лет								
1	1798.05.23	57.90	58.80	13.5	5.3	—	—	—
2	1914.08.17	56.80	59.40	13.9	5.5	13.116	15.756	—
3	2018.09.04	54.74	58.11	13.7	5.4	13.170	15.739	49.28
Сейсмическая система Урал, $M \geq 4.8$, $\bar{T} = 44$ года								
1	1798.05.23	57.90	58.80	13.5	5.3	—	—	—
2	1847.04.27	58.40	59.50	12.6	4.8	12.159	15.756	—
3	1914.08.17	56.80	59.40	13.9	5.5	12.564	15.048	76.98
4	1914.08.29	55.00	59.00	12.6	4.8	—	—	—
5	1956.07.28	57.70	57.60	12.6	4.8	11.200	12.376	0
6	2018.09.04	54.74	58.11	13.7	5.4	13.027	15.379	97.08
Мегасейсмическая система Урал, $M \geq 6.0$, $\bar{T} > 220$ лет								
1	2018.09.04	не ожидается				14.278	17.328	—

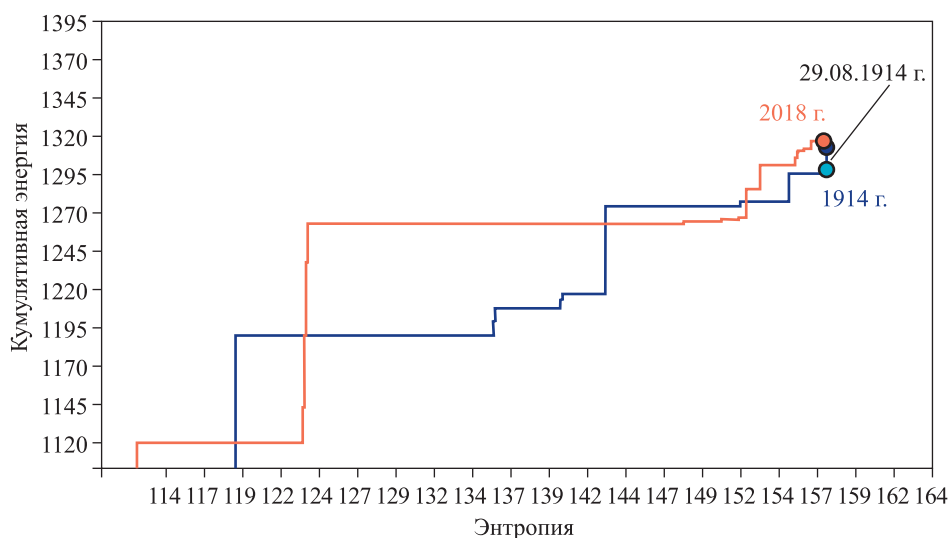


Рис. 6. СС Урал. Трековая диаграмма. Дефицит энергии землетрясения 17.08.1914 восполнило землетрясение 29.08.2014

ста 1914 г. (Билимбаевское землетрясение), здесь его вероятность равна 76.98%. Сейчас средний период повторяемости землетрясений ($c M \geq 5.3$) в системе равен 110 лет, а ($c M \geq 4.8$) в подсистеме — 44 года.

На рис. 6 показаны треки подготовки землетрясений 1914 и 2018 гг. в СС Урал. (На трековой диаграмме изображается зависимость логарифма кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов K_c в сейсмических циклах от энтропии W). Из таблицы и рис. 6 видно, что точки неустойчивости этих землетрясений в системе почти совпадают (по энтропии с точностью 0.1 %, по K_c — 0.4 %). С учетом темпа роста энтропии, равного 0.0014 в месяц в 2018 г., и разницы между энтропиями землетрясений 1914 и 2018 гг., $\Delta W = 0.016$, точность прогноза времени Уральского землетрясения по энтропии составит 12 мес.

Землетрясение 29 августа 1914 г., спустя 12 дней, приподняло траекторию и приблизило ее к точке неустойчивости Уральского землетрясения 17 августа 2018 г. По всей видимости, оба землетрясения 1914 г., которые произошли с разницей в 12 дней, можно приписать к двойным, которые мы подробно изучили в [Акопян, 2018]. Второе, более слабое землетрясение 1914 г. — не афтершок, поскольку оно произошло на удалении в 220 км от сильного (рис. 5). Землетрясение 29 августа 1914 г. относится к необычным по нашей классификации, поскольку оно сыграло роль недостающего землетрясения-индикатора в системе, но произошло после сильного.

На необычность этого землетрясения указывают и некоторые сообщения [Кошубин и др., 2001; Землетрясения на Урале, 2018], в которых отме-

чалось, что событие 29.08.1914 г. в районе Сатки было не обычным землетрясением, а тектоническим взрывом скопившихся под землей газов. Не исключено, что это техногенное землетрясение, которое по энергии заменило недостающее тектоническое землетрясение-индикатор. Только после Уральского землетрясения 2018 г., спустя более чем сто лет, стало возможным по-новому интерпретировать это необычное, энергетически значимое событие.

На рис. 7 приведена трековая диаграмма сейсмической подсистемы Урал. Показан линейный закон производства энтропии, определенный методом регрессии [Akopian, Kocharian, 2014] по трем (до уральского землетрясения 2018, тонкая прямая линия) и по четырем точкам неустойчивости из табл. 1:

$$K_c = 0.570W + 4.097. \quad (1)$$

Трековые диаграммы в системе и подсистеме взаимно дополняют друг друга и позволяют выявить динамику медленного накопления и разрядки напряжений за столетия. Последовательность землетрясений в системе 1798, 1914 и 2018 гг. происходит в дугообразной области, мигрируя с севера системы к югу (от A_1 к A_3 и затем к A_4 на рис. 4). Последовательные интервалы возникновения неустойчивости по энтропии в подсистеме показаны на рис. 7. Они также мигрируют к югу от зон A_1 , A_2 , A_3 к A_4 (рис. 4). На трековой диаграмме видно, что для того, чтобы произошло Уральское землетрясение 2018 г. в южной зоне A_4 , траектория должна была набрать высокие значения кумулятивной энергии при относительно низких зна-

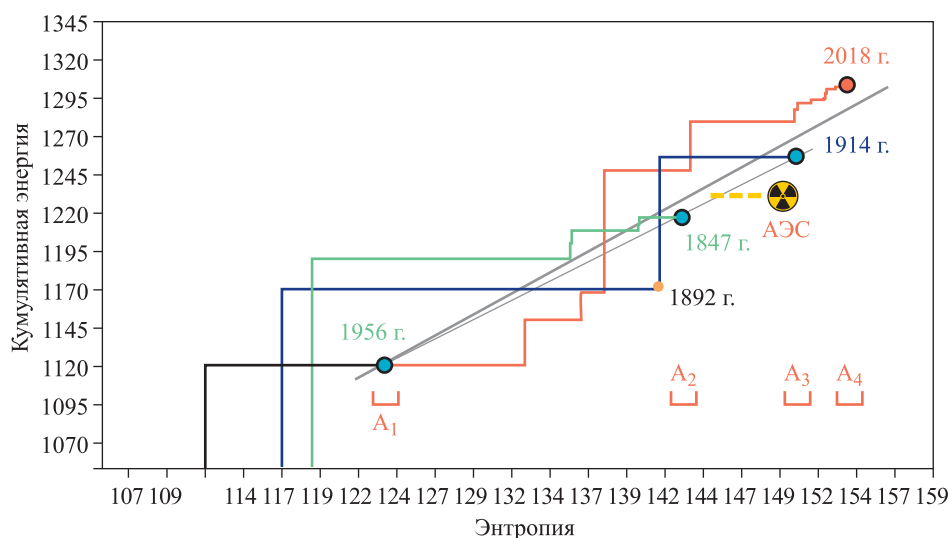


Рис. 7. Сейсмическая подсистема Урал. Трековая диаграмма. Прямая линия — закон производства сейсмической энтропии. Показано гипотетическое место неустойчивости для Белоярской АЭС. A1–A4 — последовательные интервалы возникновения неустойчивости по энтропии

чениях энтропии (должна была находиться выше линейной зоны неустойчивости). При таком развитии траектории зоны A_1 , A_2 , A_3 запираются и неустойчивость мигрирует к югу.

Накопленный опыт по исследованию областей неустойчивости в разных СС мира показывает, что когда траектория отдаляется от линейной зоны неустойчивости и приближается к границе аттрактора, в СС происходят необычные землетрясения вблизи и вне границ СС, активизируются палеоразломы. На рис. 7 на траектории подготовки землетрясения 1914 г. отмечена точка землетрясения-индикатора 1892 г., $M = 4.7$, эпицентр которого наиболее близко расположен к АЭС (рис. 4). Это землетрясение-индикатор скачкообразно вернуло

сильно отклонившуюся траекторию в линейную зону. С учетом такого анализа и накопленного опыта, на трековой диаграмме выявлено гипотетическое местоположение точки неустойчивости для Белоярской АЭС, соответствующей подготовке землетрясения с $M = 5.3$ (зона A_3 на рис. 7). Опасная для АЭС гипотетическая траектория, при кумулятивной энергии $K \sim 12.35$, должна набрать относительно высокую энтропию $W \sim 15.00$, т.е. должна сильно отклониться от линейной зоны.

Для оценки возможности возникновения на Урале землетрясений с $M \geq 5.6$ и более сильных с $M \geq 7.0$, наподобие Нью-Мадридской зоны в центральной части США, мы рассмотрели мега-СС Урал с пороговой магнитудой $M_{th} = 5.6$. На рис. 8

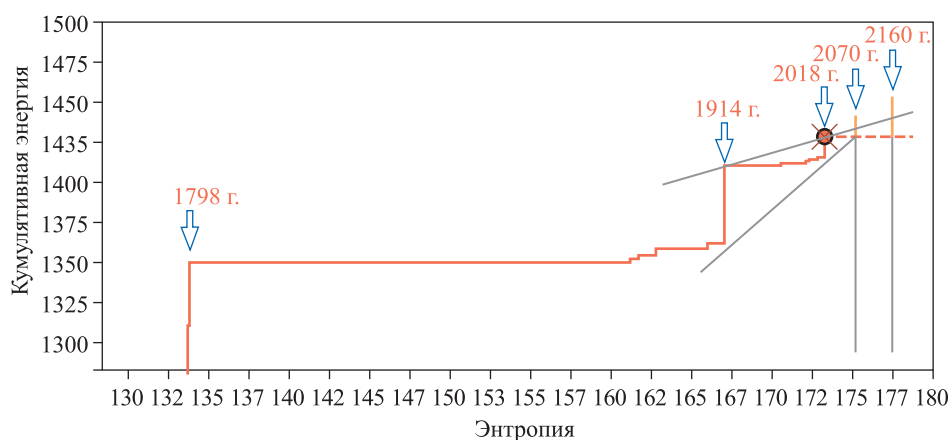


Рис. 8. Мега-СС Урал. Трековая диаграмма. После 2070 г. возможны землетрясения с $M > 6.0$, а после 2160 г. — с $M > 7.0$

приведена траектория подготовки сильного землетрясения в этой мегасистеме.

Траекторию мы промоделировали с 1798 г. Трек скачкообразно возрастал после землетрясений 1914 и 2018 гг. Накопленные значения кумулятивной энергии и энтропии приведены в таблице. При нынешнем темпе роста энтропии (если в системе не будет сейсмической активизации с $M > 5.0$) землетрясения с $M > 6.0$ могут возникнуть после 2070 г., а с $M > 7.0$ — после 2160 г., когда энтропия возрастет до значения 17.75, т.е. достигнет уровня Нью-Мадридских землетрясений. Однако рассеянное распределение слабой сейсмичности показывает, что на Урале нет локальных тектонических структур L -образного типа [Акопян, 2018], способствующих медленному накоплению больших напряжений для возникновения разрушительных землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода сейсмической энтропии выявлены СС на Урале, ответственные за подготовку Уральского землетрясения от 4 сентября 2018 г. Иерархически эти СС находятся на низком энергетическом уровне, но имеют большие размеры, свойственные внутриплитовым зонам. При определенных условиях в таких слабоактивных СС могут быть подготовлены и разрушительные землетрясения, однако на Урале таких предпосылок нет. Исследование трековых диаграмм позволяет выявить специфические особенности динамики медленного накопления и разрядки напряжений на Среднем и Южном Урале. В этой дугообразной области Урала неустойчивость возникает в северной части, затем медленно (за десятки и сотни лет) мигрирует к югу.

Смоделированы области неустойчивости в аттракторе, соответствующие подготовке чувствительного землетрясения в районе Белоярской АЭС. Полученные результаты позволяют интерпретировать необычные события, происшедшие в прошлом, и делать мониторинг и прогноз редких слабых землетрясений во внутриплитовых зонах, представляющих потенциальную опасность для гражданских и промышленных объектов в густонаселенных областях, спроектированных без сейсмоопасных норм.

Предлагаемая технология мониторинга слабой сейсмичности внутриплитовых зон на основе метода сейсмической энтропии может быть применена для европейских стран, таких как Франция, Голландия, Германия, Швейцария, Польша и др., где имеются промышленные объекты, плотины, тоннели, АЭС, где ведутся разработки угля и сланцевого газа. Контроль возникновения техногенных и естественных разрывов под такими объектами позволит своевременно принять необходимые меры и снизить экономический ущерб и предотвратить возможные экологические катастрофы.

ЛИТЕРАТУРА

- Акопян С.Ц. Сейсмические системы Японии: энтропия и мониторинг мегаземлетрясения Тохoku 11.03.2011 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 67–90.
- Акопян С.Ц. Энтропийная сейсмология и ее применение при разработке сланцевого газа // Экспозиция Нефть-Газ. 2015. Т. 45, № 6. С. 40–43.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 61–82. DOI: 10.7868/S0002333716060016
- Акопян С.Ц. Энтропия, мониторинг сейсмичности на Армянском нагорье и динамика заполнения Ахурянского водохранилища // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017 а. Т. 44. № 1. С. 71–80. DOI: 10.21455/VIS2017.1-4
- Акопян С.Ц. Энтропийная сейсмология. Нефть и сланец северо-восточного Китая // Neftgaz.ru. 20176. № 10. С. 20–25.
- Акопян С.Ц. Двойные землетрясения, их природа и прогноз методом сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45, № 2. С. 43–56. DOI: 10.21455/VIS2018.2-3
- Акопян С.Ц., Бондур 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. DOI: 10.7868/S0002333717010021
- 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.
- Землетрясения на Урале. <https://nashural.ru/article/istoriya-urala/zemletr-na-urale/>
- Каиубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Уткин В.И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона // Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 125 с.
- Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций ПНАЭ Г-5-006-87. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Орлова А. О землетрясениях в Приуральских странах // Труды общества естествоиспытателей при Императорском Казанском университете. 1873. Т. III, № 3. С. 1–7.
- 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.

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

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(1). P. 64–75.

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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АКОПЯН Самвел Цолакович – доктор физико-математических наук, ведущий 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

ANALYSIS OF THE URAL EARTHQUAKE OF SEPTEMBER 4, 2018 BASED ON THE METHOD OF SEISMIC ENTROPY

S. TS. AKOPIAN

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

Corresponding author: S.Ts. Akopian, e-mail: sakopian@yandex.ru

Abstract. The paper investigates the preparation of the recent Ural earthquake of September 4, 2018 using the method of seismic entropy. Based on the hierarchy of seismic systems, the specific features of the occurrence of weak but sensitive earthquakes in the intraplate zones are analyzed, the classification of such seismic systems at the lowest energy level is given. The technology makes it possible to interpret unusual manifestations of seismicity in the past, to identify the dynamics of slow accumulation and discharge of stresses over tens and hundreds of years, and to assess the possibility of the occurrence of a stronger earthquake in the future. The conditions for the occurrence of a sensitive earthquake near the Beloyarsk NPP have been quantitatively studied. It is shown that the seismotectonic features of the Ural structures cannot lead to the preparation of a strong destructive earthquake but monitoring the appearance of weak but sensitive earthquakes is important to prevent possible technological and environmental disasters at industrial facilities and nuclear power plants.

Keywords: dynamic model, track diagram, seismic entropy, intraplate earthquakes, seismicity monitoring

ABOUT THE AUTHOR:

AKOPIAN SAMVEL TSOLAKOVICH - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading 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. Analysis of the Ural earthquake of September 4, 2018 based on the method of seismic entropy, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii (Problems of Engineering Seismology)*, 2018, Vol. 45, No. 4, pp. 37–?? [in Russian]. DOI: 10.21455/VIS2018.4-3 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 4.