

УДК 550.34.013.4 + 550.343.6  
PACS 91.30.Ab, 91.30.Px, 91.45.Ga

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ К ВОСТОКУ ОТ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ 25 МАРТА 2020 г. НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ**

**С.Ц. АКОПЯН**

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

e-mail: akopian@ifz.ru

**Аннотация.** На основе метода сейсмической энтропии исследуется подготовка недавнего землетрясения 25 марта 2020 г. ( $M=7.5$ ) на востоке от Курильских островов. Это землетрясение, по аналогии с дуплетом сильных землетрясений 2006–2007 гг. в Центральных Курилах, позволило выявить фронтальную систему в регионе Северные Курилы–Камчатка. Фронтальные сейсмические системы расположены в центральных сегментах Курило-Камчатской дуги и отделены от тыловых систем океаническим желобом. Эти сейсмические системы позволяют описывать подготовку необычайно сильных редких землетрясений в Тихоокеанской плите перед зоной субдукции, выявлять динамику медленного накопления напряжений за десятки лет, схематически моделировать деформации взаимодействующих плит перед сильными землетрясениями и провести сравнительный анализ этих деформаций на Центральных и Северных Курилах. Подробно описаны фронтальные и тыловые сейсмические системы в регионе Северные Курилы–Камчатка с пороговыми магнитудами 8.4, 7.8, 7.4 и 6.6. Показано, что в мегасейсмической системе Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнitudой 8.4 накоплена большая энтропия и идет подготовка мегаземлетрясения магнитудой  $M \geq 8.7$ . Сравнительный анализ с траекторией подготовки катастрофического Камчатского землетрясения 1952 г. показывает, что оно может повториться к 2029 г. Мониторинг сейсмичности на основе выявленной иерархии тыловых и фронтальных систем позволит повысить качество прогнозов и выявить роль весьма редких сильных землетрясений при взаимодействии сегментов плит в зоне субдукции.

**Ключевые слова:** сейсмическая система, трековая диаграмма, сейсмическая энтропия, мониторинг сейсмичности, Курило-Камчатская дуга

**DOI:** <https://doi.org/10.21455/VIS2020.2-1>

**Цитирование:** Акопян С.Ц. Выявление особенностей сильного землетрясения к востоку от Курильских островов 25 марта 2020 г. на основе метода сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47, № 2. С. 5–18. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.2-1>

### **ВВЕДЕНИЕ**

25 марта 2020 года во фронтальной части Курило-Камчатского желоба произошло сильное землетрясение. Такие события во фронтальной части островных дуг происходят относительно редко, и по этой причине за инструментальный период накоплено не так много информации. В результате их природа и влияние на региональные тектонические процессы недостаточно хорошо изучены, а порой и необъяснимы. Такого рода события, происходившие в 2007 и 2009 гг. на Центральных

Курилах, были изучены методом сейсмической энтропии [Акопян, 2016]. Хотя нет сомнений в том, что плита должна изгибаться и деформироваться при приближении к зоне субдукции, детали такого процесса в реальных зонах слабо изучены и требуют рассмотрения. Изучение сильных землетрясений в этих зонах, приуроченных к погружающейся плите, открывает возможность сейсмологам моделировать эти процессы разными методами [Добрецов и др., 2013; Hanks, 1971; Gelabert et al., 2004; Raeesi, Atakan, 2009].

В данной работе исследуются особенности землетрясения 25 марта 2020 г. в рамках концепции сейсмических систем (СС) на основе метода сейсмической энтропии [Акопян, 1998, 2016, 2017, 2018а,б; Акопян и др., 2017; Akopian, 2013; Akopian, Kocharyan, 2014], проводится сравнительный анализ с землетрясениями на Центральных Курилах и выявляются особенности деформаций по простиранию Курило-Камчатской дуги.

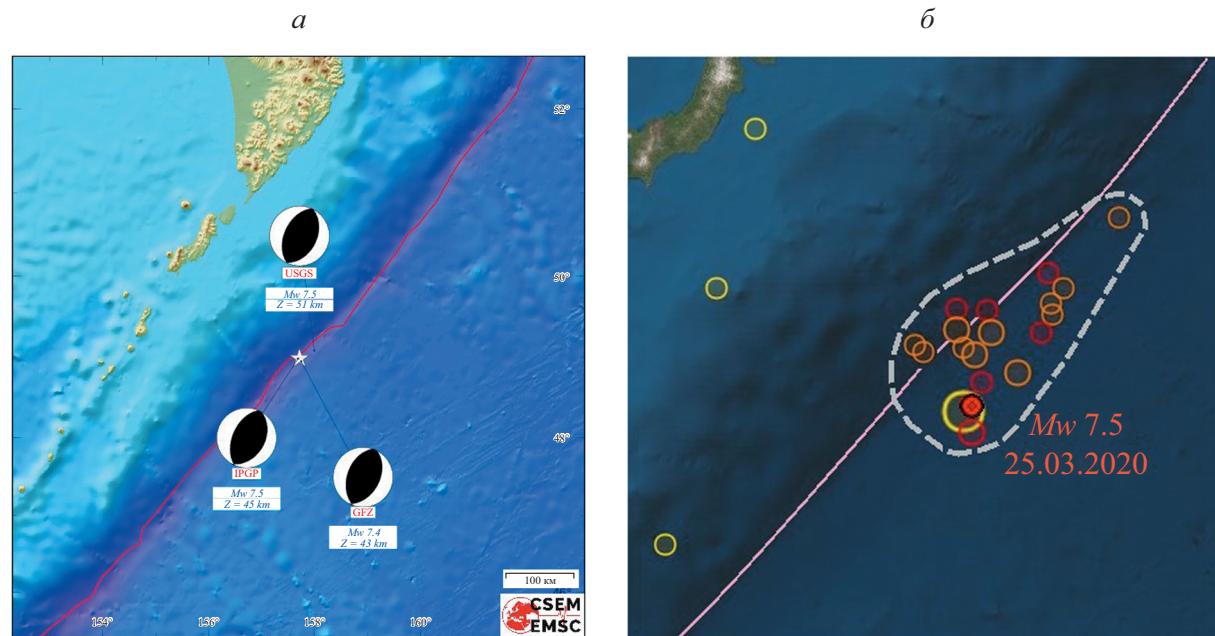
#### ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 МАРТА 2020 г.

Землетрясение 25 марта 2020 г. имело магнитуду  $M=7.5$  (под  $M$  подразумевается магнитуда по поверхностным волнам), глубину очага  $H=60$  км. Оно произошло восточнее островов Онекотан, Парамушир во фронтальной части Курило-Камчатского желоба внутри Тихоокеанской плиты, погружающейся под Охотскую микроплиту со скоростью  $\sim 80$  мм/год. Из-за глубокого расположения гипоцентра это землетрясение не вызвало существенного цунами. На рис. 1 показаны фокальный механизм очага (<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=841592>) и афтершоки с 25 марта по 9 апреля с  $m_b=3.6$ – $5.2$ . Землетрясение произошло под действием превалирования напряжений сжатия, ориентированных на запад–северо-запад согласно Геологической службе

США (USGS). Амплитуды подвижек и движения по плоскости происходили в виде взброса. Размеры площади смещения были порядка  $80 \times 40$  км (длина и ширина).

Отметим, что почти все из известных сильных землетрясений в регионе Северные Курилы–Камчатка до сих пор происходили к западу от океанического желоба. Исключения составляют землетрясения на Центральных Курилах 2007 г. ( $M=8.1$ ,  $H=20$  км) и 2009 г. ( $M=7.4$ ,  $H=28$  км), которые происходили восточнее Курило-Камчатского желоба, на расстоянии 300 км к югу от эпицентра землетрясения 25 марта. Изучение этих землетрясений на основе метода сейсмической энтропии [Акопян, 2016, 2018а] позволило причислить их к необычным и редким сильным землетрясениям во фронтальной части желоба в Тихоокеанской плите. За подготовку таких землетрясений ответственны узкие СС, протягивающиеся по фронтальной части желоба. Такая конфигурация подтверждается областью распространения афтершоков сильных землетрясений вне и внутри желоба; эти области примыкают друг к другу вдоль простирания дуги, но в целом не перекрываются.

Было показано, что средний период повторяемости сильных землетрясений во фронтальных СС в несколько раз больше, чем в тыловых, расположенных к западу от желоба. Например, на Центральных Курилах во фронтальных СС



**Рис. 1.** Фокальный механизм очага землетрясения 25 марта 2020 г. (а) и область афтершоков (пунктирующая линия) с 25 марта по 9 апреля 2020 г. (б)

повторяемость землетрясений с магнитудами  $M=7.4-7.5$  составляет 47 и 46 лет, а для землетрясений с  $M \geq 7.8$  – порядка 90 лет. Природа землетрясений во фронтальной части слабо изучена из-за их малой статистики и отсутствия в традиционной сейсмологии критерии причисления их к необычным. Поэтому важно исследование землетрясения 25 марта 2020 г. по методу сейсмической энтропии.

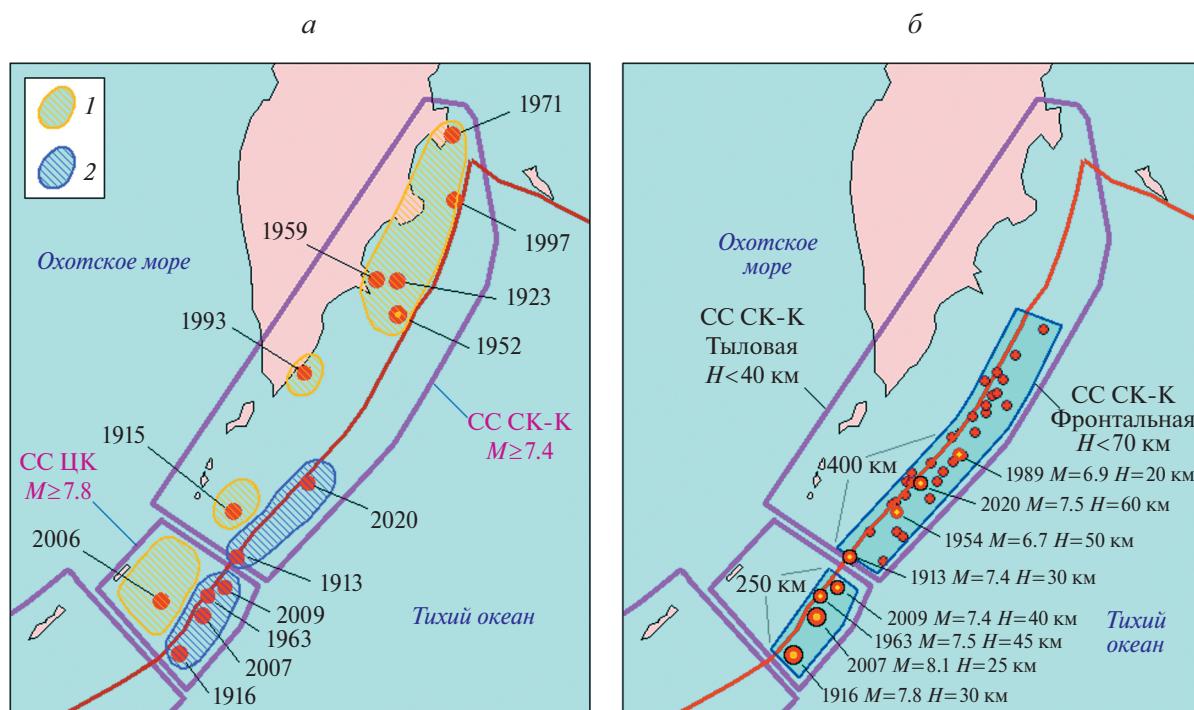
### СИСТЕМЫ В РЕГИОНЕ СЕВЕРНЫЕ КУРИЛЫ–КАМЧАТКА

На основе СС в регионе Северные Курилы–Камчатка покажем, почему землетрясение 25 марта 2020 г. по вышеописанным параметрам расположения эпицентра и глубины мы причисляем к необычным. Прежде чем описать систему, ответственную за подготовку этого землетрясения, опишем уже выявленные СС в регионе. В работах [Акопян и др. 2017; Akopian, Kocharian, 2014] была приведена СС Северные Курилы – Камчатка с пороговой магнитудой  $M_{th}=7.8$ . В рамках такой системы была выявлена СС с более низкой пороговой магнитудой  $M_{th}=7.4$ . На рис. 2, а приведена СС Северные Курилы–Камчатка с  $M \geq 7.4$  (система

II уровня), в которой мы до сих пор делали мониторинг и прогноз [Акопян и др., 2017].

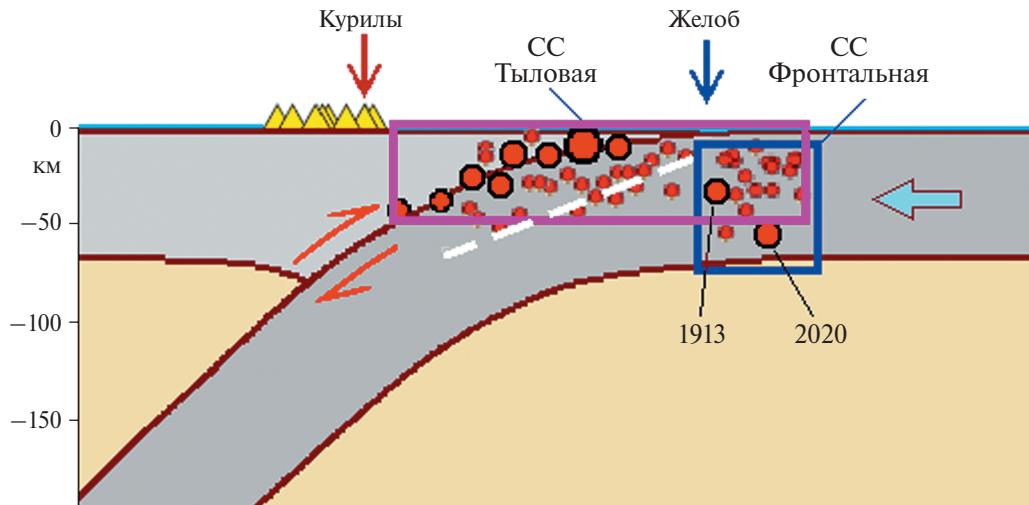
Видно, что почти все сильные землетрясения в системе находятся западнее желоба, в тыловой области (штриховка 1), и только землетрясения 1 августа 1913 г. ( $M=7.4$ ,  $H=30$  км) и 2020 г. находятся восточнее желоба (штриховка 2), во фронтальной области. Для описания подготовки землетрясений 1913 и 2020 гг. мы выделили более глубокую систему во фронтальной части желоба. На рис. 2, б приведены границы такой СС Северные Курилы–Камчатка Фронтальная, с пороговой магнитудой  $M_{th}=7.4$  и глубиной 70 км. Кружками показаны сильные землетрясения с  $M \geq 7.4$ ,  $M \geq 6.6$  и землетрясения-индикаторы с  $5.0 \leq M < 6.6$ . Для сравнения на рис. 2 приведены тыловые и фронтальные системы на Центральных Курилах. При выделении СС были использованы каталоги землетрясений [Новый каталог..., 1977; Специализированный каталог..., 2014].

На рис. 3 показаны профили тыловой и фронтальной СС Северные Курилы–Камчатка. Фронтальная система простирается узкой полосой вдоль желоба, но имеет большую глуби-



**Рис. 2.** а – контуры и сильные землетрясения СС Северные Курилы–Камчатка с  $M \geq 7.4$  и СС Центральных Курил с  $M \geq 7.8$ .

Жирной линией показан Курило-Камчатский желоб; 1, 2 – области, где группируются землетрясения в тыловой и фронтальной областях соответственно; б – границы, сильные землетрясения (большие кружки) и землетрясения-индикаторы (маленькие кружки) в СС Северные Курилы–Камчатка Фронтальная



**Рис. 3.** Схематический профиль тыловой и фронтальной СС Северные Курилы–Камчатка перпендикулярно простиранию дуги. Обозначения см. в тексте

бину (70 км), чем тыловая (40 км), из которой выпадает гипоцентр землетрясения 2020 г.

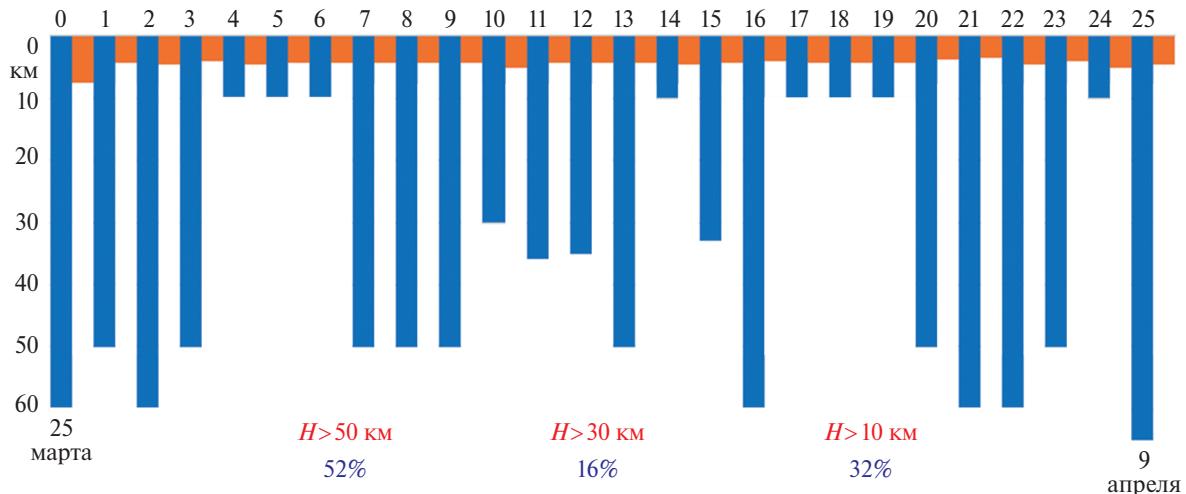
Пунктирная линия разделяет сильные землетрясения во фронтальной и тыловой системах по глубине, поскольку глубины (гипоцентры) сильных землетрясений в тыловой СС убывают по мере приближения к желобу. Сильные землетрясения во фронтальной системе на Центральных Курилах простираются на 250 км вдоль сегмента дуги, а во фронтальной системе Северные Курилы–Камчатка – на 400 км (см. рис. 2, б). Особенностью фронтальной системы является то, что не только сильные землетрясения, но и большая часть землетрясений-индикаторов имеют глубины 25–70 км, что необычно для погружающейся океанической плиты. Конфигурация на поверхности и глубина фронтальной системы подтверждаются распределением афтершоков землетрясения 25 марта 2020 г. (см. рис. 1). На рис. 4 приведена нумерация (и оценка в процентах) распределения афтершоков с 25 марта по 9 апреля 2020 г. по глубинам. Из 25 афтершоков с  $m_b=3.6\text{--}5.2$  и глубинами  $10 \leq H \leq 65$  км больше половины имеют глубины  $H \geq 50$  км.

На рис. 5 приведена диаграмма кумулятивной энергии в сейсмических циклах ансамбля сильных землетрясений СС Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнитудой  $M_{th}=7.4$  (см. рис. 2, а). Средний период повторяемости сильных землетрясений в ней составляет 15 лет. Для системы с сильными землетрясениями ( $M \geq 7.8$ ) землетрясение 1993 г. выпадает, и средний период повторяемости возрастает до

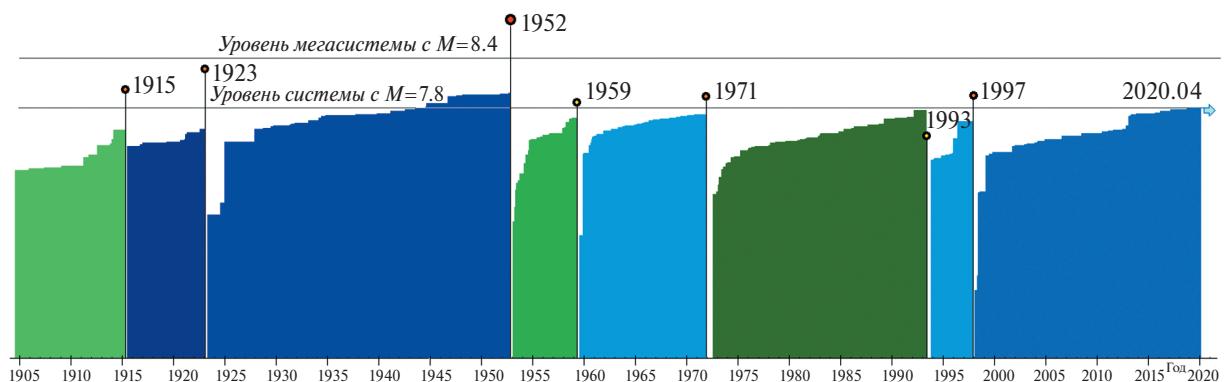
17 лет. О механизме очага этого землетрясения имеется мало информации. Учитывая разброс точности определения гипоцентра, мы приурочили его к фронтальной части океанической плиты. Землетрясение 1913 г. предшествовало сильному землетрясению 1 мая 1915 г. ( $M=8.0$ ) в тыловой части дуги. Не исключено, что эти два события имеют пространственно-временную связь, как и Симуширские землетрясения 2006–2007 гг.

В нашей модели подготовка землетрясения 1915 г. происходит в СС Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнитудой  $M_{th}=7.8$ , а землетрясения 1913 г. – во фронтальной СС с пороговой магнитудой  $M_{th}=7.4$ . Это означает, что землетрясение 1913 г. каким-то образом повлияло на подготовку землетрясения 1915 г. Однако достоверный характер такой связи невозможна установить из-за отсутствия представительного каталога до 1913 г.

Траектория подготовки землетрясения 25.03.2020 во фронтальной системе начиная с 1913 г. приведена на рис. 6. Для сравнения там же приведены точки неустойчивости Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. [Акопян, 2016]. Очаги этих двух землетрясений хорошо изучены [Злобин, Полец, 2009; Lay *et al.*, 2009; Raeesi, Atakan, 2009], поэтому мы не будем останавливаться на их подробном описании. Видно, что точки неустойчивости фронтальных землетрясений 2007 и 2020 гг. очень близки. Подготовка землетрясения 2020 г. завершила сейсмический цикл продол-



**Рис. 4.** Нумерация распределения афтершоков землетрясения 25.03.2020 с  $m_b > 3.6$  по глубине с 25 марта по 9 апреля 2020 г.



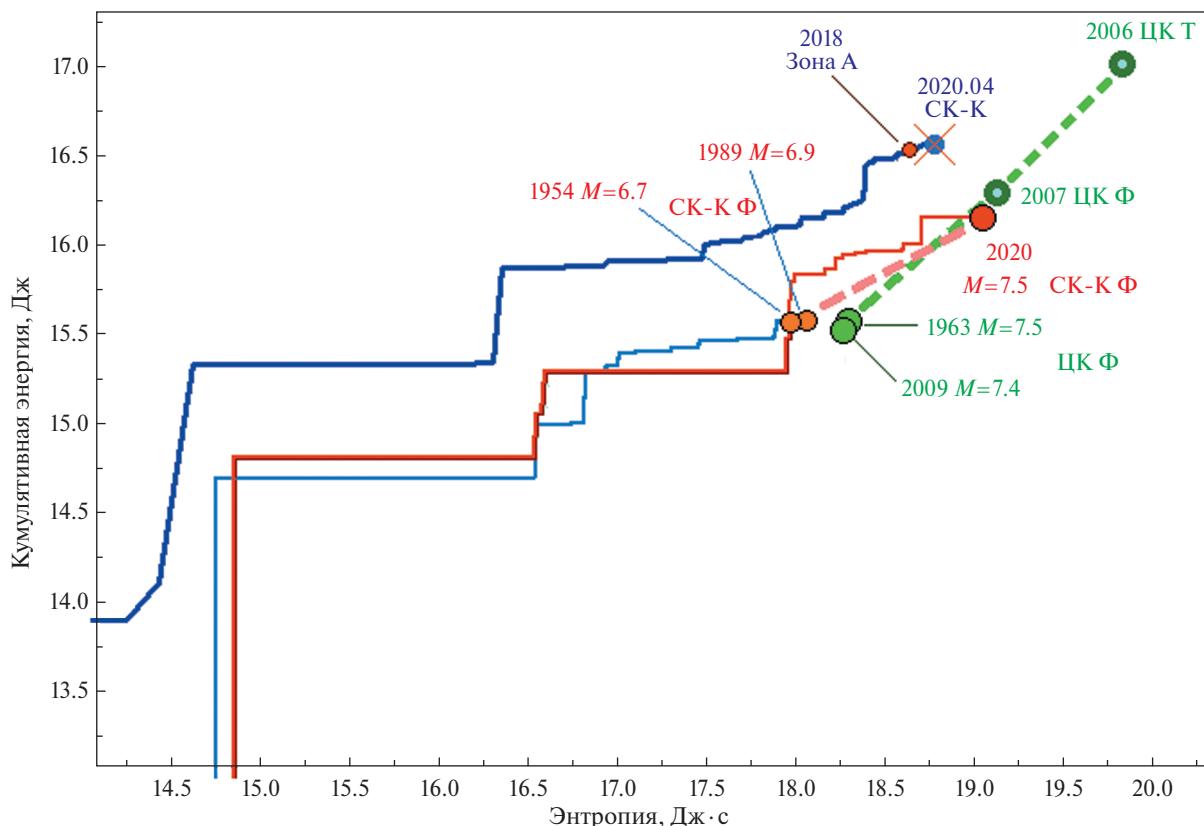
**Рис. 5.** Кумулятивная энергия в сейсмических циклах СС Северные Курилы–Камчатка с  $M_{th}=7.4$ . Последний, ещё не завершившийся сейсмический цикл стартовал с 1997 г.

жительностью в 107 лет и полностью разрядила фронтальную систему.

Во фронтальной части желоба, внутри Тихоокеанской плиты, с 1913 года происходили два сильных землетрясения с близкими механизмами очагов: первое – 23 сентября 1954,  $M=6.7$ ; второе – 11 апреля 1989,  $M=6.6$  (рис. 2, б). При понижении пороговой магнитуды в фронтальной системе выделяется подсистема с  $M_{th}=6.6$ , в которой прогнозируются эти два землетрясения. На рис. 6 приведены треки подготовок этих землетрясений в подсистеме: первая подготовка имеет продолжительность 41 год, вторая – 35 лет. Близость очагов в подсистеме и точек неустойчивости на трековой диаграмме подтверждает правильность выделения

фронтальной системы. Для сравнения на рис. 6 показаны точки неустойчивости сильных землетрясений 1963 и 2009 гг. (рис. 2, а) во фронтальной подсистеме на Центральных Курилах [Акопян, 2016].

Фронтальные точки неустойчивости группируются вблизи пунктирных линий неустойчивости, которые расположены ниже точек неустойчивости тыловых систем. Как и на Центральных Курилах, период подготовки сильных землетрясений в фронтальных системах намного продолжительнее, чем в тыловых, поскольку они происходят реже из-за тектонических особенностей. Конечно, фронтальную СС можно надежно выделить, если мы имеем не один, а два и более завершившихся



**Рис. 6.** Совмещенные траектории подготовок землетрясений 1954, 1989 и 2020 гг. в СС Северные Курилы–Камчатка Фронтальная (Ф) в билогарифмическом масштабе

Кружками показаны точки неустойчивости землетрясений 1963, 2007 и 2009 гг. в СС Центральных Курил Фронтальная. Жирными линиями показана траектория подготовки землетрясения в тыловой СС Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнитудой 7.4 на апрель 2020 г. Области фронтальных точек неустойчивости отмечены пунктирными линиями

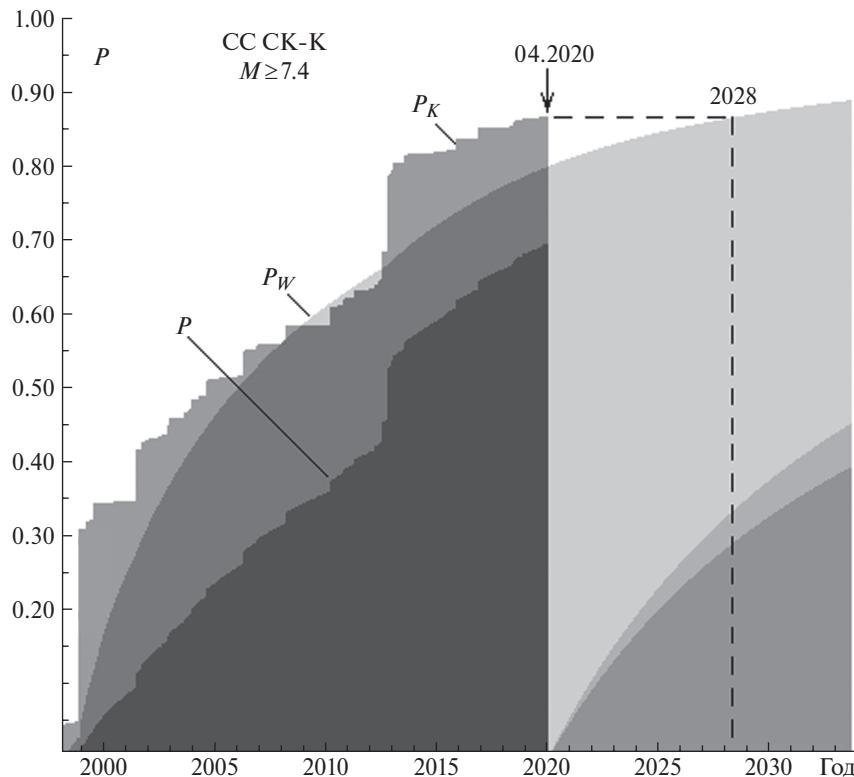
сейсмических цикла, но сравнительный анализ с системами на Центральных Курилах и выявление подсистемы с  $M_{th}=6.6$  подтверждают существование фронтальной системы.

Из анализа в рамках энтропийного подхода вытекает, что до землетрясения 2020 г. мы не могли выделить фронтальную СС и прогнозировать это сильное землетрясение. Существенно, что землетрясение 25.03.2020 не прерывает процесс подготовки сильного землетрясения в тыловой СС Северные Курилы–Камчатка,  $M \geq 7.4$ ,  $H \leq 40$  км, траектория которой на апрель 2020 г. приведена на рис. 6. Эта траектория стартовала после последнего сильного землетрясения 5 декабря 1997 г. ( $M=7.9$ ) и, как и все траектории тыловых систем, имеет намного большую кумулятивную энергию, чем траектории во фронтальных системах (см. рис. 4). Динамическая вероятность  $P$  сильного землетрясения [Akopian, 2013] с  $7.3 \leq M < 7.8$  в этой системе на начало апреля равна  $P=75.30\%$  ( $P_w=84.78\%$ ,  $P_k=88.81\%$ , см.

рис. 7). При отсутствии значительной активизации ( $P_k=\text{const}$ ) вероятность  $P$  будет максимальна к 2028 г., когда  $P_w=P_k$ .

#### ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФРОНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ

При выделении фронтальной системы, ответственной за мониторинг и прогноз землетрясения 25 марта 2020, мы, конечно, использовали опыт, накопленный по Центральным Курилам. Но фронтальные системы на Центральных Курилах и в регионе Северные Курилы–Камчатка имеют существенные различия. На Центральных Курилах гипоцентры сильных землетрясений и их афтершоков не глубокие (до 30 км), механизм очага самого сильного землетрясения типа сброса, разрыв выходит на поверхность океанического дна и сопровождается обильной афтершоковой активностью, при этом большинство афтершоков также имеет нормальный механизм.



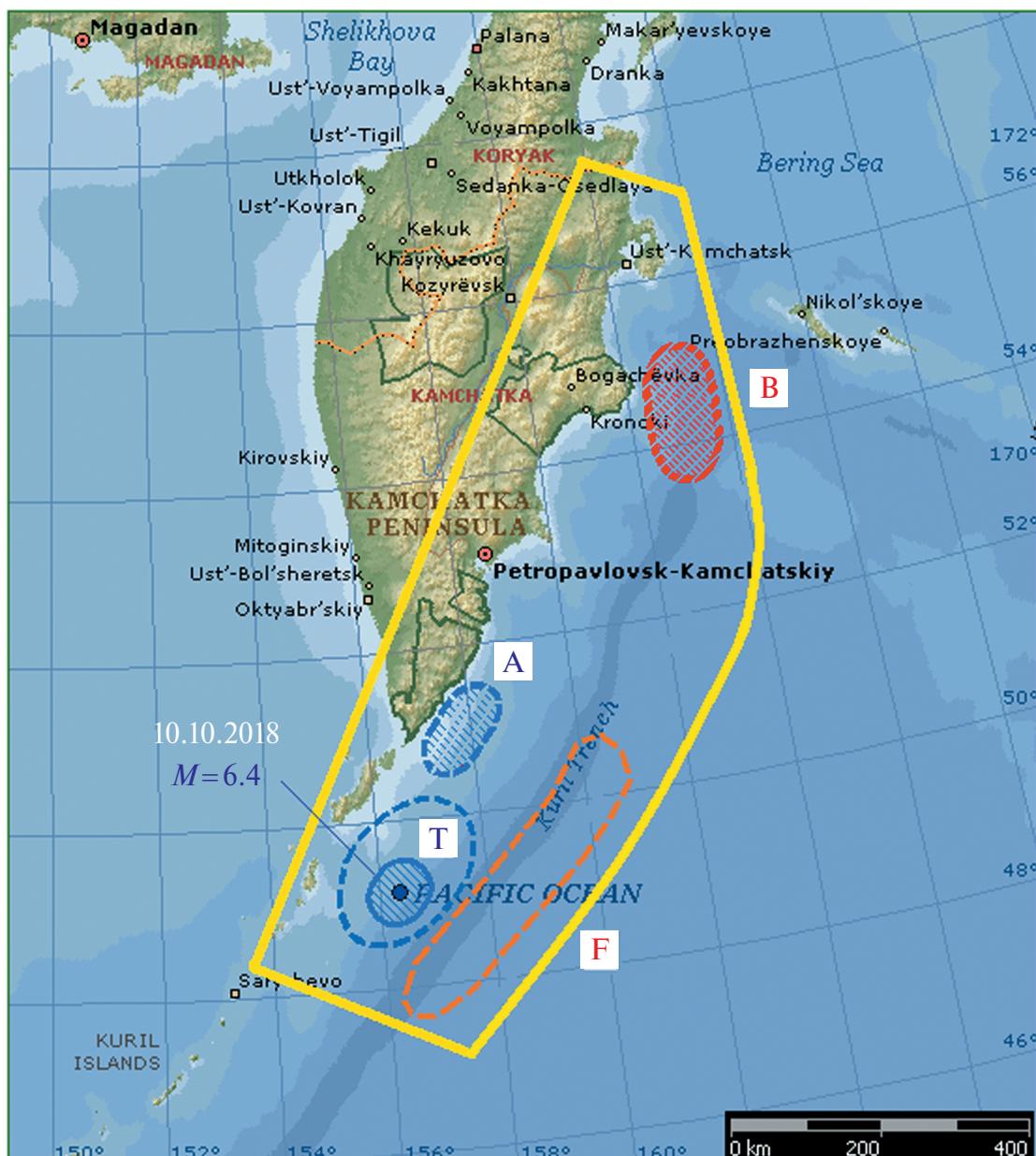
**Рис. 7.** Динамика роста вероятностей  $P$ ,  $P_w$  (по энтропии),  $P_k$  (по кумулятивной энергии) сильного землетрясения с  $7.4 \leq M < 7.8$  в СС Северные Курилы–Камчатка на апрель 2020 г.

В случае с фронтальной СС Северные Курилы–Камчатка, наоборот, глубины больше 30 км, механизм очага самого сильного землетрясения типа взброса, афтершоковая активность не столь высока.

В энергетическом плане пороговые магнитуды фронтальной системы ( $M_{th}=7.8$ ) и ее подсистемы ( $M_{th}=7.4$ ) на Центральных Курилах выше, чем аналогичные магнитуды в северных Курилах ( $M_{th}=7.4$ , 6.6 соответственно). Сейсмический цикл в фронтальной системе на Центральных Курилах (90 лет) короче, чем в Северных Курилах (107 лет), а в подсистемах, наоборот, длиннее. Эти различия указывают на разные скорости и механизмы деформации Тихоокеанской плиты на отдельных сегментах Курило-Камчатской дуги перед погружением. Перед сильным землетрясением фронтальных систем в тыловой системе Центральных Курил произошла сильная сейсмическая активизация, а на Северных Курилах в тыловой области наблюдалось затишье. На Центральных Курилах это позволило выявить между сильными землетрясениями фронтальной и тыловой зоны причинно-следственную связь [Акопян, 2016; Raeesi, Atakan, 2009].

Прежде чем понять особенности сложного взаимодействия отдельных сегментов Курило-Камчатской дуги, рассмотрим динамику поведения и некоторые особенности сильных землетрясений в тыловой СС Северные Курилы–Камчатка. На рис. 8 приведена прогнозическая карта СС Северные Курилы – Камчатка ( $M \geq 7.4$ ) из ежеквартального Бюллетея № 1 от 20 марта 2020 г. (Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН). Перед землетрясением 25 марта 2020 г. в тыловой СС Северные Курилы–Камчатка наблюдалась следующая картина. Траектория подготовки сильного землетрясения, стартовавшая с 1997 г., в начале 2018 г. находилась вблизи точки неустойчивости землетрясения 1993 г. (зона А на рис. 6, 8), затем она начала удаляться от этой потенциально опасной зоны.

Этому способствовало и землетрясение-индикатор 10 октября 2018 г. ( $M=6.4$ ) в тыловой области на расстоянии 100 км к западу от фронтальной зоны F (рис. 8). Такое поведение траектории указывало на то, что перед землетрясением 25 марта 2020 г. произошло упрочнение зоны субдукции на юге СС Северные Курилы – Камчатка, что могло спровоцировать



**Рис. 8.** Прогностическая карта СС Северные Курилы–Камчатка ( $M \geq 7.4$ ) из Бюллетеня от 20 марта 2020 г. Опасность из зоны А снимается. Во фронтальной зоне F возможно землетрясение с  $M \geq 7.4$  и  $H > 40$  км за счет упрочнения южной части системы. В зоне B может быть подготовлено землетрясение с  $M = 7.0$

(но не подготовить) землетрясение с  $M \geq 7.4$  в Тихоокеанской плите в зоне F (см. рис. 8). С другой стороны, в области между очагами землетрясений 1915 и 1993 гг. в южной части системы, в зоне T, отмеченной пунктиром на рис. 8, землетрясения с  $M > 6.7$  не происходили за 107-летний период. На основе такого анализа была снята опасность сильного землетрясения на юге СС Северные Курилы–Камчатка ( $M \geq 7.4$ ). Зона B (рис. 8) в Бюллетене была отмечена как потенциально опасная с точки

зрения возможности возникновения землетрясения с  $M=7.0$  на основе мониторинга в подсистемах, которые в данной статье не рассматриваются.

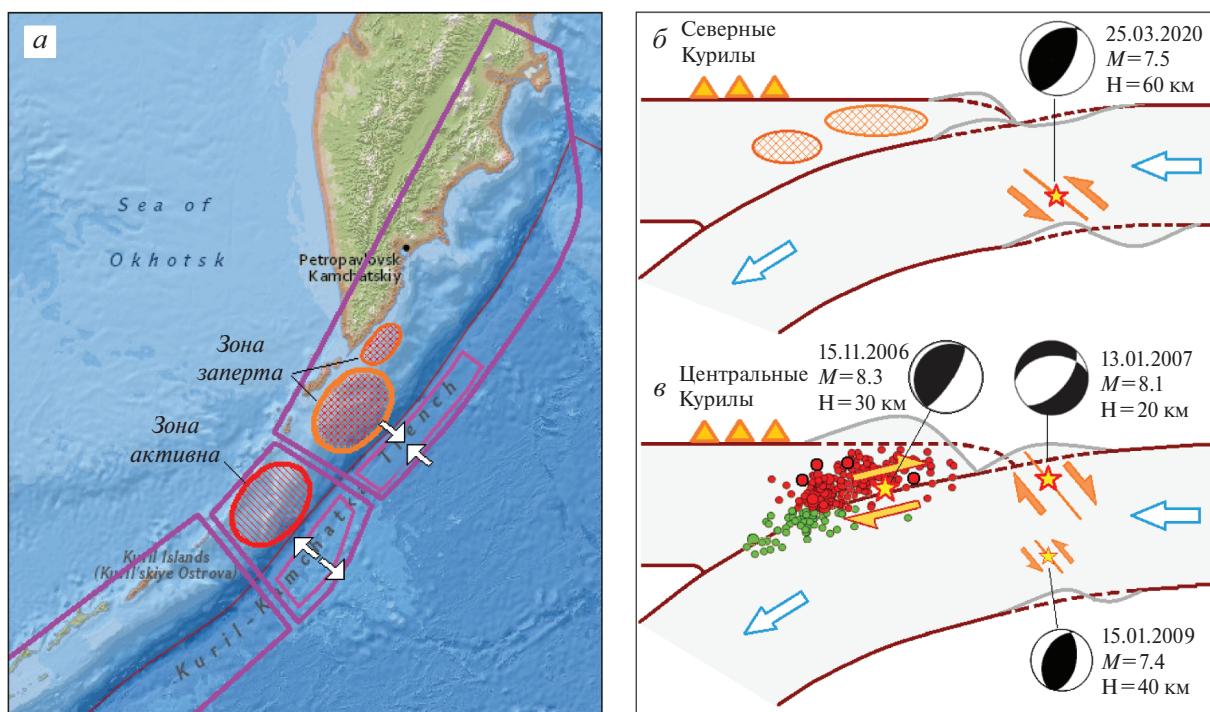
С учетом вышеизложенного на рис. 9 представлена схематическая модель деформации для сегментов желоба в Центральных и Северных Курилах. Механизм деформации океанической плиты в Северных Курилах (рис. 9, б) согласован с моделированием деформации океанической плиты в районе Ку-

рильской дуги полубесконечной пластиной, к которой приложены вертикальные и горизонтальные нагрузки [Hanks, 1971]. Такое моделирование деформаций соответствует фокальному механизму сжатия. На океаническую литосферу в районе Курило-Камчатской дуги действует горизонтальное сжимающее напряжение в несколько килобар в направлении, перпендикулярном оси Курильской впадины. Толщина Тихоокеанской плиты до начала погружения во фронтальной системе в районе северных Курил минимальна (~50–70 км), а в фронтальной системе на Центральных Курилах максимальна (~120–140 км) [Кулаков и др., 2011].

Столкновение плит в зоне субдукции на Центральных Курилах, начиная с 1916 г., привело к накоплению напряжений и подготовке сильных землетрясений одновременно в тыловой и фронтальной системах. Это, в свою очередь, привело к дуплету необычайно сильных неглубокофокусных землетрясений (см. рис. 9, в). Последовательность столь сильных двойных землетрясений 2006–2007 гг. с  $M > 7.8$  с взаимосвязанными механизмами сжатия и растяжения ранее не наблюдалась. Спустя

два года (в 2009 г.) на глубине 40 км (90 км к северо-востоку от очага землетрясения 2007 г.) произошло землетрясение с механизмом сжатия. Процесс затрагивал весь 250-километровый сегмент Центральных Курил, поскольку тыловая и фронтальная системы здесь имели одинаковую длину по простиранию желоба (см. рис. 2 и рис. 9, а).

Несколько иная картина наблюдается в южной части СС Северные Курилы–Камчатка (рис. 9, а, б). Здесь океаническая плита, натыкаясь на препятствие в виде запертой тыловой зоны в зоне субдукции в районе Северных Курил, начинает деформироваться и медленно накапливать напряжения в фронтальной СС Северные Курилы–Камчатка. В результате изгиба нижней части океанической литосферы это привело к сжатию на глубине 60 км и сильному землетрясению 25.03.2020. Однако существенно, что этот процесс затрагивал не весь 900-километровый участок дуги Северные Курилы–Камчатка до сочленения с Алеутской дугой, а только ее южный 400-километровый сегмент. Это объясняется тем, что в южном сегменте океаническая плита погружается под



**Рис. 9.** Заперты (в Северных Курилах) и активна (в Центральных Курилах) зоны в тыловых системах, объясняющие фокальные механизмы и деформации во фронтальных СС по простиранию Курило-Камчатской дуги (а) и схематическое представление модели предполагаемой деформации в разрезе для сегментов желоба в Северных (б) и Центральных Курилах (в). Показаны фокальные механизмы и подвижки очагов сильных землетрясений

более пологим углом, чем в прилегающем с севера Камчатском сегменте.

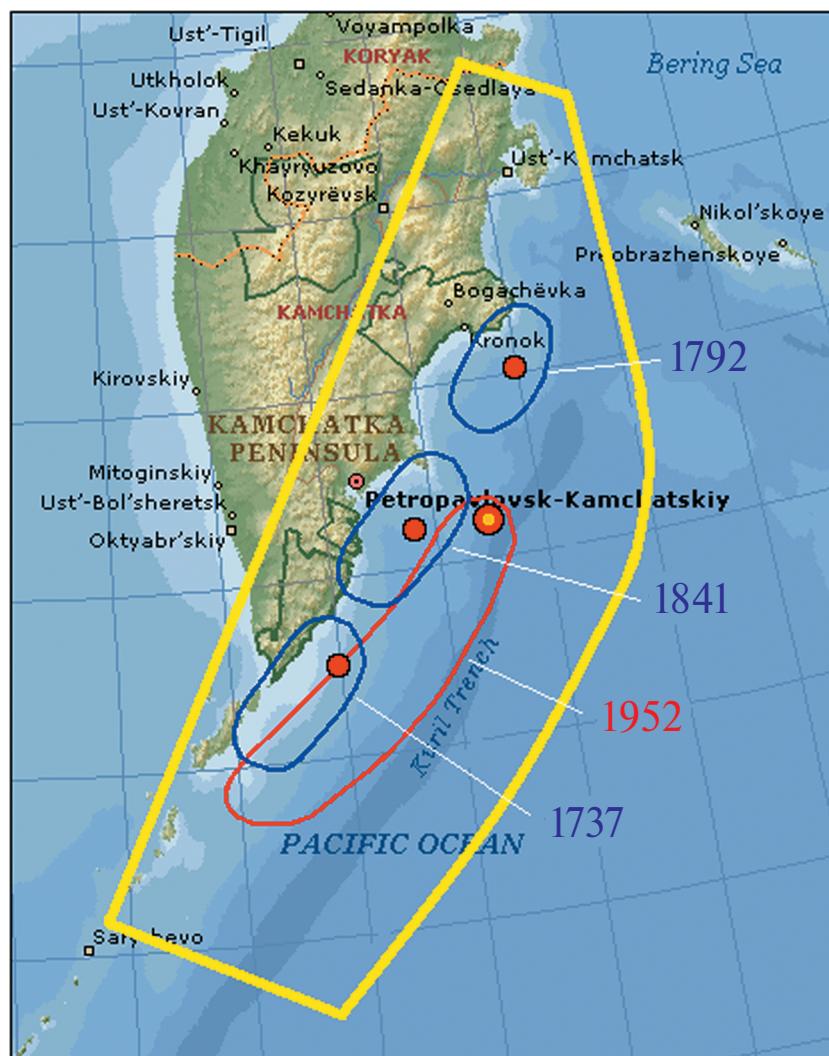
По мере приближения к Алеутской дуге угол погружения Тихоокеанской плиты становится

 более крутым [Кулаков, 2011]. Выявленные СС позволяют понять сложные тектонические процессы взаимодействия отдельных сегментов Курило-Камчатской дуги. На всем простирации Курило-Камчатской дуги от о. Хоккайдо до сочленения с Алеутской дугой фронтальные системы выявлены только в срединной части дуги (в Центральных и Северных Курилах). В северной и в южной частях перед зоной субдукции океаническая плита существенно не деформируется. Тыловые и фронтальные системы, на отдельных сегментах взаимодействуя по-разному, на высоком энергетическом уровне выравнивают региональные боковые

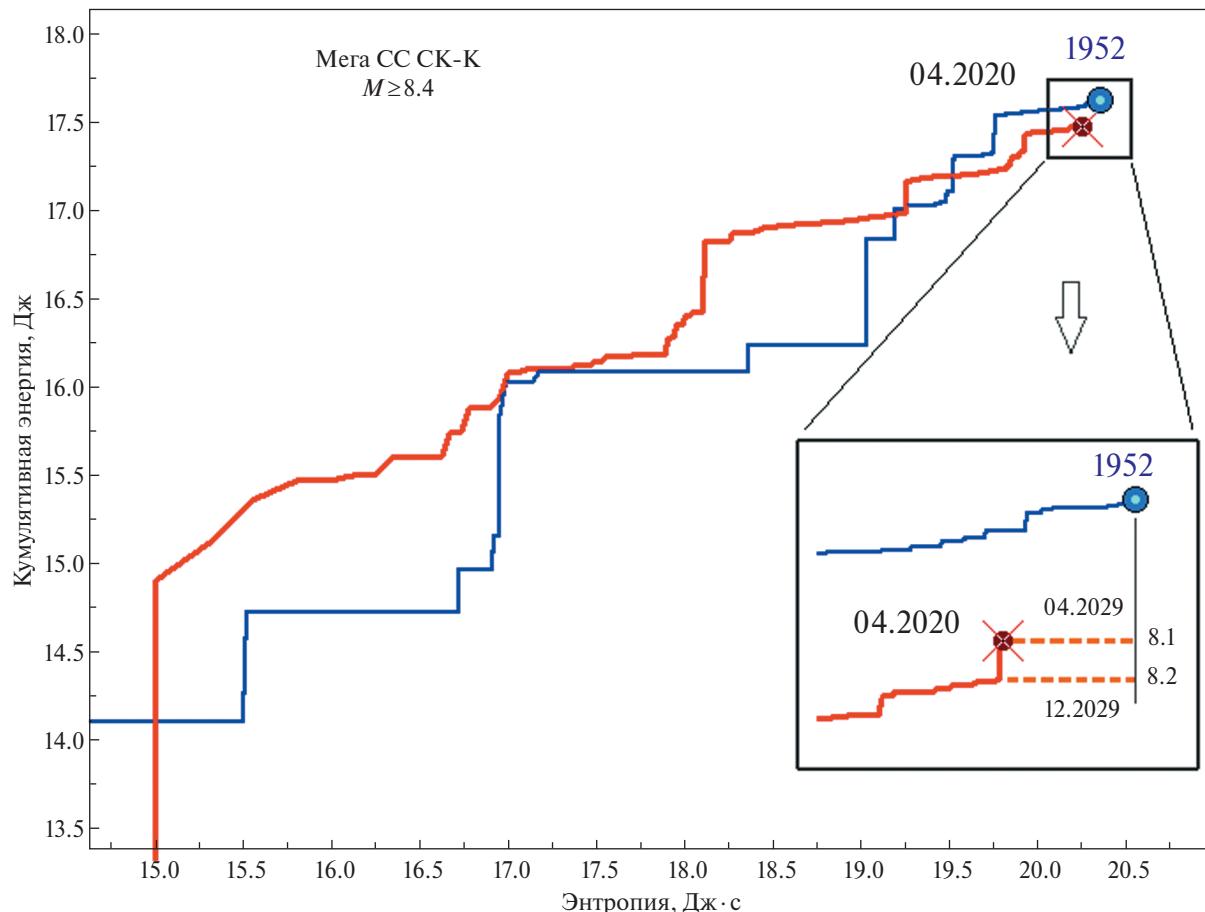
горизонтальные напряжения сжатия, накопленные по простиранию желоба в Курило-Камчатской дуге на больших временных интервалах.

### МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

Исследования в СС Северные Курилы–Камчатка с  $M_{th}=7.8$  показывают, что траектория накопила большую энтропию и переходит на стадию подготовки мегаземлетрясения. При повышении пороговых магнитуд систем в теории энтропийной сейсмологии сильные землетрясения, оказавшиеся ниже уровня пороговых магнитуд, переходят в разряд землетрясений-индикаторов – на них сейсмические циклы не прерываются. Накопленный опыт по СС Японии показывает [Акопян, 2013],



**Рис. 10.** Ансамбль мегаземлетрясений в мега-СС Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнитудой  $M_{th}=8.4$



**Рис. 11.** Траектория подготовки катастрофического землетрясения 1952 г. и сильного землетрясения в мега-СС Северные Курилы – Камчатка на апрель 2020 г. На врезке показано развитие траектории при сейсмическом затишье с учетом и без учета землетрясения от 25 марта 2020 г.

что подготовка мегаземлетрясений происходит в СС с пороговой магнитудой  $M_{th}=8.4$ . Уровни пороговых магнитуд 7.8 и 8.4 показаны на диаграмме рис. 5. В СС Северные Курилы–Камчатка мегаземлетрясения с магнитудами  $M \geq 8.4$  происходили 17 октября 1737 г. ( $M=8.6$ ), 22 августа 1792 г. ( $M=8.4$ ), 15 мая 1841 г. ( $M=8.5$ ) и 4 ноября 1952 г. ( $M=9.0$ ) [Чебров, Раевская, 2011; Специализированный каталог..., 2014]. На рис. 10 показаны очаговые области этих землетрясений.

Из исторических землетрясений наиболее надежно удается восстановить траекторию подготовки последнего катастрофического землетрясения 1952 г. На рис. 11 приведены траектория подготовки этого землетрясения и незавершенная траектория подготовки мегаземлетрясения на апрель 2020 г. Средний период повторяемости мегаземлетрясений равен 71 году, однако время подготовки катастрофического землетрясения 1952 г. самое продолжительное (111 лет), а землетрясений 1792

(55 лет) и 1841 года (49 лет) намного короче. Чем продолжительнее время подготовки, тем выше магнитуда мегаземлетрясения.

Прогнозируемая магнитуда уже подготовленного (в течение 68 лет) мегаземлетрясения будет составлять 8.7. Увеличение времени подготовки обычно происходит, когда траектория продолжительное время развивается ниже или выше области неустойчивости в аттракторе и, в результате, накапливает большую энтропию. Так, в случае катастрофического землетрясения Тохоку в Японии 11 марта 2011 г. траектория долгие годы развивалась ниже зоны неустойчивости с дефицитом кумулятивной энергии и накопила большую энтропию ( $W=20.585$ ). При подготовке землетрясения 1952 г. траектория развивалась, по всей видимости, выше зоны неустойчивости с избытком кумулятивной энергии и накопила энтропию  $W=20.248$ .

Из-за малой статистики область неустойчивости в мегасистеме на Камчатке пока

невозможно точно построить. На рис. 11 видно, что траектория подготовки мегаземлетрясения на апрель 2020 г. накопила энтропию  $W=20.152$  и приближается к точке неустойчивости землетрясения 1952 г. На врезке рис. 11 показано, что трек по энтропии достигнет точки неустойчивости 1952 г. к 2030 г. без учета землетрясения 25 марта 2020 г., а с его учетом – к апрелю 2029 г. В первом случае дефицит суммарной энергии равен энергии одного землетрясения с  $M=8.2$ , а во втором случае  $M=8.1$ . При увеличении глубины СС до 70 км трек может достигнуть точки неустойчивости на несколько лет раньше, но для точной оценки времени в этом случае надежных данных по глубинам исторических землетрясений в каталоге нет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе установлено, что за подготовку сильных землетрясений с глубинами до 40 км, локализованных западнее океанического желоба, ответственна СС Северные Курилы – Камчатка. Сильные землетрясения восточнее желоба в погружающейся Тихоокеанской плите являются редким событием, не свойственным большинству зон субдукции в мире. Пока мы наблюдаем это в сегментах Курило-Камчатской дуги в районе Центральных и Северных Курил. В рамках метода сейсмической энтропии подготовка таких сильных землетрясений происходит во фронтальных системах, отделенных от тыловых систем по линии простирания дуги. На Центральных Курилах фронтальная СС была выявлена после Симуширских землетрясений 2007 и 2009 гг., а землетрясение 25 марта 2020 г. позволило выявить фронтальную систему в районе Северных Курил.

Особенности механизма очагов сильных землетрясений в океанической литосфере на разных сегментах Курило-Камчатской дуги объясняются горизонтальными неоднородностями литосферных плит и разными механизмами взаимодействия фронтальных систем с тыловыми. Динамика взаимодействия и деформации во фронтальной части СС на Центральных Курилах обусловлены одинаковыми размерами по простиранию (~250 км) и по глубинам тыловой и фронтальных систем, продолжительной подготовкой сильных землетрясений параллельно в тыловой и фронтальных системах (~90 лет) и почти одновременной (с разницей 2 мес) разрядкой этих систем в виде дуплета сильных землетрясений.

Динамика взаимодействия и деформации во фронтальной части дуги в Северных Курилах обусловлена тем, что простирание фронтальной системы здесь ~400 км, что существенно меньше, чем протяженность всей тыловой

системы Северные Курилы – Камчатка (~900 км), а глубина фронтальной системы больше, чем тыловой. В южной части тыловой СС Северные Курилы – Камчатка образовалась запертая зона в верхних слоях литосферы, что в результате привело к деформации и накоплению напряжений сжатия в океанической плите на глубине 60 км за 107-летний период. Землетрясение 25 марта 2020 г. полностью разрядило фронтальную СС Северные Курилы–Камчатка и упрочнило Тихоокеанскую плиту в этом сегменте. В мега-СС Северные Курилы–Камчатка с пороговой магнитудой  $M_{th}=8.4$  накоплена большая энтропия – идет подготовка мегаземлетрясения с  $M=8.7$ , которая при сейсмической активизации к 2029 г. может возрасти до 9.0.

На основании изложенного заключаем, что за подготовку землетрясения от 25 марта 2020 г. ответственна фронтальная СС Северные Курилы–Камчатка, которая, по объективным причинам, выявлена после этого события, поэтому она не могла быть спрогнозирована. На всем простирации Курило-Камчатской дуги от Хоккайдо до сочленения с Алеутской дугой фронтальные системы выявлены только в Центральных и Северных Курилах.

В целом представленные результаты убедительно показывают, что технология мониторинга и прогноза сильных землетрясений на основе выявленных СС позволяет глубже понять динамику сложных тектонических процессов взаимодействия плит в отдельных сегментах Курило-Камчатской дуги и повысить качество прогнозов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.

Акопян С.Ц. Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 61–82. <https://doi.org/10.7868/S0002333716060016>

Акопян С.Ц. Энтропия, мониторинг сейсмичности на Армянском нагорье и динамика заполнения Ахурянского водохранилища // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44, № 1. С. 71–80. <https://doi.org/10.21455/VIS2017.1-4>

- Акопян С.Ц. Двойные землетрясения, их природа и прогноз методом сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018а. Т. 45, № 2. С. 43–56. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.2-3>
- Акопян С.Ц. Анализ Уральского землетрясения 4 сентября 2018 г. на основе метода сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018б. Т. 45, № 4. С. 37–46. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.4-3>
- 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.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 4. С. 469–499.
- 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.
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 830–851.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.) / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. С. 535.
- Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Ред. В.И. Уломов, Н.С. Медведева. М.: ИФЗ РАН, 2014. С. 512. <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf>
- Чебров В.Н., Раевская А.А. Землетрясения Камчатки 1737 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 220–229.
- 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. P. 92.
- Akopian S.Ts., Kocharyan A.N. Critical behavior of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. 2014. V. 196. P. 580–599. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt398>
- Gelabert B., Sàbat F., Rodriguez-Perea A., Fornós J.J. On the origin of the North Pacific arcs // Geologica Acta. 2004. V. 2, № 3. P. 203–212.
- Hanks T.C. The Kuril Trench – Hokkaido Rise System: Large Shallow Earthquakes and Simple Models of Deformation // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1971. V. 23. P. 173–189.
- Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Hutko A.R., Furlong K., Rivera L. The 2006–2007 Kuril Islands great earthquake sequence // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B11308. <https://doi.org/10.1029/2008JB006280>
- 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. <https://doi.org/10.1029/2008JB006184>

#### Сведения об авторе

**АКОПЯН Самвел Цолакович** – доктор физико-математических наук,  научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: akopian@ifz.ru



## DETECTION OF FEATURES OF THE STRONG EARTHQUAKE OF MARCH 25, 2020 TO THE EAST OF THE KURIL ISLANDS BASED ON THE SEISMIC ENTROPY METHOD

### S.Ts. AKOPIAN

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
e-mail: akopian@ifz.ru

**Abstract.** Using the seismic entropy method, the nucleation of the recent earthquake of March 25, 2020 ( $M=7.5$ ) to the east of the Kuril Islands is studied. This earthquake, by analogy with the doublet of the strong earthquakes of 2006–2007 in the Central Kuril Islands, revealed the frontal system in the Northern Kuril–Kamchatka region. The frontal seismic systems are located in the central segments of the Kuril-Kamchatka arc and are separated from the rear systems by an

oceanic trench. These seismic systems allow us to describe the preparation of unusually strong rare earthquakes in the Pacific plate before the subduction zone, to reveal the dynamics of slow stress accumulation over decades, to schematically simulate the deformations of interacting plates before strong earthquakes, and to conduct a comparative analysis of these deformations in the central and northern Kurils. Frontal and rear seismic systems in the Northern Kuril – Kamchatka region with threshold magnitudes 8.4, 7.8, 7.4 and 6.6 are described in detail. It is shown that in the mega-seismic system with a threshold magnitude of 8.4, a large entropy is accumulated and a mega-earthquake with magnitude  $M \geq 8.7$  is being prepared. A comparative analysis with the trajectory of the preparation of catastrophic Kamchatka earthquake of 1952 shows that it can happen to 2029. Monitoring of seismicity based on the identified hierarchy of rear and front systems will improve the quality of forecasts and reveal the role of very rare strong earthquakes in the interaction of plate segments in the subduction zone.

**Keywords:** seismic system, track diagram, seismic entropy, seismicity monitoring, Kuril–Kamchatka arc.

*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. E-mail: akopian@ifz.ru

**Cite this article as:** Akopian S.Ts. Detection of features of the strong earthquake of March 25, 2020 to the east of the Kuril Islands based on the seismic entropy method, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2020. V. 47, No. 2. P. 5–18. [in Russian]. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.2-1>

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