

**Анализ развития очага мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. и отклика на это событие региональных геофлюидных систем**

**Соломатин А.В.<sup>1</sup>, Кирюхин А.В.<sup>1,2</sup>, Поляков А.Ю.<sup>1</sup>, Лемзиков М.В.<sup>1</sup>, Бурнайкин Д.Н.<sup>3</sup>, Петроченко В.П.<sup>4</sup>, Рябинин Г.В.<sup>5</sup>, Демянчук Ю.В.<sup>1,5</sup>, Усачева О.О.<sup>1</sup>**

**Analysis of the source development of the mega-earthquake on July 29, 2025, and the response of regional geofluid systems to this event**

**Solomatina A.V., Kiryukhin A.V., Polyakov A.Yu., Lemzikov M.V., Burnaikin D.N., Petrochenko V.P., Ryabinin G.V., Demyanchuk Yu.V., Usacheva O.O.**

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

<sup>2</sup> ФГБУ «Кроноцкий государственный природный биосферный заповедник», г. Елизово

<sup>3</sup> АО «Тепло Земли», п. Термальный, Камчатский край

<sup>4</sup> АО «Быстринская горная компания», г. Петропавловск-Камчатский

<sup>5</sup> Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

Землетрясение 29.07.2025 г. с  $M=8.8$  на Камчатке вызвало отклик региональных геофлюидных систем: падение уровней и дебита геотермальных скважин, аномалии режима гейзеров, активизацию, включая извержения, некоторых вулканов. Эти эффекты согласуются с моделью очага, спутниковыми данными и отражают эффект растяжения верхних слоев земной коры.

**Введение**

В рамках данной работы структура региональных сейсмогенных разломов в Камчатском участке зоны субдукции рассматривается как развитие клавишной модели [6] с дополнительным учетом трансформных нарушений сплошности погружающейся океанической плиты (слэба), которые, в свою очередь, могут служить каналами для транспорта геофлюидных фаз.

Наряду с указанной генеральной продольно-поперечной структурой, в сейсмогенной зоне под воздействием относительно кратковременных факторов различной природы формируются и более сложные формы дислокаций, трассируемые плоско-ориентированными кластерами сейсмических событий [1, 5]. Последние связываются с формированием областей понижения эффективных напряжений, вплоть до условий гидроразрыва вмещающих горных пород и потенциально возможной инъекцией геофлюидных фаз.

Камчатское мегаземлетрясение 2025 г., существенно изменив структуру поля напряжений как на заключительном этапе подготовки главного разрыва, так и в ходе его косейсмической и постсейсмической реализации, оказало значительное воздействие на региональные геофлюидные системы различной природы. В настоящей работе в качестве таких геофлюидных систем рассматриваются: (1) региональные сейсмогенные разломы; (2) гидротермальные и гидрогеологические резервуары; (3) магматические питающие системы активных вулканов.

**Анализ развития афтершокового процесса в очаге 29 июля 2025 г.**

Основным источником информации о геодинамике Камчатского участка сейсмогенной зоны Тихоокеанского пояса и, в частности, о сеймотектонических деформациях на этом участке, служат детальные сейсмологические данные Камчатского Филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической службы (КФ ФИЦ ЕГС) РАН. Важным дополнением к ним являются данные NEIC Геологической службы США на основе глобальной сети сейсмических станций GSN, в частности, в качестве источника эталонной информации о механизме очагов наиболее сильных землетрясений и развитии магистрального разрыва в них.

В этом разделе использованы данные каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН, отобранные на основе следующих параметров: период – [01.01.2025, 08.02.2026] гг.; координаты –

[48.0, 56.3]° с.ш. и [150.4, 163.8]° в.д.; энергетический класс –  $K_s=8.5$  и выше (до  $K_s=16.4$  – оценка в шкале энергетических классов магнитуды  $M=8.8$ ); глубины –  $H=0$  и глубже (в основном – до 110 км.).

Для определения пространственной плотности эпицентров землетрясений была построена двумерная диаграмма Вороного, размеры ячеек которой обратно пропорциональны плотности распределения их центров (в данном случае — эпицентров землетрясений использованной выборки).

Изучение эпицентрального поля афтершоков мегаземлетрясения 2025 г. (рисунок) позволяет сделать следующие выводы:

- в их распределении выделяются две полосы, параллельные простиранию сейсмогенной зоны, что согласуется с двухрядной системой очагов сильнейших землетрясений в регионе [3];

- детализация эпицентрального поля позволяет выделить также поперечные структуры (темно-красные поперечные пунктирные линии выделяют основные из них).

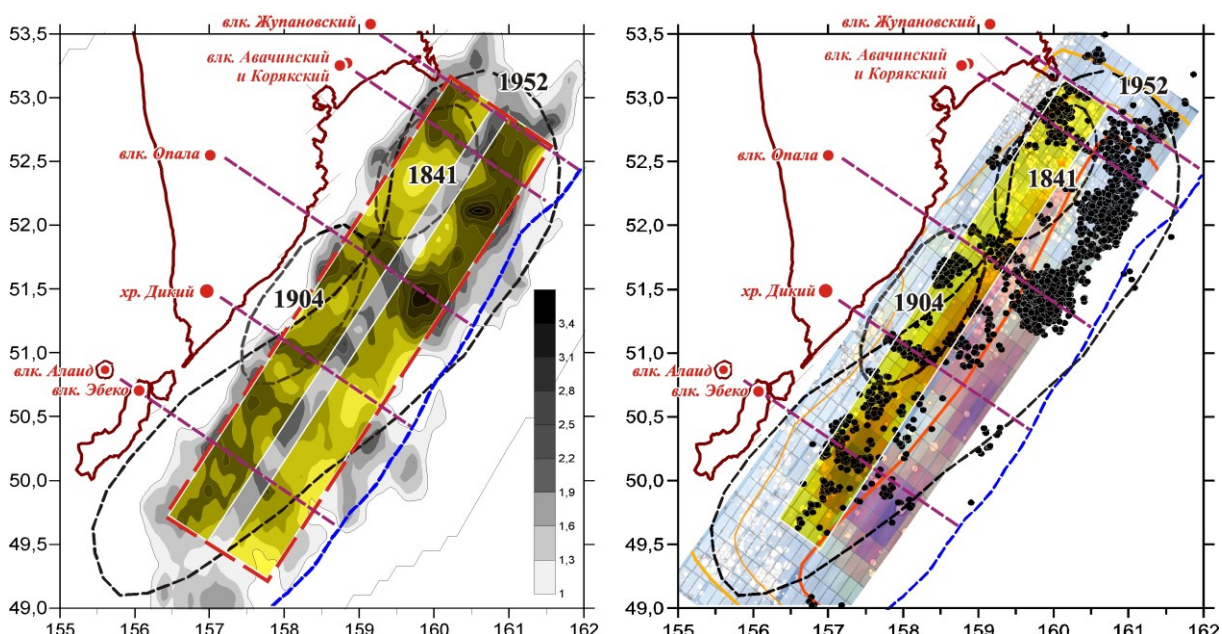


Рисунок. Представление логарифма плотности эпицентрального поля афтершоков мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. (слева) и распределение 2/3 эпицентров, образующих наиболее плотные кластеры (справа). Представлены граница очага предыдущего мегаземлетрясения в 1952 г., а также границы очагов сильнейших землетрясений 1841 и 1904 гг. [3]. На правом рисунке представлена карта подвижек в магистральном разрыве по данным NEIC (максимальные до 40 м – синие области). Желтые прямоугольники выделяют две наиболее активные полосы сейсмогенной зоны. Синей пунктирной линией указано положение глубоководного желоба.

Если первый вывод, хотя до сих пор, по-видимому, и не нашел отражения в геодинамической модели, достаточно тривиален, то второй заслуживает более детального рассмотрения здесь. Прежде всего, линии, определяющие выделенные поперечные структуры, прослеживаются далеко за наиболее активную часть сейсмогенной зоны вплоть до вулканических центров и даже до наиболее глубинных структур зоны (подобная связь отражена в [4]). Это свидетельствует в пользу гипотезы сечения погружающейся части океанической плиты трансформными разломами. Растяжение очередного из расчлененных таким образом ее сегментов вызывает одностороннюю миграцию (инжекцию) мантийных флюидов через указанные выше разломы в прилегающие и вышележащие слои сейсмогенной зоны. Как раз такая картина в виде односторонних (как правило) сейсмических активизаций наблюдается на рисунке (правая часть), причем в основном – в юго-западной области очага

землетрясения 29 июля 2025 г. (красный пунктирный прямоугольник в левой части рисунка). Именно в этом сегменте сейсмоактивной зоны и наблюдались максимальные подвижки магистрального разрыва.

Как будет показано ниже, эти и ряд других геофлюидных эффектов отражают процесс косейсмического и постсейсмического растяжения верхних слоев земной коры в полном согласии с моделью очага мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. по данным NEIC и спутниковым измерениям.

### **Изучение изменений системы сейсмогенных разломов в районе очаговой зоны землетрясения 29 июля 2025 г. после главного события в ней**

В исследовании использованы данные регионального каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН за период 01.01.1980–10.01.2026 гг. Они включают 16 249 событий с классом  $K_s \geq 9.5$ . Идентификация плоско-ориентированных кластеров гипоцентров землетрясений (гипотетические разрывы) проводилась с использованием программы Frac-Digger [1].

Расчеты позволили идентифицировать 133 указанных разрыва, из них у 87 отмечена активизация после землетрясения 29 июля 2025 г.: 24 показали наибольшую такую активизацию, 38 – среднюю и 25 – слабую.

Статистический анализ геометрических параметров показывает: – разломы с наибольшей афтершоковой активностью характеризуются преобладанием азимутов падения  $285\text{--}330^\circ$  и  $120\text{--}135^\circ$  и углами падения  $20\text{--}30^\circ$  и  $40\text{--}50^\circ$ ; разломы, не отразившие афтершоковую активность, имеют преобладающие азимуты падения  $240\text{--}300^\circ$  и углы падения  $50\text{--}60^\circ$ .

Геомеханическое сопоставление активизировавшихся и неактивизировавшихся в афтершоковый период разломов указывает на то, что направление максимального горизонтального напряжения  $SH_{max}$  после землетрясения 29 июля 2025 г. повернулось против часовой стрелки на  $10^\circ$ .

### **Гидрогеологические аномалии**

Аномальные изменения гидрогеологического режима зафиксированы на Кеткинском геотермальном месторождении: падение расхода до нуля в скважине К6, а также снижение расхода воды и давления в скважине К01. На Паратунском геотермальном месторождении: прекращение самоизлива на скважинах Т3, К63, К8. На Вилючинском геотермальном месторождении на скважине R27 зафиксировано прекращение сезонного самоизлива и падение уровня в скважине на 4.5 м.

В скважине ГК-1 (северо-восточная часть Кеткинского геотермального месторождения) в предыдущие периоды (после землетрясений 18 августа 2024 г. и 20 июля 2025 г. – удаленного и непосредственного форшоков землетрясения 29 июля 2025 г.) наблюдалось увеличение расхода и минерализации воды. После главного события отмечался противоположный эффект: резкое снижение расхода скважины и минерализации воды.

Гейзеры в Долине гейзеров и в Узонской кальдере (Большой, Великан, Грот и Шаман) во время землетрясения 29 июля 2025 г. не проявили явных изменений интервала между извержениями. Тем не менее, аномалии были отмечены в предшествующий период: с мая по август 2025 г. гейзер Большой «пропустил» как минимум 12 извержений; гейзер Грот прекратил извергаться за 3-4 месяца до него.

В районе золоторудного месторождения Кумроч в сентябре 2025 г. был зафиксирован гейзерный режим изливающейся скважины, из которой ранее разгружался лишь небольшой постоянный расход теплой воды.

Прецизионные наблюдения в пьезометрических скважинах Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона показали понижение уровня в скважинах ЮЗ-5 и 1303 на 4.8 и 5.8 м [2], наблюдавшееся после главного события, а также

косейсмическое снижение уровня воды в скважине Е-1. В самоизливающейся скважине М-1 отмечены колебания давления во время прохождения сейсмических волн, а также повышение электропроводности и температуры воды.

### **Аномалии в функционировании вулканических систем**

На Мутновском вулкане были зафиксированы повышенная сейсмическая активность и термальная аномалия (KVERT). Перед землетрясением 29 июля 2025 г. отмечены колебания парциального давления газа в системе сбора теплоносителя Мутновской ГеоЭС в пределах  $\pm 750$  Па в течение недели.

После землетрясения 29 июля 2025 г. активность вулкана Ключевской усилилась до эксплозивно-эффузивного извержения с выбросами пепла на высоту до 10 км и лавовыми потоками из вершинного кратера, произошли извержения вулканов Карымский и Крашенинникова, при этом последний более 600 лет был неактивен.

### **Основные выводы исследования**

В целом реакция геофлюидных систем Камчатки на мегаземлетрясение 2025 г. хорошо согласуется с опубликованным USGS механизмом его очага, а также с данными косейсмических смещений по GNSS и спутниковой радарной интерферометрии (InSAR). Наблюдаемые закономерности отражают проявление косейсмического и постсейсмического растяжения как в области генерации главного сейсмогенного разрыва, так и в всiachем блоке надвига (вплоть до приповерхностных структур Камчатского полуострова). Такое растяжение оказало существенное влияние на режим геофлюидных систем в зоне субдукции и территории Камчатки.

Исследование выполнено в рамках темы НИР FWME-2024-0007 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Авторы благодарят О.В. Бергаль-Кувикас за обсуждение результатов, В.В. Шевцова за наблюдения на скважине R27, А.П. Корчагину и Е.В. Черных за техническую поддержку.

### **Список литературы**

1. *Кириухин А.В., Федотов С.А., Кириухин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и возобновлением активности вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский на Камчатке в 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
2. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеодинамические эффекты в ближней и средней зонах очагов сильных землетрясений в июле-ноябре 2025 г. (по данным наблюдений в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIX ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 30 марта – 4 апреля 2026 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2026. С. 188-191.
3. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
4. *Федотов С.А., Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 – VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с  $M=7.7$ ,  $7.7$  и  $8.3$  // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 3-19.
5. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O. et al.* Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity // Geothermics. 2022. V. 105. Art. 102474. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102474>
6. *Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A.* Keyboard model of seismic cycle of great earthquakes in subduction zones: Simulation results and further generalization // Applied Sciences. 2021. V. 11. Is. 19. Art. 9350. <https://doi.org/10.3390/app11199350>