

УДК 550.34

О ВОЗМОЖНЫХ ТРИГГЕРАХ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2025 г., M_w 8.8

© 2025 г. Г. Г. Кочарян, С. Б. Кишкина*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: KishkinaS@idg.ras.ru*

Сейсмические и геодезические наблюдения, предшествующие сильным землетрясениям, являются важными источниками информации о деформационных процессах, происходящих в окрестности будущего гипоцентра землетрясения. В статье приводятся результаты оценок возможного вклада статических и динамических деформаций, наведенных крупными форшоками, в инициирование Камчатского мегаземлетрясения 29.07.2025 г., M_w 8.8. Представлены результаты расчета величин вариаций поля кулоновских напряжений на плоскости, соответствующей механизму главного толчка и основных форшоков, а также сдвиговые динамические напряжения и деформации в сейсмических волнах, излучаемых при подвижках в очагах рассматриваемой последовательности событий. Оценки показали, что значения динамических напряжений и деформаций, воздействующих на зоны гипоцентров основных форшоков и главного толчка со стороны более ранних событий, могли достигать величин $\sigma_d \sim 3$ МПа, деформация $\epsilon \sim 10^{-4}$ отн.ед.; вариации кулоновских напряжений достигали нескольких бар. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что вероятным триггером Камчатского мегасобытия явилась последовательность землетрясений, произошедших в течение последних 10 дней в окрестности ~ 50 км от гипоцентра основного толчка.

Ключевые слова: Камчатское мегаземлетрясение, землетрясение, очаг землетрясения, форшок, каскадный процесс, медленное скольжение, деформация, статическое напряжение, динамическое напряжение, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. О возможных триггерах Камчатского землетрясения 29.07.2025 г., M_w 8.8 // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 1–11. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_1

Введение

Процессы, приводящие к старту разрыва землетрясения, по сей день остаются загадкой для специалистов. Пространственно-временная локализация крупного сейсмического события определяется глобальными процессами эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) литосферы и трансформацией свойств локальных участков коры. Закономерности этих явлений в целом известны и составляют научную основу долгосрочных и среднесрочных прогнозов землетрясений [Соболев, Пономарев, 2003; Завьялов, 2006]. В то же время остается неясным, что именно инициирует разрыв и можно ли предвидеть время и место старта заранее по каким-либо признакам [Кочарян, 2021]. Хотя общепринято, что физические явления, определяющие подготовку крупного сейсмического события, происходят в обширной области с размером в несколько раз больше длины будущего разрыва [Добровольский, 2009].

Важными источниками информации о деформационных процессах, происходящих в окрестности будущего гипоцентра землетрясения, являются сейсмические и геодезические наблюдения, предшествующие главным толчкам.

Регистрация параметров сейсмических волн, измерения с помощью спутниковой радарной интерферометрии и глобальных спутниковых сетей позволяют с приемлемой точностью контролировать деформации дневной поверхности, определять места разрывов землетрясений, предшествующих

главному толчку, оценить их возможное воздействие на напряженно-деформированное состояние региона, т.е. на процесс подготовки основного события. Понятно, что на стадии оценок неизбежно приходится использовать те или иные, подчас дискуссионные, предположения и/или физические модели. Последовательности землетрясений, произошедших в некотором коротком пространственно-временном интервале перед более сильным землетрясением (главным толчком), обычно называют форшоками. Хотя прогностическая ценность форшоков довольно сомнительна (то или иное землетрясение относится к форшоковой последовательности лишь ретроспективно), эти события являются одним из немногих надежно регистрируемых явлений, «высвечивающих» разнообразные физические процессы, происходящие в очаговой области на заключительной стадии подготовки крупного землетрясения.

В предлагаемой статье приводятся результаты оценок возможного вклада статических и динамических деформаций, наведенных крупными форшоками, в инициирование Камчатского мегаземлетрясения 29.07.2025 г., M_w 8.8.

Механизмы, формирующие форшоковые последовательности

Разнообразные физические процессы, происходящие на заключительном этапе подготовки крупного землетрясения, определяют схемы/шаблоны пространственно-временного поведения форшоковых последовательностей, сопровождающих эти процессы [Martínez-Garzón, Poli, 2024; Peng, Lei, 2025]. Хотя большинство авторов сходится во мнении, что форшоки являются скорее побочным результатом изменения напряженно-деформированного состояния разломной зоны, они, в свою очередь, могут оказаться важным фактором инициирования последующих, возможно, более крупных событий. И хотя роль форшоков в процессе инициирования признается сейсмологами, однако, на наш взгляд, она явно недооценена.

Анализ сейсмологических и геодезических данных демонстрирует своеобразие подготовительного периода каждого крупного землетрясения. Вариации касательного напряжения в будущей области нуклеации главного толчка могут быть следствием эпизодов медленного скольжения, изменения статического поля напряжений в результате косейсмической или постсейсмической подвижки в очагах форшоков, динамического инициирования сейсмическими волнами, изменения порового давления в результате перетоков флюида и т.д. Пространственные и временные масштабы, в которых может протекать/развиваться каждый из этих процессов, зависят от большого числа факторов: гетерогенности разлома, его геометрии, свойств геоматериала, сегментации и т.д.

Более 98% форшоков регистрируются в диапазоне расстояний до 50 км от главного толчка [Bouchon et al., 2013]. Существует несколько вариантов дифференциации типов форшоковых последовательностей по их сейсмическим проявлениям (например, [Peng, Lei, 2025]). Хотя совместное действие нескольких факторов часто делают картину куда более сложной, по сравнению с применяемыми схемами, использование последних при анализе позволяет во многих случаях выявить процессы, доминирующие при инициировании в регионе крупных землетрясений.

Достаточно часто, особенно в континентальных областях, перед землетрясением не фиксируют ярких деформационных событий – ни сильных форшоков, ни выраженного предварительного скольжения, регистрируемого на поверхности (рис. 1а). Некоторые исследователи считают, что форшоки предшествуют всего 10–50% главных толчков. Хотя, вероятно, в ряде случаев отсутствие форшоков является артефактом: в последнее время такое отсутствие часто объясняют низкой чувствительностью сейсмических сетей и геодезических методов в большинстве регионов планеты [Mignan, 2014]. Иногда, когда не регистрируются выраженные форшоковые последовательности, может наблюдаться некоторое локальное увеличение сейсмической активности. Оно проявляется в виде серии мелких повторяющихся землетрясений (роя землетрясений), возникающих как следствие небольших событий медленного скольжения или локальных перетоков флюида, не регистрируемых инструментально (рис. 1б).

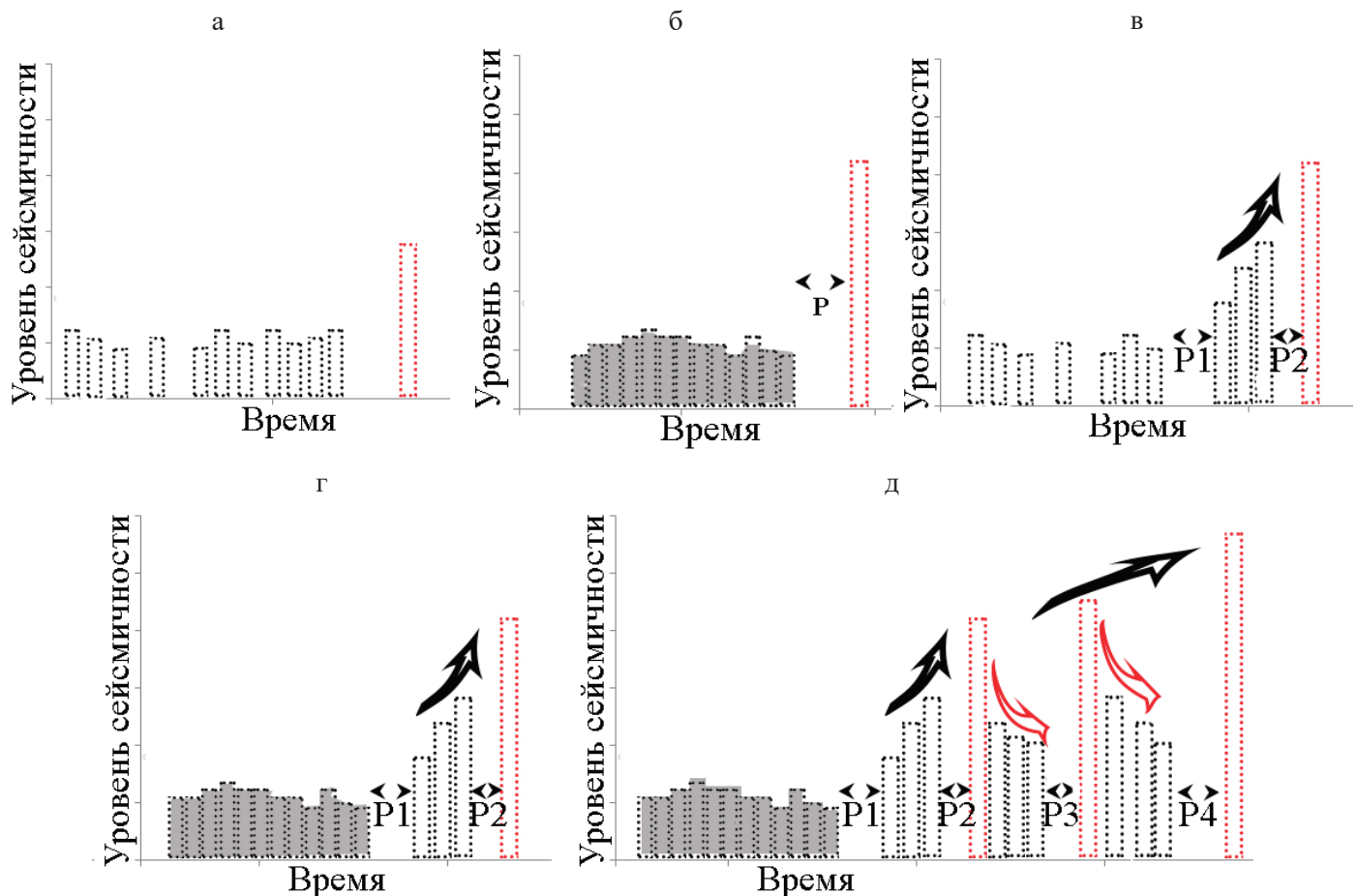


Рис. 1. Сценарии развития различных типов форшоков: а – отсутствие форшоков, б – рой землетрясений, предшествующий основному событию (выделен серым цветом), в – нарастающий уровень сейсмичности перед основным событием, г – рой землетрясений (выделен серым цветом) с последующим нарастанием уровня сейсмичности перед основным событием, д – форшоковая последовательность, состоящая из нескольких сильных землетрясений, каждое с собственными афтершоковыми сериями; форшоковую последовательность предваряет рой землетрясений (выделен серым цветом). Буквой Р отмечены интервалы времени, которые могут варьировать от нескольких секунд до дней и недель

Перед многими крупными межплитными землетрясениями регистрируют иной характер сейсмичности: последовательность относительно небольших землетрясений, иногда с увеличивающейся магнитудой и экспоненциально нарастающим перед главным толчком количеством событий в единицу времени (подсвечены черными стрелками на рис. 1в, г, д). Согласно [Bouchon et al., 2013], такая фаза увеличения скорости сейсмичности характерна, прежде всего, для межплитных землетрясений. Встречается этот сценарий и при внутриплитных землетрясениях, хотя довольно редко; чаще его наблюдают при лабораторных экспериментах. По аналогии с лабораторными экспериментами, можно предположить, что нарастающее количество форшоков инициируется асейсмическим скольжением, предвещающим динамический срыв (преслип). Иногда рой землетрясений заканчивается сейсмическим затишьем (интервал времени P1 на рис. 1г), после которого происходит экспоненциальное увеличение количества мелких событий, заканчивающееся главным толчком (рис. 1г).

Сценарий, представленный на рис. 1д, представляет собой гибридную схему всех описанных случаев. При этом весьма распространенным является вариант выраженных форшоковых последовательностей, состоящих из нескольких умеренных, а иногда и довольно сильных землетрясений (рис. 1д). При этом за каждым форшоком следуют их собственные афтершоки (подсвечены красными стрелками на рис. 1д), число которых со временем затухает в соответствии с законом Омори. Время между началом

выраженной последовательности форшоков и главным толчком обычно составляет от нескольких дней до нескольких недель. При реализации такой модели можно предположить влияние разрывов от близлежащих форшоков – статические и динамические каскадные изменения уровня упругих напряжений. Известны случаи инициирования и волнами от удаленных землетрясений (например, [Hill, Prejan, 2015; Кочарян, 2016]).

Для последовательностей форшоков роевого типа (рис. 1б, г, д, серая область) характерно наличие рассеянной сейсмичности малых и средних магнитуд, которая может иметь значительную длительность, без ярко выраженного события, предваряющего главный толчок. В некоторых случаях магнитуда событий в рое постепенно увеличивается перед главным толчком. Наиболее вероятным механизмом инициирования здесь является медленное асейсмическое скольжение (SSE, «преслип» или «афтерслип» от предыдущего крупного землетрясения). Возможным механизмом является также, поток флюидов, скорее всего инжектируемых с большой глубины. При этом распространение фронта порового давления может не только определять миграцию мелкой сейсмичности, но и инициировать главный толчок. В таком случае фронты роевой активности расширяются пропорционально \sqrt{t} [Shapiro et al., 1997] и охватывают широкую область.

Форшоковая активность может начинаться с событий роевого типа, которые могут длиться месяцами, как проявление событий медленного скольжения и/или перетоков флюида. В таких случаях непосредственно перед главным толчком наблюдается очевидный переход от сейсмичности роевого типа к выраженной последовательности сейсмических событий средних магнитуд, которая может включать один или несколько форшоков с их собственными афтершоками и сам главный толчок (рис. 1д).

Форшоки Камчатского землетрясения 29.07.2025 г., M_w 8.8

У берегов Южной части полуострова Камчатка 29.07.2025 г. в 23:24:50.086 (здесь и далее время и магнитуды будут указываться в единицах UTC по каталогу USGS <https://www.usgs.gov>) произошло сильнейшее в регионе за последние 73 года землетрясение магнитудой M_w 8.8. Это мегаземлетрясение предварялось выраженной серией форшоков, самый крупный из которых магнитудой M_w 7.4 произошел за 9 дней и 17 часов до главного толчка. Последовательность форшоков (табл. 1) достаточно очевидно стартовала 20.07.2025 г. с землетрясения M 5.0 (06:02:51).

Таблица 1.

Основные параметры последовательности форшоков, стартовавшей 20.07.2025 г. с землетрясения M 5.0. События с магнитудами $M > 5.5$ в районе эпицентра мегаземлетрясения M_w 8.8 (по каталогу USGS)

№	Дата	Время (UTC)	Широта	Долгота	Расст-е, км	Глубина, км	M	Тип магнитуды
1	20.07.2025	06:02:51.862	52.9166	160.7435	58	19.2	5.0	m_b
2	20.07.2025	06:28:17.860	52.9286	160.6233	55	23.0	6.6	m_{ww}
3	20.07.2025	06:49:04.327	52.8301	160.6816	48	34.0	7.4	m_{ww}
4	20.07.2025	06:56:03.710	52.6641	160.7552	40	10.0	5.6	m_b
5	20.07.2025	07:07:42.573	52.6981	160.8332	46	10.0	6.6	m_{ww}
6	20.07.2025	07:09:47.134	52.8415	161.0175	65	10.0	5.6	m_b
7	20.07.2025	07:12:58.030	52.7333	160.9824	57	10.0	5.7	m_b
8	20.07.2025	07:23:02.065	52.8915	160.7461	56	35.0	6.5	m_{ww}
9	20.07.2025	07:26:17.432	52.9657	161.0597	76	10.0	5.9	m_b
10	22.07.2025	01:59:28.404	52.4133	160.6453	29	12.3	6.0	m_{ww}
11	24.07.2025	22:37:27.147	53.0151	161.0626	80	14.0	6.0	m_{ww}
12	24.07.2025	22:39:24.305	52.9584	161.0863	77	10.0	5.8	M_b
M	29.07.2025	23:24:50.086	52.4948	160.2395	0	35.0	8.8	m_{ww}

В период с 01.01. по 20.07.2025 гг. средняя скорость накопления кумулятивного сейсмического момента в радиусе ~ 100 км от эпицентра будущего мегаземлетрясения оставалась примерно постоянной (рис. 2). Параметры наиболее крупных событий в последовательности форшоков приведены в табл. 1, а расположение их эпицентров показано на рис. 3. Выбраны события с магнитудами, превышающими 5.5; исключение составляет самое первое событие, зарегистрированное 20.07.2025 г. (это событие № 1, табл. 1), имеющее магнитуду $M_5.0$. Параметры землетрясений приведены по данным каталога USGS от 28.11.2025 г.

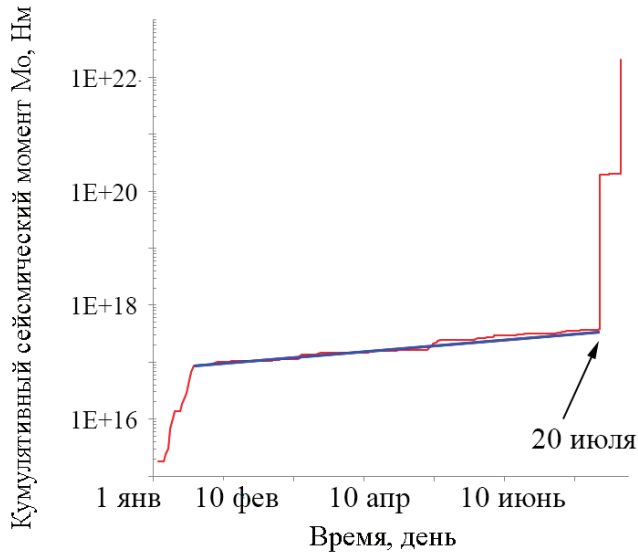


Рис. 2. Зависимость кумулятивного косейсмического момента от времени. Момент рассчитывался для событий, эпицентры которых расположены на расстоянии до 100 км от эпицентра главного толчка, начиная с 1.01.2025 г. Синяя прямая – соотношение $\lg M_0 = 0.004t + 16.8$, где M_0 – кумулятивный сейсмический момент, Н·м; t – время, день

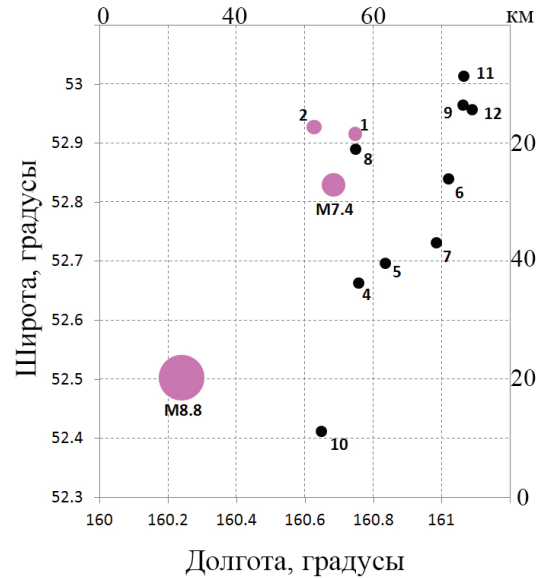


Рис. 3. Расположение крупнейших форшоков Камчатского землетрясения (номера событий соответствуют табл. 1). Розовым цветом отмечены эпицентры событий, для которых далее рассчитаны вариации кулоновских напряжений и сдвиговые динамические напряжения/деформации (рис. 5)

На рис. 4 показано изменение сейсмической активности в процессе подготовки основного толчка. После 20.07.2025 г. афтершоковый процесс крупнейшего форшока M_w 7.4 очевидно доминирует в районе. При этом нельзя исключить влияние постсейсмического скольжения на НДС в окрестности гипоцентра будущего землетрясения M_w 8.8. Картина форшоковой последовательности (рис. 4г) наилучшим образом соответствует схеме, представленной на рис. 1д, согласно которой вероятно сильное воздействие более ранних форшоков на напряженно-деформированное состояние в окрестности гипоцентров как более поздних форшоков, так и в окрестности гипоцентра основного события. В этой связи представляется целесообразным выполнить оценки квазистатических и динамических изменений НДС в результате подвижек в очагах некоторых форшоков.

Под квазистатическими изменениями напряженного состояния обычно подразумевают необратимые изменения поля напряжений, которые возникают в результате деформаций, вызванных дислокацией в очаге инициирующего события. Этот процесс часто описывают при помощи Кулоновского критерия разрушения: разрушение реализуется на некоторой площадке, когда функция Кулона $\sigma_c = \tau - \mu(\sigma_n - p)$ становится равной 0. Здесь τ – напряжение сдвига в плоскости разрушения, σ_n – нормальное напряжение, p – поровое давление и μ – коэффициент трения. Выражая нормальные и касательные напряжения через главные компоненты тензора напряжений σ_1 и σ_3 , действующие на площадку разлома, получают

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin 2\beta. \quad (2)$$

Отсюда максимальные Кулоновские напряжения достигаются на площадке разлома, ориентированного под углом β , где $\tan 2\beta = \frac{1}{\mu}$.

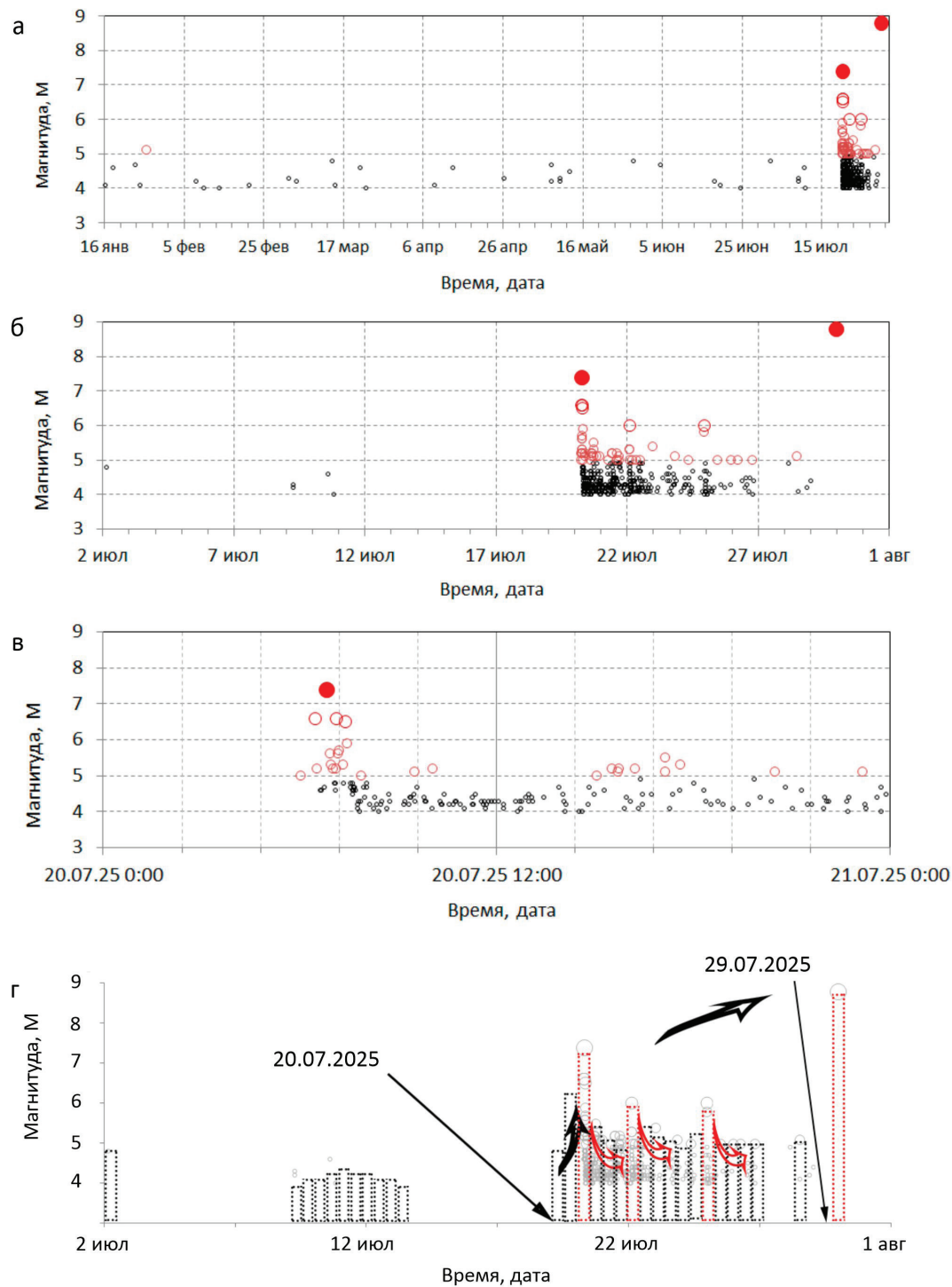


Рис. 4. Распределение магнитуд событий в форшоковой последовательности во времени в разных временных масштабах: а – полгода, б – один месяц, в – один день, г – схема развития сейсмических событий перед Камчатским мегаземлетрясением 2025 г. Фигурируют события, эпицентры которых находятся в радиусе не более 100 км от эпицентра мегасобытия $M_w 8.8$

Вариация Кулоновского напряжения $\Delta\sigma_c$ записывается в виде:

$$\Delta\sigma_c = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p), \quad (3)$$

где $\Delta\tau$ и $\Delta\sigma_n$ – изменение касательного и нормального напряжения на плоскости разлома определенной ориентации, Δp – изменение порового давления, а μ – коэффициент трения. Такая оценка позволяет вычислить изменения сдвиговых и нормальных напряжений в окрестности инициирующего очага, не требуя сведений о фоновом напряженном состоянии, так что ее используют для оценки изменений поля статических напряжений, вызванных землетрясением. Согласно «Кулоновской теории инициирования» [King et al., 1994], в тех областях, где вариация Кулоновского напряжения положительна ($\Delta\sigma_c > 0$), разлом подводится ближе к критическому состоянию; в областях отрицательного изменения Кулоновского напряжения ($\Delta\sigma_c < 0$) состояние разлома становится более стабильным.

Другим видом триггера являются динамические напряжения, распространяющиеся в виде сейсмических волн. Наиболее обоснованными, пожалуй, являются модели, в которых эффект основан на изменении напряженного состояния контакта в фазах растяжения и сжатия динамического импульса. Появившиеся в ряде публикаций сведения о том, что время возникновения инициированных слабых сейсмических событий коррелирует с фазами растяжения в поверхностной волне [Hill, Prejan, 2015], косвенно свидетельствуют о возможности реализации подобного сценария. Для объяснения эффекта «задержки» динамического срыва по отношению к моменту прохождения сейсмических колебаний, предложен ряд моделей, основывающихся на нелинейных эффектах трения и возможности инициирования колебаниями процесса «медленного скольжения» по разлому [Кочарян, 2016]. Уровень деформаций $\sim 5 \cdot 10^{-7} - 10^{-6}$ во многих исследованиях указывается как минимально необходимый для инициирования. Для оценки уровня динамических деформаций/напряжений на различных расстояниях от очага форшока мы использовали эмпирическую зависимость максимальной скорости колебаний V_m от расстояния до гипоцентра [Gomberg et al., 2006; Кочарян, 2016]:

$$V_m = 81 / (0.9 + R/D)^2, \quad (4)$$

где расстояние R нормировано на длину разрыва, а V_m измеряется в см/с. Динамические сдвиговые напряжения σ_d и деформации ε_d при этом рассчитываются по обычным соотношениям для плоской волны:

$$\sigma_d = \rho \cdot C_s \cdot V_m; \quad \varepsilon_d = V_m / C_s, \quad (5)$$

где ρ и C_s , соответственно, плотность и скорость распространения поперечных волн.

На рис. 5а, б приведены вариации Кулоновских напряжений и сдвиговые динамические напряжения, воздействующие на гипоцентральную область события M_w 6.6 (№ 2, табл. 1) в результате подвижки в очаге форшока M_w 5 (№ 1, табл. 1) – первого значимого события в последовательности. На рисунках отмечено расположение гипоцентров форшоков №№ 1 и 2. На рис. 5в, г приведены результаты расчета для форшока № 2 (на область события M_w 7.4) и, наконец, на рис. 5д, е – результаты расчета вариации Кулоновских напряжений $\Delta\sigma_c$ и сдвиговые динамические напряжения σ_d и деформации ε_d от воздействия сильнейшего форшока M_w 7.4 (№ 3, табл. 1) на, соответственно, область гипоцентра основного события M_w 8.8.

Как видно из результатов расчета, гипоцентры всех землетрясений располагаются в областях положительных значений $\Delta\sigma_c$ от предвещающих событий (рис. 5а, в, д). Причем, величина этих вариаций заметна и составляет несколько бар (десятые доли МПа). Только на рис. 5д для наглядности шкала перенасыщена: в максимуме значения достигают 15 бар (1.5 МПа). Напомним, что достаточным для инициирования может оказаться изменение в 0.1–0.3 МПа [Toda et al., 1998].

Еще более впечатляющими оказываются расчеты динамических напряжений в области гипоцентра основного толчка (рис. 5б, г, е). Величина динамических напряжений достигает здесь значений около $\sigma_d \sim 3$ МПа (деформация $\varepsilon \sim 10^{-4}$). Достаточно интенсивным динамическое воздействие от предвещающих событий оказывается и в окрестности гипоцентров форшоков №№ 2 и 3.

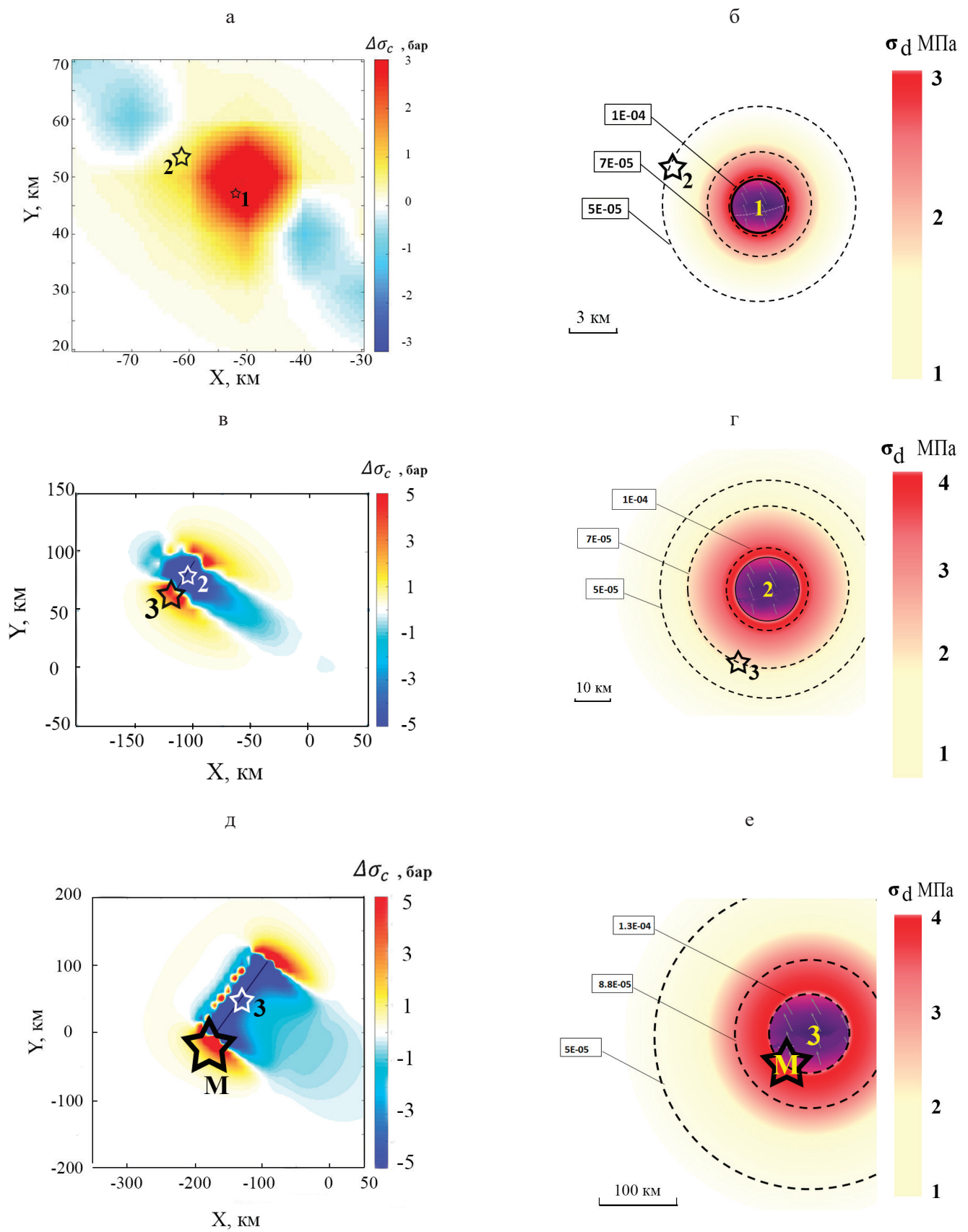


Рис. 5. Вариации кулоновских напряжений (а, в, д) и сдвиговые динамические напряжения/деформации в сейсмической волне (б, г, е). Шкала напряжений представлена в цвете, уровень деформаций отмечен пунктирными контурами и соответствующими им значениями

Обсуждение и выводы

Инициирование крупного землетрясения происходит вследствие сравнительно быстрого изменения параметров напряженно-деформированного состояния большой «подготовленной» области разлома достаточной длины – зоны нуклеации землетрясения [Scholz, 2019]. По-видимому, существует всего лишь несколько физических явлений, способных инициировать динамический разрыв.

Во-первых, это асейсмическое скольжение (слип) вдоль крупных областей разломных зон по соседству с будущим гипоцентром землетрясения. Физический механизм слипа может быть различным – события медленного скольжения (медленные землетрясения), эпизоды крипа, постсейсмические подвижки в очагах близлежащих землетрясений. Примеров таких эпизодов довольно много, прежде всего в зонах субдукции [Martínez-Garzón, Poli, 2024]. Реже они происходят в зонах трансформных разломов. Асейсмическое скольжение проявляется в виде миграции очагов мелких и средних землетрясений и в виде повторных землетрясений. Эти явления регистрируются методами космической геодезии, спутниковой интерферометрии и др.

Вторым фактором является прямое «мгновенное» квазистатическое изменение НДС на участке разлома в результате подвижки в очаге близлежащего форшока.

Третий фактор – динамическое воздействие на зону разлома сейсмическими колебаниями от форшоков или от удаленных крупных землетрясений.

Четвертое явление – изменение порового давления в результате перетоков флюида, связанных с изменением эффективной проницаемости разломной зоны под действием вариаций квазистатических и/или динамических напряжений.

Взаимодействие перечисленных факторов определяет сценарий развития конкретного землетрясения. Оценки характерного времени и масштабов такого взаимодействия могут быть выполнены, но эта задача выходит за рамки данной статьи.

В представленной работе мы провели предварительные расчеты величин вариаций поля кулоновских напряжений на плоскости, соответствующей механизму главного толчка и основных форшоков. Были рассчитаны также сдвиговые динамические напряжения/деформации в сейсмических волнах, излучаемых при подвижках в очагах рассматриваемой последовательности событий. Простота одномерной постановки расчета позволила без сложных вычислений оценить порядки величин вариаций НДС для того, чтобы понять, возможна ли реализация каскадного взаимодействия в последовательности событий, приведших к Камчатскому мегаземлетрясению.

Как показали оценки, значения динамических напряжений и деформаций, воздействующих на зоны гипоцентров основных форшоков и главного толчка со стороны более ранних событий, могли достигать величин $\sigma_d \sim 3$ МПа, деформация $\epsilon \sim 10^{-4}$ отн.ед. Довольно велики и вариации кулоновских напряжений. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что вероятным триггером Камчатского мегасобытия явилась последовательность землетрясений, произошедших в течение последних 10 дней в окрестности ~ 50 км от гипоцентра основного толчка.

Извечная проблема динамического инициирования – задержка по времени между воздействием и землетрясением. Этот эффект может быть связан с эффектом медленной постдинамической подвижки после прохождения сейсмической волны вплоть до потери устойчивости. Такой механизм рассмотрен в монографии [Кочарян, 2016]. Второе возможное объяснение – декольматация трещин в глубоких участках разлома с высоким избыточным давлением флюида, возникающая под воздействием сейсмических волн от форшока. Диффузия давления с нижних горизонтов требует значительного времени [Shapiro et al., 1997].

Можно предполагать, что детальная обработка данных геодезии и интерферометрии даст возможность выявить перемещения в зоне гипоцентра в период с 20.07 по 30.07.2025 г., либо убедиться в отсутствии таковых, что позволит более обоснованно судить о механизмах инициирования Камчатского землетрясения 29.07.2025 г.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 125012700824-4 – основная концепция, 125012200570-5 – расчеты).

Список литературы

- Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2009. – 240 с. <https://www.elibrary.ru/muwscf>
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М. : Наука, 2006. – 254 с.
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 432 с.
- Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М. : Наука. 2003. – 270 с.
- Bouchon M., Durand V., Marsan D., Karabulut H., Schmittbuhl J. The long precursory phase of most large interplate earthquakes // Nat. Geosci. 2013. Vol. 6 (4). P. 299–302. <https://doi.org/10.1038/ngeo1770>
- Gomberg J., Felzer K., Brodsky E. Earthquake Dynamic Triggering and Ground Motion Scaling: Proc. of 4th International Workshop on Statistical Seismology. 2006. P. 45–51.
- Hill D.P., Prejean S.G. Dynamic Triggering. Treatise on Geophysics / Ed. Schubert G. 2015. P. 273–304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00078-6>.
- King G.C.P., Stein R.S., Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes // BSSA. 1994. Vol. 84. P. 935–953. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>
- Martínez-Garzón P., Poli P. Cascade and pre-slip models oversimplify the complexity of earthquake preparation in nature // Commun Earth Environ. 2024. Vol. 5 (120). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01285-y>
- Mignan A. The debate on the prognostic value of earthquake foreshocks: A meta-analysis // Scientific Reports. 2014. Vol. 4 (1). P. 4099. <https://doi.org/10.1038/srep04099>
- Peng Z., Lei X. Physical mechanisms of earthquake nucleation and foreshocks: Cascade triggering, aseismic slip, or fluid flows? // Earthquake Research Advances. 2025. Vol. 5 (2). P. 100349. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2024.100349>
- Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge: Cambridge University Press. 2019. – 512 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>
- Shapiro S.A., Huenges E., Borm G. Estimating the crust permeability from fluid- injection-induced seismic emission at the KTB site // Geophys. J. Int. 1997. Vol. 131 (2). P. F15–F18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01215.x>
- Toda S., Stein R.S., Reasonberg P.A., Dieterich J.H., Yoshida A. Stress transferred by the 1995 $M_w = 6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 24543–24565. <https://doi.org/10.1029/98JB00765>

POSSIBLE TRIGGERS OF THE GREAT KAMCHATKA EARTHQUAKE 29.07.2025, M_w 8.8

© 2025 G. G. Kocharyan, S. B. Kishkina*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: KishkinaS@idg.ras.ru*

Seismic and geodetic observations preceding major earthquakes are important sources of information about the deformation processes occurring in the vicinity of the future earthquake hypocenter. The article presents the results of estimates of the possible contribution of static and dynamic deformations induced by large foreshocks to the initiation of the Kamchatka great earthquake on 07/29/2025, M_w 8.8. The results of calculating the values of variations in the Coulomb stress field on the plane corresponding to the mechanism of the main shock and main foreshocks, as well as shear dynamic stresses and deformations in seismic waves emitted during movements in the foci of the considered sequence of events, are presented. The estimates showed that the values of dynamic stresses and deformations affecting the hypocenter zones of the main foreshocks and the main shock from earlier events could reach values $\sigma_d \sim 3$ MPa, deformation $\varepsilon \sim 10^{-4}$; variations in Coulomb stresses reached several bars. The calculation results indicate that the likely trigger of the Kamchatka great event was a sequence of earthquakes that occurred over the past 10 days in the vicinity of ~ 50 km from the hypocenter of the main shock.

Keywords: great Kamchatka earthquake, rupture, foreshocks, cascade triggering, aseismic slip, triggered earthquake, deformation, static stress, dynamic stress.