УДК 550.34+550.341+550.343

# Развитие сейсмического процесса в очаге Камчатского мегаземлетрясения 2025 г. и прогноз опасности для юго-восточного побережья Камчатки последующих сейсмических событий

А.В. Соломатин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
*alf55@mail.ru*

На основе детального каталога землетрясений Камчатского филиала ЕГС РАН изучен очаг мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. с $M$ = 8.8. Показано, что его положение и границы практически совпадают с очагом катастрофического события 1952 г., что подтверждает представления С.А. Федотова о сегментации Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. С помощью метода ячеек Вороного проведена предельная детализация плотности эпицентрального поля афтершоков. Выявлены временные вариации пространственной плотности сейсмичности и роль глубинных флюидов, поступающих по трансформным разломам. Развита концепция информационной определенности для анализа динамики спектральных характеристик сейсмического процесса. Обсуждаются возможности долгосрочного прогноза опасных событий на юго-восточном побережье Камчатки.

# Development of the Seismic Process in the Source Zone of the 2025 Kamchatka Megathrust Earthquake and Hazard Forecast for Subsequent Seismic Events on the Southeastern Coast of Kamchatka

Alexey V. Solomatin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

Based on a detailed earthquake catalog from the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of RAS, the source of the megathrust earthquake of July 29, 2025 ($M$ = 8.8) has been studied. Its location and boundaries are shown to nearly coincide with those of the 1952 catastrophic event, confirming S.A. Fedotov's concept of segmentation of the Kuril–Kamchatka seismogenic zone. Using the Voronoi tessellation method, we achieved an extreme detail of the density of the aftershock epicentral field. Temporal variations in spatial seismicity density and the role of deep fluids supplied through transform faults were revealed. The concept of informational determinacy was extended to analyze the dynamics of spectral characteristics of the seismic process. Implications for long-term hazard forecasting on the southeastern coast of Kamchatka are discussed.

## Введение

Очаг землетрясения 29.07.2025 г. с $M$ = 8.8 на Камчатке, в подтверждение идеи академика С.А. Федотова о сегментации Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, практически совпал с очагом мегаземлетрясения 1952 г. Хотя это событие 2025 г. произошло на 7 лет раньше расчетного срока наступления III стадии сейсмического цикла согласно базовым положениям метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП), ускоренный темп накопления сейсмической энергии, отмеченный еще в [1], обеспечил достижение порогового уровня именно к этому времени.

Близость эпицентров и совпадение границ очагов мегаземлетрясений 1952 и 2025 гг., а также анализ характера развития афтершокового процесса последнего из них, позволили сделать выводы о значимом влиянии на сейсмический режим глубинных флюидов и трансформных разломов. Последние не только определяют поперечную сегментацию очага 2025 г., но и служат проводниками флюидной компоненты.

Цель настоящей работы − детальное изучение пространственно-временной структуры афтершокового процесса данного события и оценка возможности уточнения таким образом долгосрочного прогноза сейсмической опасности на юго-восточном побережье Камчатки. Основу методологического подхода составляет предельная детализация плотности эпицентрального поля на основе построения ячеек Вороного для него, а также применение концепции информационной определенности.

**Материалы и методика их обработка**

Выборка составлена по региональному каталогу Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за афтершоковый период с 29.07.2025 по 28.08.2026. Для полноты каталога нижний порог ограничен $K = 9$, а пропуски слабых событий скорректированы переходом к обобщенному энергетическому классу [2]. Пространственные границы (48–56° с.ш., 150–164° в.д.) расширены для надежного оконтуривания афтершоков; редкие внешние события не вносят значимых искажений в оценки. Глубины не ограничивались, поскольку анализ в эпицентральной проекции корректен для выделения долговременных структур.

Для оценки плотности эпицентров построена диаграмма Вороного; плотность в каждой точке обратно пропорциональна площади соответствующей ячейки. С использованием графика повторяемости (наклон 0.5 по шкале $K^F$) и нормировки по времени эта плотность условно переведена в параметр $Lg(A_{10})$ – переход условен из-за несопоставимости локальных и площадных оценок в неоднородном поле.

Как и в предшествующих работах [3], использовалась информационная определенность временных вариаций исследуемых параметров. Развитие этого подхода в настоящей работе заключается в анализе не самих значений параметров, а разностей их последовательных значений.

Вторая ключевая особенность выбранной методики – максимально детальный анализ временного процесса кластеризации сейсмических событий. Для этого введены следующие гипотезы: (1) единый характер развития процесса, определяемый внешними факторами; (2) постоянство локализаций сейсмических активизаций как отражение флюидной инжекции на пересечениях разломов. В рамках модели фонового процесса локальные активизации, как показано далее, контролируются преимущественно флюидной составляющей.

**Обработка данных и получение графических материалов для анализа**

В соответствии с указанными выше методиками были получены: максимально детальная карта логарифма параметра $A_{10}$ (рис. 1), а также временные ряды величин параметров $F \sim 1/S$ и $K$. Первый из этих параметров определяет уровень кластерной активностина основе $S$ – области окружающих текущее событие соседними, произошедшими в течение всего времени используемой выборки. Кластер подобных областей и формирует, как правило, локальные активизации. Второй из этих параметров определяет величины сейсмических событий на основе шкалы $K^F$.

Как было отмечено выше, в настоящей работе для анализа использовались спектры разностей последовательных по времени величин указанных параметров: $P(F_i - F_{i-1})$ и $P(K_i - K_{i-1})$, где $i$ – номер текущего события в общей временной выборке $1 \ldots N$. Тем не менее, вариации спектра этих разностей анализировался в соответствии с общей концепцией информационной определенности [3], рис. 2. Промежутки времени между последовательными событиями не учитывались, т.к. использовалась достаточно распространенная пособытийная интерпретация временного хода.

Выгода указанного подхода на основе предварительного построения разностей и линеаризации их спектра состоит как в исключении тяжелых хвостов вариаций

используемых параметров, так и в существенном подавлении их длительных трендов, в частности простой линейный тренд будет исключен полностью.

Второй важной особенностью исследования является преобразование исходных параметров к единому виду – информационной определенности [3], что дает простую возможность оценки нормированной кластеризации на основе вычета из оценки активности подвижек общей активности.

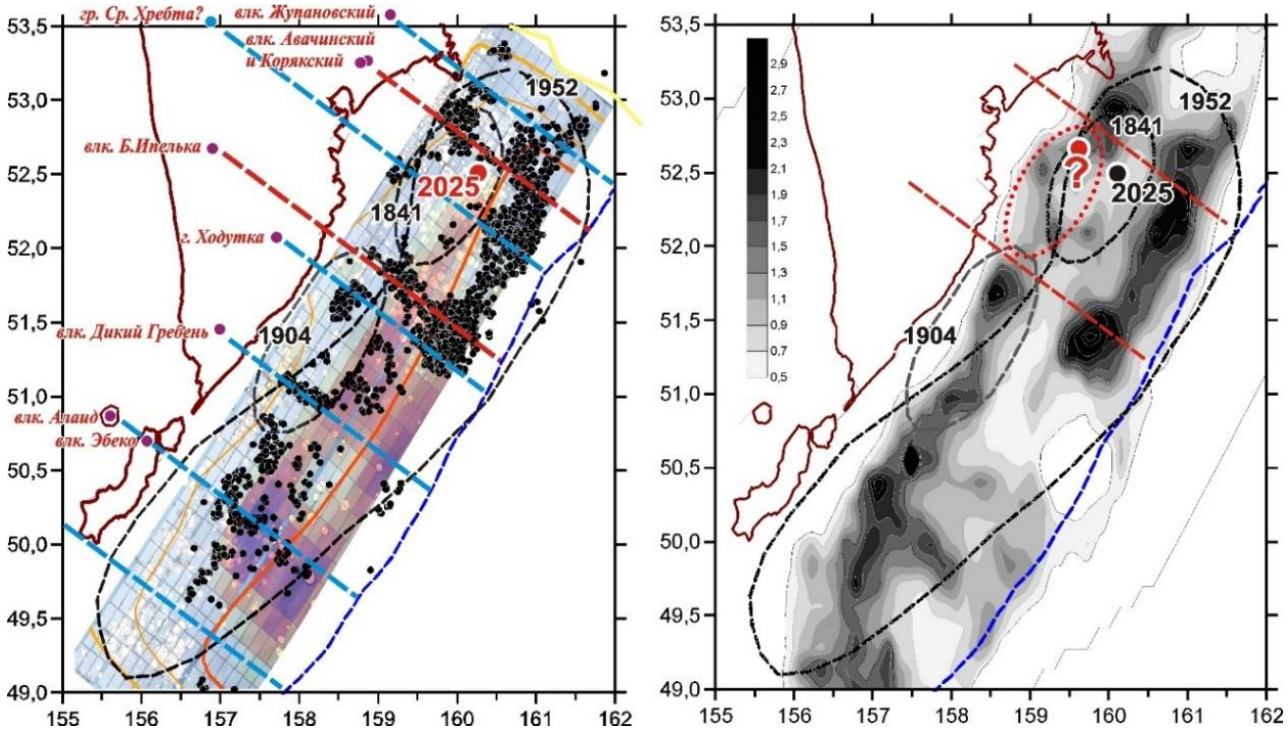



*Рисунок 1 – Эпицентры, представляющие наибольшую плотность сейсмических активизаций за первые пять месяцев афтершокового процесса мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. (слева) и карта плотности $Lg(A_{10})$ для него по 28 августа 2026 г. (справа). На левом рисунке представлена карта подвижек в магистральном разрыве по данным NEIC (максимальные до 40 м. – темные области). Представлены граница очага предыдущего мегаземлетрясения в 1952 г., а также границы очагов сильнейших землетрясений 1841 и 1904 гг. Синей пунктирной линией указано положение глубоководного желоба, а голубые и красные пунктиры маркируют положение гипотетических трансформных разломов. На правом рисунке указана также сейсмическая брешь, оставшаяся после мегаземлетрясения 2025 г.*

Прежде всего заметим, что обе оценки активности подобны за исключением отдельных временных периодов, что неудивительно, т.к. они, по-видимому, в существенной мере определяются общими геодинамическими условиями. Тем не менее, в отдельные периоды они ведут себя по-разному. Можно предположить, что именно в это время проявляется действие флюидной компоненты.

Анализ активности сейсмических подвижек на основе параметра *K* (рис. 2) указывает на 3–4-часовую задержку начала релаксации области главной подвижки после главного события. В этот период общая активность сейсмических подвижек проявляется аномальными по величине событиями, но при этом в информационном представлении – без учета этих аномалий близка к среднему уровню.

Затем релаксационный процесс резко начинает активизироваться в целом, достигая максимума за первые 5–6 суток и оформляя в этот период общую зону афтершокового процесса. При этом в первые сутки (~22 часа) степень кластеризации резко понижается, т.к. процесс расширения области релаксации захватывает зоны вне потенциальных центров инжекции флюидов.

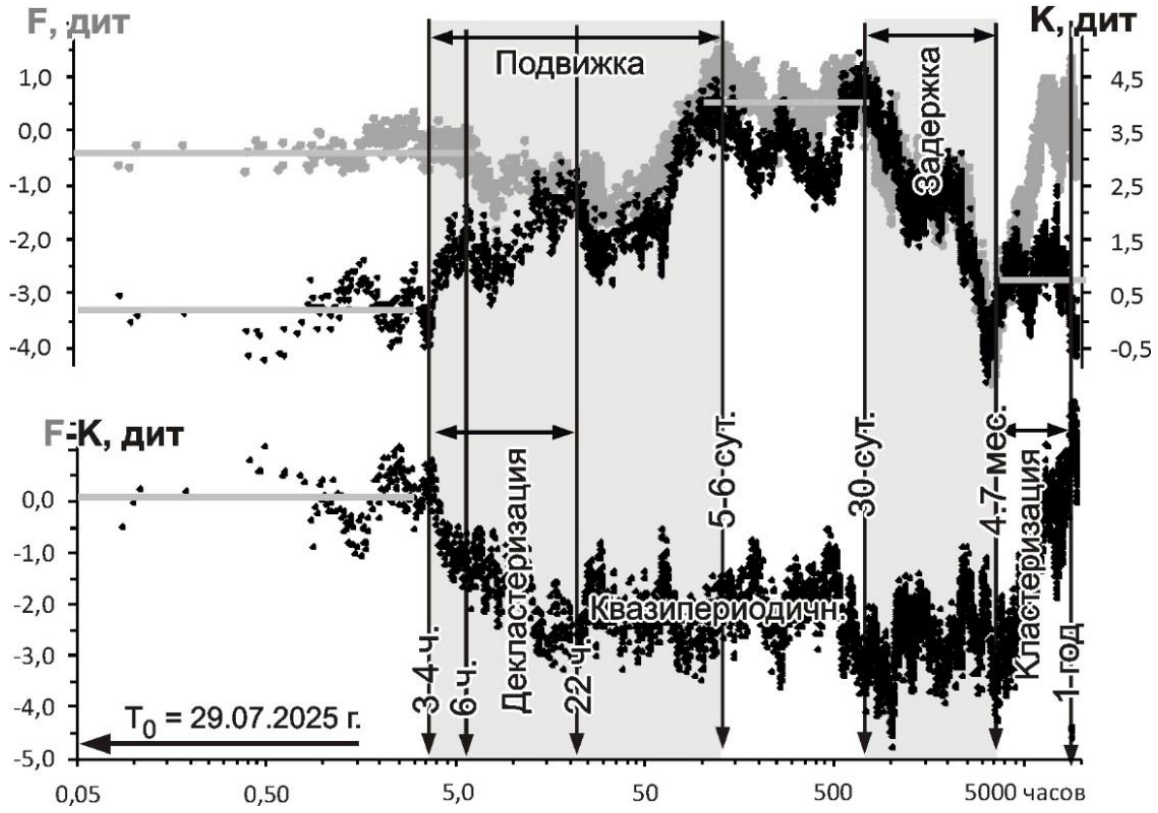



*Рисунок 2 – Анализ развития сейсмического процесса на основе параметров F (уровень кластерной активности, серые точки), K (уровень общей активности, черные точки) – верхние графики, а также разностей этих параметров (степень кластеризации) – нижний график. Подробности в тексте*

После первых суток афтершоков процесс кластерной-флюидной активности держится примерно на постоянном низком уровне с периодическими колебаниями возле него, но критически растет через 4–5 месяцев после главного события. В этот период существенно активизируются центры инжекции флюидов. Достаточно характерно, что за 3–4 месяца до этого наблюдалась существенная задержка в развитии афтершокового процесса, связанная с перераспределением напряжений после землетрясения с $M$ = 7.8, произошедшего 18 сентября 2025 г. вблизи северо-восточной границы очага мегаземлетрясения 29 июля.

**Заключение и выводы**

Представленные динамические и флюидодинамические оценки развития геосреды в области афтершокового процесса требуют дальнейшего исследования и уточнения по мере накопления данных. Тем не менее, полученные результаты позволяют сформулировать логичные и содержательные выводы, в целом подтверждающие перспективность использованного информационного подхода.

Ключевым результатом работы является обоснование триггерной природы развития афтершокового процесса, наиболее вероятным механизмом которой служит механизм инжекции и распространения глубинных флюидов. При этом идентифицированы конкретные реперные точки этих триггерных эффектов.

В целом, даже без привлечения детальной динамической модели, построенной в настоящей работе, полученные данные убедительно демонстрируют, что развитые в ней методы анализа на основе информационной определенности позволяют выделять устойчивые пространственно-временные закономерности, значимые для последующего мониторинга и оценки сейсмической опасности в районе юго-восточного побережья Камчатки.

Особое внимание следует уделить сейсмической бреши в районе Авачинского залива, оставшейся после мегаземлетрясения 2025 г. Как показывает сравнение сейсмических эффектов Камчатских мегаземлетрясений 1952 и 2025 гг. с одной стороны и значительно меньшего по величине Олюторского землетрясения 1959 г. в прибрежной зоне – с другой, именно близкие, пусть и не самые мощные землетрясения представляют максимальную угрозу возникновения 8–9-балльных сотрясений на побережье.

*Исследование выполнено в рамках проекта FWME-2024-0007 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.*

**Список литературы**

1. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010 – VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение / *С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев* // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 3–27.

2. *Соломатин А.В.* Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67 –79.

3. *Соломатин А.В.* О сейсмическом прогнозе, связи сейсмических и геодинамических процессов и концепции информационной определенности // Вулканология и сейсмология. 2025. № 1. С. 78–91.