

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

Рег. N НИОКТР 124020900038-9

Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТПЗ РАН  
чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_  
П.Н. Шебалин  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ  
ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
(промежуточный, этап 2025 года)

Руководитель НИР,  
директор, гл. науч. сотр.,  
и.о. зав. лаб.,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_  
П.Н. Шебалин  
Подпись, дата

Москва 2025

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
директор, гл. науч. сотр., и.о. зав.  
лаб.  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Подпись, дата

П.Н. Шебалин  
(введение, разделы  
1-3, заключение)

### Исполнители темы

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

С.В. Баранов  
(разделы 1.1, 2.2, 2.4,  
2.5)

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.И. Горшков  
(разделы 1.2, 1.4)

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

В.Г. Кособоков  
(разделы 1.1, 1.3-1.5,  
2.1, 2.2, 3.1, 3.2)

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

Г.М. Молчан  
(раздел 2.3)

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

Подпись, дата

М.В. Родкин  
(разделы 3.1, 3.3, 3.5)

вед. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

И.А. Воробьева  
(разделы 1.1, 1.6, 2.2,  
2.4, 2.5)

вед. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

А.К. Некрасова  
(разделы 1.1, 1.4, 1.5,  
2.2, 3.1)

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

О.В. Гайдаленок  
(раздел 2.2)

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

О.В. Новикова  
(раздел 1.2)

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Подпись, дата

О.В. Селюцкая  
(раздел 1.1)

науч. сотр.

Подпись, дата

Т.В. Прохорова  
(раздел 3.5)

науч. сотр.

Подпись, дата

Т.А. Рукавишникова  
(раздел 3.5)

мл. науч.сотр.	Подпись, дата	Е.М. Греков (разделы 1.1, 2.2, 3.4)
мл. науч. сотр.	Подпись, дата	К.В. Крущельницкий (разделы 1.1, 2.2)
мл. науч.сотр.	Подпись, дата	П.А. Малютин (разделы 1.6, 2.2)
мл. науч.сотр.	Подпись, дата	А.П. Молокова (раздел 1.1)
мл. науч. сотр.	Подпись, дата	П.Д. Щепалина (раздел 1.1)
лаборант-исследователь	Подпись, дата	Д.А. Кревсун (раздел 1.5)
лаборант-исследователь	Подпись, дата	А.Д. Тверитнев (раздел 1.1)
лаборант-исследователь	Подпись, дата	М.Г. Федорова (раздел 2.2)
Нормоконтролер	Подпись, дата	О.В. Селюцкая

## **РЕФЕРАТ**

Отчет 71 с., 1 кн., 31 рис., 8 табл., 61 источн., 2 прил.

**ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ; СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК; СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ; МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНАЯ МАГНИТУДА, МОДЕЛИ СЕЙСМИЧНОСТИ; АФТЕРШОКИ; ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ; АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ; ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА; ВУЛКАНИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ, ИНДУЦИРОВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ**

Работы, проводимые по теме в 2025 году, включали: исследование и разработку новых подходов к оценке сейсмической опасности и риска, исследование и учет фактора времени в задачах оценки сейсмической опасности, исследование режимов сейсмичности в разных пространственных масштабах и в разных физических условиях. Особое внимание было уделено комплексному исследованию сильных землетрясений 2025 года, произошедшем 28 марта 2025 г. с магнитудой 7.7, в Мьянме и 29 июля 2025 г. с магнитудой 8.8 на Камчатке.

Результаты работ данной темы могут использоваться для целей совершенствования карт общего сейсмического районирования, в системе страхования и перестрахования от стихийных бедствий. Разрабатываемые в рамках подходы к оценке сейсмической опасности и риска будут полезны организациям, связанным с сейсмостойким строительством и местным органам исполнительной власти в сейсмоактивных регионах.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ Е.....	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ .....	10
1 Исследование и разработка новых подходов к оценке сейсмической опасности и риска..	10
1.1 Параметризация и моделирование сейсмического режима.....	10
1.2 Проблема определения мест будущих сильных землетрясений.....	13
1.3 Проблема оценки максимальной возможной магнитуды .....	15
1.4 Совместное применение подходов PREPA и USLE .....	16
1.5 ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье .....	18
1.6 Систематизация и стандартизация исходных данных .....	20
2 Исследование и учет фактора времени в задачах оценки сейсмической опасности .....	22
2.1 Эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8 .....	22
2.2 Прогноз землетрясения 28 марта 2025 г., M7.7, в Мьянме.....	26
2.3 Моделирование последовательности афтершоков.....	28
2.4 Прогнозы активности афтершоков в автоматизированной системе AFCAST .....	29
Землетрясение 28 марта 2025 г., M=7.7, в Мьянме .....	29
Землетрясение 29 июля 2025 г., M=8.8, на Камчатке .....	32
3 Исследование режимов сейсмичности в разных пространственных масштабах и в разных физических условиях .....	33
3.1 Динамика сейсмичности в области сильных землетрясений .....	33
3.2 Планетарное воздействие на глобальную сейсмичность.....	43
3.3 Обобщение описания форшоковых и афтершоковых последовательностей .....	46
3.4 Вулканическая сейсмичность .....	47
3.5 Индуцированная (вызванная) сейсмичность .....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	68

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

МСП	—	Метод среднего положения
MCP	—	Морфоструктурное районирование
МЧР	—	Магнитудно-частотное распределение
ОЗПЗ	—	Общий закон подобия для землетрясений
OOCЗ	—	Обобщенная окрестность сильного землетрясения
OCP	—	Общее сейсмическое районирование
AFCAST	—	Aftershock Hazard Assesment System (Автоматизированная система прогноза активности афтершоков)
ANSS ComCat	—	The ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (Каталог Американской геологической службы) <a href="https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/">https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/</a>
AVO	—	Alaska Volcano Observatory (Каталог вулканической обсерватории Аляски) <a href="https://avo.alaska.edu/">https://avo.alaska.edu/</a>
GEM	—	Global Earthquake Model <a href="https://www.globalquakemodel.org/">https://www.globalquakemodel.org/</a>
GSHAP	—	Global Seismic Hazard Assessment Program <a href="https://www.gfz.de/en/gshap">https://www.gfz.de/en/gshap</a>
NDSHA	—	Neodeterministic seismic hazard assessment (Неодетерминистская оценка сейсмической опасности)
PREPA	—	Pattern Recognition of Earthquake Prone Areas (Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений)
PSHA	—	Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Вероятностная оценка сейсмической опасности)
USLE	—	Unified Scaling Law for Earthquakes (Общий закон подобия для землетрясений)

## ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения остаются одним из самых катастрофических и недостаточно прогнозируемых природных явлений. Землетрясение 29 июля 2025 г. магнитудой 8.8 на Камчатке входит в десятку сильнейших землетрясений мира в XXI веке. Это землетрясение было ожидаемым в масштабе десятков лет. На Камчатке была реализована программа укрепления зданий, а новое строительство велось в строгом соответствии с нормами, определенными для зон высокой сейсмической опасности. В том числе именно благодаря этому в результате не было катастрофических разрушений и жертв. Тем не менее, ни краткосрочного, ни среднесрочного прогноза этого землетрясения не было. Надежных алгоритмов краткосрочного прогноза землетрясений в мире пока не существует, а точность и надежность методов долгосрочного и среднесрочного прогноза пока не достаточны для защиты населения и объектов инфраструктуры. В этих условиях естественным подходом к дальнейшему совершенствованию системы защиты населения от землетрясений и смежных природных явлений является **создание методов расчета и районирования опасности и риска природных катастрофических явлений с учетом фактора времени на основе моделирования сейсмического процесса**. Достижение этого результата позволит осуществить постепенный переход от действующих стационарных оценок сейсмической опасности, в которых не учитывается изменение сейсмической обстановки с течением времени, в том числе вследствие сильных землетрясений, к зависящим от времени оценкам сейсмической опасности. Это позволит также эффективно использовать риск-ориентированный подход к сокращению ущерба от землетрясений с целью экономии затрат на антисейсмические мероприятия.

В рамках работ по теме в 2025 году рассматривался широкий круг задач по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений.

Протестирована разработанная ранее в ИТПЗ РАН методика параметризации и моделирования сейсмического режима на примере анализа сейсмической обстановки перед землетрясениями 28 марта 2025 г.,  $M=7.7$ , в Мьянме и 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$ , на Камчатке.

Продолжены исследования по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе морфоструктурного районирования сейсмоопасных регионов с выделением морфоструктурных узлов в области пересечения линеаментов. Проведено определение мест возможного возникновения землетрясений магнитудой 6 и более на Сахалине.

Получена оценка сейсмической опасности с учётом максимальной потенциальной магнитуды в условиях Китайского сейсмического экспериментального полигона и для территории Италии.

Предложено совместное использование метода Распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений и Общего закона подобия для землетрясений в сейсмически активном регионе. Пилотное исследование выполнено для территорий Большого Кавказа, Алтай-Саяны и Прибайкалья.

Разработана Программа для ЭВМ для автоматического объединения двух каталогов событий с использованием модифицированного метода ближайшего соседа с последующей идентификацией и обработкой дублирующихся записей. Программа используется в научных исследованиях, связанных с анализом пространственно-временных данных в сейсмологических исследованиях. Её функционал ориентирован на решение задач интеграции разнородных каталогов событий, включая обработку сейсмических событий различных агентств и служб.

Продолжен эксперимент по прогнозу сильнейших землетрясений мира по алгоритму M8. Проведено исследование сильного землетрясения, произошедшего 28 марта 2025 г. в Мьянме на разломе Сагайн.

Продолжена автоматизированная оценка опасности афтершоков после сильных землетрясений мира. Проведены расчеты прогноза афтершоковой активности после землетрясения 28 марта 2025 г.,  $M=7.7$ , в Мьянме и после землетрясения 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$ , на Камчатке.

Продолжен анализ последовательностей сильных землетрясений с точки зрения их изменчивости и масштабных свойств, включая поведение контрольного параметра общего закона подобия землетрясений. Проведен анализ землетрясений на юге Аляски в 2016-2023 гг. Проанализирована сейсмичность вулкана Августина на Аляске в период перед извержением 2006-года.

Рассмотрены примеры вызванной сейсмичности в окрестности крупных водохранилищ и в областях добычи углеводородного и рудного сырья.

Теоретические и практические вопросы, рассмотренные в 2025 году в ходе выполнения работ по данной теме НИР, направлены на создание адекватных моделей сейсмического режима, разработку и развитие комплексных методик прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности.

Исследования по теме выполнялись в рамках Программы фундаментальных научных исследований, направление «Изучение и прогнозирование катастрофических явлений (землетрясения, извержения вулканов, цунами); оценки сейсмической, вулканической и цунами опасности».

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### **1 Исследование и разработка новых подходов к оценке сейсмической опасности и риска**

В 2025 г. была продолжена работа по данному разделу. Работа велась по целому ряду направлений: параметризация и моделирование сейсмического режима, проблема определения мест будущих сильных землетрясений, проблема оценки максимальной возможной магнитуды, решение отдельных задач оценки сейсмического риска, разработка методов верификации моделей сейсмического режима, анализ мировых тенденций в оценке сейсмической опасности, сравнительный анализ вероятностного, детерминистского подходов и их комбинации к оценке сейсмической опасности, решение вопросов систематизации исходных данных для исследований, параметры сейсмического поля.

#### **1.1 Параметризация и моделирование сейсмического режима**

В 2025 г. методика параметризации и моделирования сейсмического режима, разработанная ранее в ИТПЗ РАН была протестирована на примере анализа сейсмической обстановки перед землетрясениями 28 марта 2025 г.,  $M=7.7$ , в Мьянме и 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$ , на Камчатке.

Эпицентр землетрясения 28 марта 2025 г. в Мьянме оказался в зоне наименьших ожидаемых в рамках программы GEM пиковых ускорений с периодом повторения 475 лет по сравнению с другими участками вдоль разлома Сагайн (см. [https://github.com/gem/risk/profiles/blob/master/Southeast\\_Asia/Myanmar/seismic\\_risk\\_profile\\_Myanmar.png](https://github.com/gem/risk/profiles/blob/master/Southeast_Asia/Myanmar/seismic_risk_profile_Myanmar.png)). По-видимому, авторы не предполагали возможность единовременного вспарывания сегментов к северу и к югу от г. Мандалай и рассматривали эти сегменты как отдельные структуры. Возможность многосегментных разрывов не учитывается в действующих методиках вероятностного анализа сейсмической опасности, что неоднократно приводило к значительным ошибкам в оценках [Gerstenberger et al., 2020]. Поскольку такой учёт представляется весьма трудноразрешимой задачей, всё чаще ставится вопрос о возможности отказа от классической модели Корнелла, в которой главными зонами возможных сильных землетрясений являются линейные структуры, а более слабые землетрясения равномерно распределены в площадных структурах между линейными. Естественная замена – использование только данных о землетрясениях с получением локальных оценок закона Гутенберга-Рихтера путём высококонтрастного сглаживания интенсивности потока событий [Шебалин и др., 2024]. В связи с этим возникает вопрос:

следовало ли ожидать землетрясение магнитудой M7.7 там, где оно произошло, исходя только из информации о сейсмических событиях в регионе за последние десятки лет, в течение которых каталог землетрясений однороден и полон, начиная с некоторой достаточно низкой магнитуды.

Для ответа на этот вопрос был проведен анализ по методике работы [Шебалин и др., 2024]. В качестве источника данных использовался каталог Международного сейсмологического центра (ISC), в котором магнитуды «привязаны» к значениям моментной магнитуды  $Mw$ . Для локальной оценки параметров закона Гутенберга-Рихтера был выбран период с 2000 года по 27 марта 2025 г. Рассматривалась область  $17\text{--}28^\circ \text{N}$ ,  $91\text{--}101^\circ \text{E}$ ; глубина очага ограничена значением 40 км. Представительной для рассматриваемой области и периода является магнитуда  $Mc=4.0$ . Из каталога землетрясений удалены афтершоки. На регулярной сетке с шагом  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  методом среднего положения МСП [Шебалин и др., 2024] получены и картированы локальные оценки  $A4$  среднегодового числа событий в ячейке регулярной сетки с  $M \geq 4$  и параметра  $b$  закона Гутенберга-Рихтера. Для оценок  $A4$  использовались круги радиуса 35 км, для оценок  $b$  – 200 км (рисунок 1). На основе локальных оценок  $A4$  и  $b$  по закону Гутенберга-Рихтера рассчитаны значения  $A7.7$  – ожидаемая частота событий с  $M \geq 7.7$  в год в ячейках сетки (рисунок 1в). Эпицентр землетрясения 28 марта 2025 г. оказался в локальном максимуме величины  $A7.7$ . Более того, примерно половина проекции очага землетрясения проходит вдоль зон высоких значений величины  $A7.7$  (рисунок 1в). Интересно отметить, что эпицентры афтершоков также в основном приурочены к таким зонам. Таким образом, местоположение эпицентра и очага землетрясения можно считать вполне ожидаемым только исходя из распределения сейсмичности. Остается вопрос, насколько вероятной было землетрясение магнитудой 7.7.

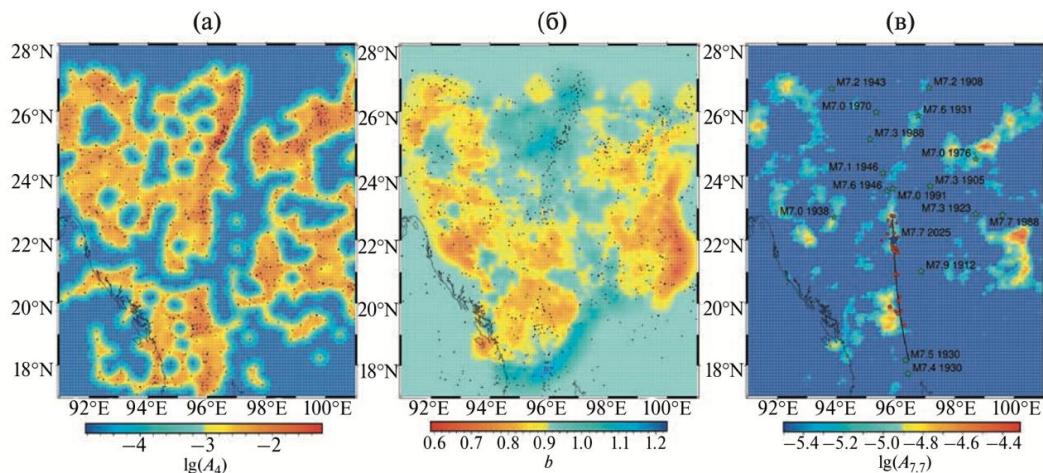


Рисунок 1 – Локальные оценки параметров закона Гутенберга-Рихтера по методу МСП

а) среднегодовое число А4 событий в ячейке регулярной сетки с  $M \geq 4$ ; б) параметр  $b$ ; в) расчетное число А7.7 событий в ячейке регулярной сетки с  $M \geq 7.7$ . Точками обозначены эпицентры событий, по которым проводилась оценка параметров. Линией показана проекция очага землетрясения на поверхность Земли по данным USGS. Звёздочка – эпицентр землетрясения 28 марта 2025 г. Красные кружки – эпицентры афтершоков. Зелёные звездочки – эпицентры землетрясений с  $M \geq 7$  с 1900 г.

Закон Гутенберга-Рихтера выполняется в областях, линейный размер которых в 3–5 раза больше линейного размера очага [Крушельницкий и др., 2024]. Был рассмотрен круг радиуса  $R=320$  км (удвоенный линейный размер очага сдвигового типа с магнитудой  $M=7.7$ ) с центром в эпицентре землетрясения 28 марта 2025 г. За 20 лет до землетрясения в круге произошло 202 землетрясения с  $M=4.5$  и более. Оценка параметра  $b$  закона Гутенберга-Рихтера по этим событиям составляет  $b = 1.02 \pm 0.07$ . Расчёт по закону Гутенберга-Рихтера даёт среднюю повторяемость землетрясений с  $M \geq 7.7$  1 раз в 200 лет, а вероятность таких событий хотя бы 1 раз за 50 лет составляет  $0.27 \pm 0.10$ , то есть заведомо больше стандартных 0.1 для оценок сейсмической опасности в рамках GSHAP и GEM) (рисунок 2) [Шебалин, 2025].

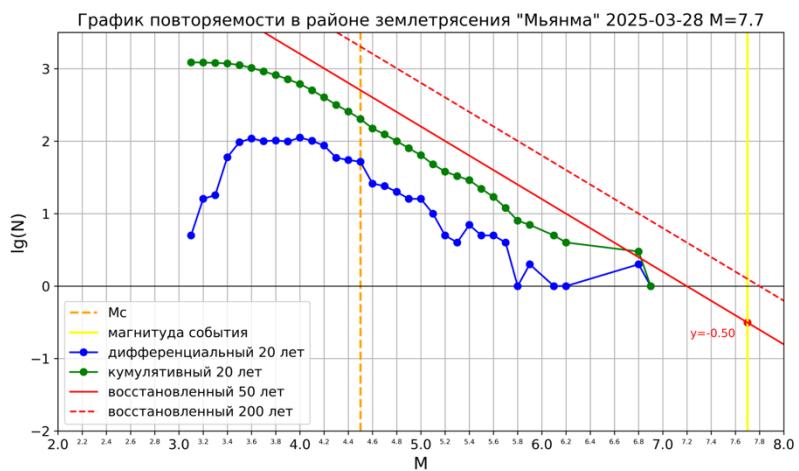


Рисунок 2 – Оценка повторяемости землетрясений магнитудой 7.7 и более в области землетрясения 28 марта 2025 г.,  $M=7.7$ , в Мьянме

Проведённый анализ, таким образом, подтверждает, что оценки сейсмической опасности по данным только о землетрясениях средней силы за несколько десятков лет были бы достаточно точными для данного землетрясения. Геологическая информация, тем не менее, важна для оценки ориентации будущих очагов землетрясений в пространстве, что необходимо для более точных расчётов затухания интенсивности сотрясений с увеличением расстояния от эпицентра.

Аналогичный анализ был проведен для землетрясений Камчатки. Задача состояла в определении наиболее вероятных эпицентров следующих землетрясений магнитудой 7.7 и более на Камчатке. Результат был представлен на Общемосковском тектонофизическом семинаре в Москве 18 февраля 2025 г. [Шебалин и др., 2025а]. На рисунке 3 показана карта ожидаемой частоты событий с  $M=7.7$  и более в год в ячейках сетки с шагом  $0.1 \times 0.1$  градусов и максимумы этой величины. Эпицентр землетрясения 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$  оказался недалеко от максимума, диагностированного вблизи полуострова Шипунский, а эпицентр повторного землетрясения 18 сентября 2025 г.,  $M=7.8$  – в самом максимуме.

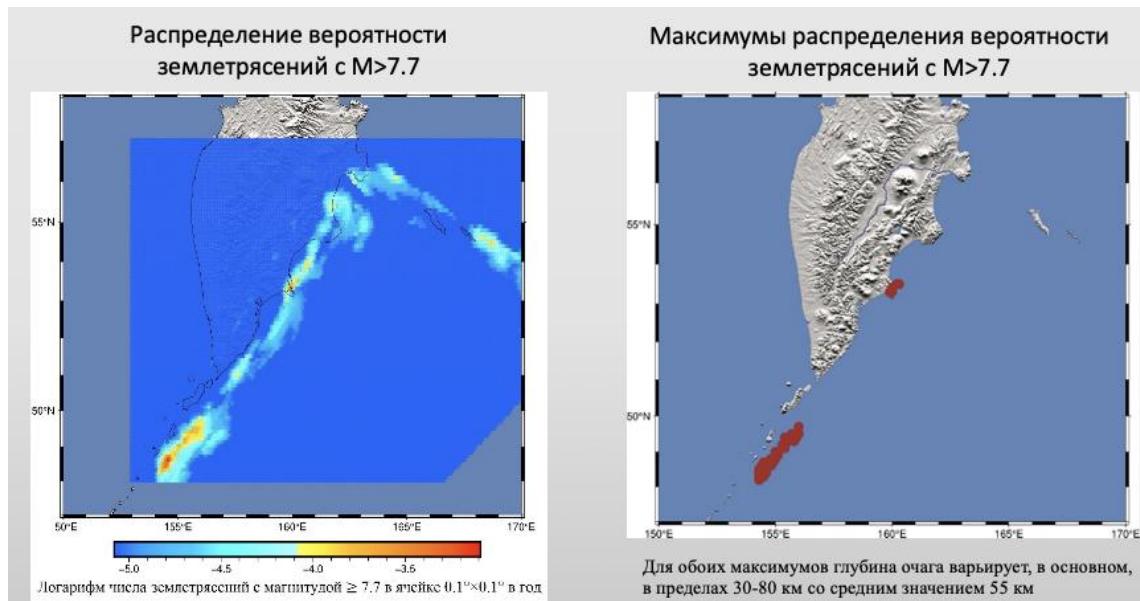


Рисунок 3 – Локальные оценки параметров закона Гутенберга-Рихтера по методу МСП. Слева: среднегодовое расчетное число  $A7.7$  событий в ячейке регулярной сетки с  $M \geq 7.7$ ; расчеты проведены на основе локальных оценок параметров закона Гутенберга-Рихтера методом МСП раздельно для межплитовых, внутрислэбовых и поверхностных землетрясений по данным о землетрясениях магнитудой 4.7 и более. Справа: максимумы оценок  $A7.7$ . Эпицентр землетрясения 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$  (не показан на рисунке) оказался примерно в 50 км к юго-западу от максимума вблизи полуострова Шипунский, а эпицентр повторного толчка 18 сентября 2025 г.,  $M=7.8$  – непосредственно в максимуме

## 1.2 Проблема определения мест будущих сильных землетрясений

Продолжены исследования по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе морфоструктурного районирования сейсмоопасных регионов с выделением морфоструктурных узлов в области пересечения линеаментов. Для разделения узлов на «опасные» и «неопасные» используются методы распознавания по комплексу геолого-геофизических признаков [Гельфанд и др., 1972]. Метод получил сокращенное наименование EPA (earthquake-prone areas). 50-летний опыт применения метода

EPA в разных регионах подтверждает достоверность получаемых результатов [Гвишиани и др., 2020]. В 2025 году по методике EPA было проведено определение мест возможного возникновения землетрясений магнитудой 6 и более на Сахалине.

Остров Сахалин расположен в западной части Охотской литосферной плиты, граничащей с Североамериканской, Евразийской и Тихоокеанской плитами. Сейсмичность Сахалина связана с системой субмеридиональных глубинных разломов [Харахинов и др., 1996], основной из которых – Центрально-Сахалинский – разделяет Охотскую и Евразийскую литосферные плиты. Движение этих плит друг относительно друга обуславливает высокую сейсмичность Сахалина. Для территории Сахалина выполнено морфоструктурное районирование (MCP), на основе которого алгоритмом распознавания образов Кора-3 определены морфоструктурные узлы, в которых возможно возникновение землетрясений с  $M \geq 6.0$ . В результате MCP на Сахалине определено 56 узлов, образованных пересечениями линеаментов [Новикова и др., 2025]. На рисунке 4 видно, что эпицентры землетрясений с  $M6+$  расположены вблизи некоторых пересечений линеаментов, т.е. в морфоструктурных узлах. Приуроченность землетрясений к узлам позволяет применить алгоритмы распознавания образов для идентификации узлов, в которых возможны землетрясения с  $M6+$ . Выделенные с помощью MCP 56 узлов (рисунок 4) составляют множество объектов распознавания для решения такой задачи.

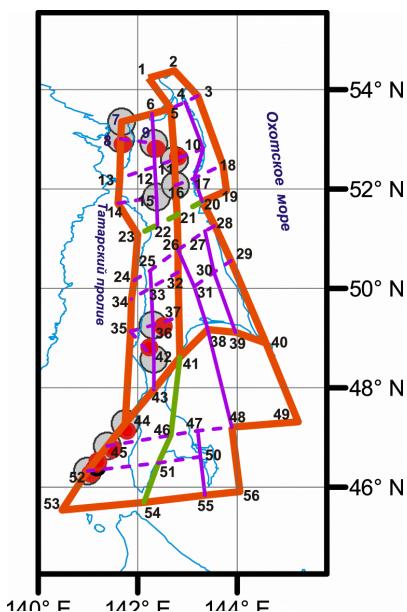


Рисунок 4 – Схема морфоструктурного районирования Сахалина и результат распознавания высокосейсмичных узлов для  $M6+$ . Линиями разной толщины показаны морфоструктурные линеаменты: красные линии – линеаменты 1-го ранга, зеленые – линеаменты 2-го ранга, фиолетовые – линеаменты 3-го ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, пунктирные – поперечные. Цифрами показаны номера пересечений линеаментов(узлов).

Красные кружки – эпицентры землетрясений с M6+. Серыми кругами показаны распознанные сейсмоопасные узлы для M6+

Все узлы, в которых известны землетрясения с M6+ (№№ 8, 9, 11, 36, 42, 44, 45, 52), в результате распознавания отнесены к высокосейсмичному классу В. Кроме них, как В распознаны три узла (№ 7, 15, 16), в которых до сегодняшнего дня событий такой магнитуды не зафиксировано. Все три потенциальных узла расположены в северной части Сахалина в районе Нефтегорского землетрясения и связаны с узлами, образованными линеаментами, оперяющими Центрально-Сахалинский разлом. В центральном и южном Сахалине, кроме тех узлов, где уже происходили землетрясения с M6+, других узлов такого сейсмического потенциала не выявлено.

### **1.3 Проблема оценки максимальной возможной магнитуды**

Оценка сейсмической опасности служит основополагающим инструментом для консервативной оценки последствий землетрясений для защиты критически важной инфраструктуры и населения. В работе [Zhang et al., 2025] представлен оперативный подход с использованием проектной магнитуды ( $M_{design}$ ) с настраиваемым коэффициентом безопасности ( $\gamma EM$ ) для определения максимально возможной магнитуды с учётом современной сейсмичности и тектонических условий на Китайском сейсмическом экспериментальном полигоне (CSES). Работа предлагает надёжный, основанный на фактических данных подход, который является как научно строгим, так и практически применимым к вероятностным и детерминированным оценкам сейсмической опасности. Работа выполнена в рамках сотрудничества ИТПЗ РАН с Университетом Триеста, Италия и Институтом геофизики Китайской сейсмологической администрации.

Основываясь на расчетах неодетерминистской оценки сейсмической опасности (NDSHA) [Panza et al., 2022], в работе исследована эффективность коэффициента безопасности магнитуды землетрясения при определении максимально возможной магнитуды для обеспечения огибающей уровней сейсмической опасности, которые не будут превышены, учитывая современные знания о сейсмичности и тектонических условий на Китайском сейсмическом экспериментальном полигоне (CSES). Результаты предполагают подтвержденную зависимость  $M_{design} = M_{max} + 0,7$ , что на сегодняшний день указывает на коэффициент безопасности, равный 2,8 для CSES. На основе проверенной взаимосвязи получена оценка сейсмической опасности с учётом максимальной потенциальной магнитуды в пределах CSES. Для сравнения, аналогичный коэффициент безопасности был также

проверен для территории Италии, что свидетельствует о его независимости от исследуемого региона. Несмотря на то, что в итальянском регионе максимальная магнитуда ниже, аналогичный коэффициент безопасности подтверждается и там, демонстрируя, что эта взаимосвязь также не зависит от диапазона магнитуд. Данная работа не только углубляет существующие методы определения максимальной потенциальной магнитуды, но и предлагает надёжный, основанный на фактических данных подход, который является как научно строгим, так и практически применимым к вероятностным и детерминированным оценкам сейсмической опасности.

#### **1.4 Совместное применение подходов PREPA и USLE**

В работе [Некрасова и др., 2025] представлена инновационная синергия двух независимых методов, каждый из которых широко применяется в рамках неодетерминистского подхода к оценке сейсмической опасности. А именно, в сейсмически активном регионе предложено совместное использование Распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (Pattern Recognition of Earthquake Prone Areas, PREPA) и Общего закона подобия для землетрясений (Unified Scaling Law for Earthquakes, USLE).

В подходе PREPA классифицируются морфоструктурные узлы как «опасные» (Dangerous, D) или «неопасные» (Not dangerous, N), основываясь только на геологических, геоморфологических и геофизических признаках, при этом сейсмическая история региона не учитывается. Напротив, методика USLE оперирует исключительно с каталогами землетрясений, характеризуя сейсмический поток значениями коэффициентов A, B и C, отражающими интенсивность сейсмичности, отношение частоты слабых и сильных землетрясений и фрактальную размерность эпицентров, соответственно, а также контрольным параметром  $\eta$ , определяющим время между землетрясениями.

Пилотное исследование выполнено для территорий Большого Кавказа, Алтай-Саяны и Прибайкалья, где были использованы полученные ранее результаты PREPA (Gorshkov et al., 2003; Горшков и др., 2018) и USLE (Kossobokov, Nekrasova, 2018a; Kossobokov, Nekrasova, 2018b; Nekrasova, Kossobokov, 2023), а также не публиковавшиеся ранее результаты обоих методов для Командорских островов. Для выявления различий между распределениями параметров USLE в 30-километровых окрестностях узлов классов D и N использовался двухвыборочный критерий Колмогорова-Смирнова.

Результаты сравнения распределений коэффициентов А, В и С в узлах классов D и N демонстрируют статистически значимые регионально специфические различия (рисунок 5). В частности, для Большого Кавказа выявлено значимое различие в распределении параметра В. На территории Алтай-Саяны наблюдается более высокая сейсмическая активность (параметр А) и кластеризация событий (параметр С) в узлах класса D. В Прибайкалье, напротив, узлы D характеризуются меньшей активностью по сравнению с N, что может быть связано с особенностями тектонической структуры региона. На Командорских островах различия проявляются преимущественно в параметре С, указывая на различную степень фрагментации разломов и блоков в узлах классов D и N.

Полученные результаты пилотного исследования выявляют универсальность предложенного подхода, ориентированного на региональную специфику сейсмического режима. Синергия PREPA-USLE может служить основой для систематического мониторинга параметров сейсмичности на всей территории Российской Федерации и открывает перспективы для дальнейшего анализа пространственно-временной изменчивости контрольных параметров сейсмического режима. Сочетание подходов может способствовать более глубокому пониманию процесса возникновения землетрясений в рамках сложной нелинейной иерархически самоорганизованной системы разломов и блоков литосферы Земли.

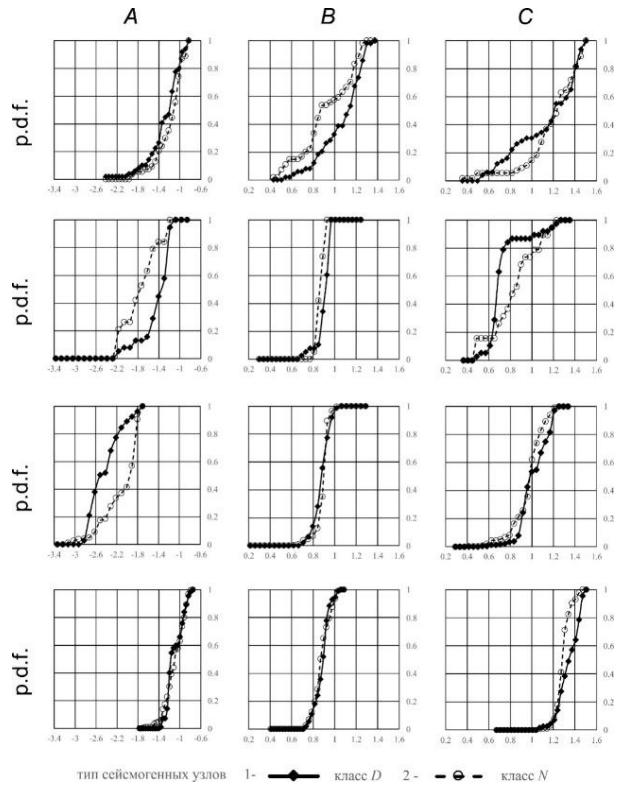


Рисунок 5 – Эмпирические функции распределения вероятностей (р.d.f.) коэффициентов А, В и С (слева направо) USLE, оцененных в окрестностях узлов D и N в регионах Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье и Командорские острова (сверху вниз)

### **1.5 ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье**

В 2025 г. был реализован проект для анализа региональной сейсмической опасности, реализованный в QGIS для территории Прибайкалья [Кревсун и др., 2025]. Решения Web-GIS проекта основаны на технологиях с открытым исходным кодом и реализованы с использованием как настольных, так и серверных компонентов QGIS. Хранение данных осуществляется с помощью геобаз данных SpatiaLite, которые просты в администрировании без дополнительных зависимостей или установок.

Цель проекта – предоставить интерактивный инструмент для оценки, визуализации, верификации и анализа сейсмической опасности в районе озера Байкал с использованием подхода Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), который обобщает закон Гутенберга-Рихтера [Kossobokov, Mazhkenov, 1994; Kossobokov, 2021].

Проект реализован в пределах  $50^{\circ}$ – $58^{\circ}$  с.ш. и  $98^{\circ}$ – $122^{\circ}$  в.д. и состоит из трех компонент: (i) идентификация потенциальных сейсмических источников, (ii) моделирование сейсмического воздействия и построение карт сейсмической опасности, (iii) верификация и сравнение полученных карт с картами, построенными на основе вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности.

(i) Идентификация сейсмических источников использует ранее опубликованные значения коэффициентов ОЗПЗ [Nekrasova, Kossobokov, 2023]. Для каждой ячейки  $j$  регулярной сетки  $1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ}$ , в которой есть надежное определение коэффициентов А, В и С, где А и В соответствуют коэффициентам  $a$  и  $b$  в законе Гутенберга-Рихтера, а коэффициент С отражает локальную фрактальную размерность распределения эпицентров, ожидаемое число землетрясений магнитуды  $M_j$  за период времени  $T$  лет определяется как:  $N_T(M_j) = T \times N(M_j, L_0)$ . Максимальная достоверная магнитуда (МДМ) определяется как наибольшая магнитуда  $M_j$ , удовлетворяющая условию  $N_T(M_j) \geq p$ , где  $0 \leq p \leq 1$ . Ячейки сетки при этом рассматриваются как источники сейсмической интенсивности с МДМ.

(ii) Моделирование сейсмического воздействия от каждого источника выполнено на основе быстрого приближённого метода [Nekrasova, Kossobokov, 2023], учитывающего МДМ и анизотропное распространение воздействия. Основное направление воздействия

определяется доминирующим простиранием системы активных разломов региона. Доминирующее простирание определяется автоматически [Емельянов, Некрасова, 2022] для каждого источника с МДМ на основе базы данных активных разломов [Bachmanov et. al., 2022]. В результате строятся карты ожидаемой максимальной макросейсмической интенсивности на 50-летний период для вероятностей превышения 10%, 5% и 1% (рисунок 6).

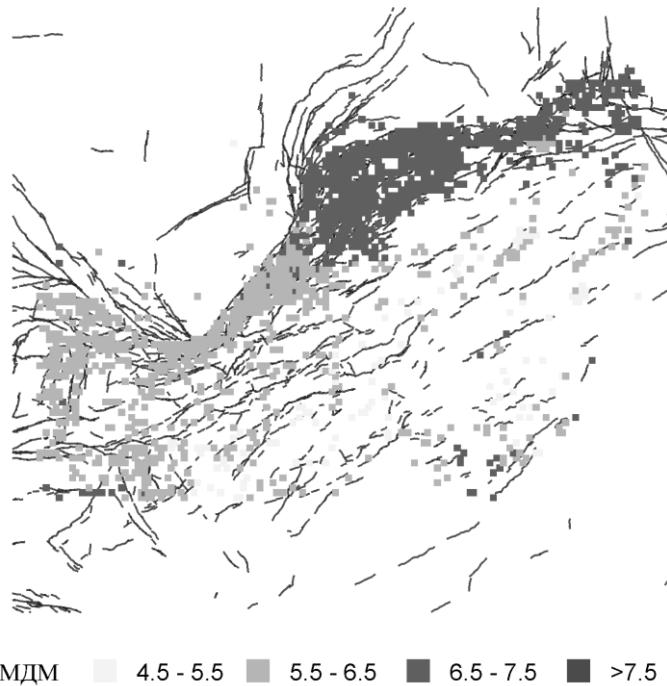


Рисунок 6 – Схема активных разломов Прибайкалья (Bachmanov et. al., 2022) и ячейки МДМ, 10% превышения в 50 лет, определенные на основе коэффициентов ОЗПЗ [Nekrasova, Kossobokov, 2023]

(iii) Верификация и сравнение. Полученные карты сейсмической опасности сопоставляются с картами Общего сейсмического районирования ОСР-2016 и картами на основе глобальной модели сейсмической опасности – GEM-2018. Дополнительно проводится валидация построенных карт данными Унифицированного каталога землетрясений [Специализированный каталог землетрясений, 2014], включающего 124 события ( $M \geq 5.5$ ), зарегистрированных в Байкальском регионе до 2013 г. Данные унифицированного каталога, относящиеся к территории проекта и фрагменты карт ОСР-2016 и GEM-2018 интегрированы в проект.

Плагины QGIS, обеспечивающие расчёты и визуализацию карт сейсмической опасности представленного проекта, могут быть использованы для построения таких карт в других регионах России и мира, где доступны надёжные оценки коэффициентов ОЗПЗ и

имеются данные об активных разломах. Разработанная система предназначена как для научных исследований, так и для практического применения органами, ответственными за управление рисками и чрезвычайными ситуациями, обеспечивая поддержку принятия решений в сейсмоактивных регионах.

## **1.6 Систематизация и стандартизация исходных данных**

Работа по систематизации и стандартизации исходных данных, в частности каталогов землетрясений, является важнейшим элементом исследований, в которых эти данные используется. Такую работу практически невозможно проводить только в рамках какой-либо одной конкретной НИР, тем более что ее результаты предполагается использовать для широкого круга исследований. Это в полной мере касается проектов Российского научного фонда, требующего, чтобы в публикациях авторы указывали, что работа «выполнена за счет Российского научного фонда». В 2025 г. исполнители по данной теме НИР Государственного задания И.А. Воробьева и П.А. Малютин внесли именно в ее рамках существенный вклад в работы, проводившиеся в рамках двух проектов РНФ, не входя в группу исполнителей по этим проектам. Для целей выполнения проекта РНФ № 25-17-00094 «Создание методики расчета зависящей от времени сейсмической опасности» на основе ранее накопленного в рамках выполнения различных НИР опыта был разработан полностью автоматизированный метод объединения каталогов землетрясений с идентификацией дублей [Воробьева и др., 2025b], а в рамках данной темы государственного задания создан соответствующий программный продукт [Программа для ЭВМ]. Программа предназначена для автоматического объединения двух каталогов событий с использованием модифицированного метода ближайшего соседа с последующей идентификацией и обработкой дублирующихся записей. Работа программы предполагает два режима: полное объединение с сохранением уникальных событий или очистку каталога от дублей. Программа находит применение в научных исследованиях, связанных с анализом пространственно-временных данных в сейсмологических исследованиях. Её функционал ориентирован на решение задач интеграции разнородных каталогов событий, включая обработку сейсмических событий различных агентств и служб.

Входными данными являются только исходные каталоги, на выходе пользователь получает объединённый каталог, очищенный от дублей. П.А. Малютин, не входивший в научный коллектив по проекту РНФ, для целей темы государственного задания провел ряд тестов алгоритма [Воробьева и др., 2025a]. Был проведен анализ, который показал, что число

ошибок идентификации дублей модифицированным методом ближайшего соседа [Vorobieva et al., 2022] при создании объединенных каталогов для Российской Арктики, вероятно, было сильно переоценено. Это было связано с использованием модели многомерного нормального распределения для определения доли пропусков дублей, и числа близких событий в исходных каталогах для оценки вероятности ложных дублей. Новые оценки показывают, что число ошибок незначительно, и они не могут повлиять на интегральные свойства каталогов землетрясений. В задачах, ориентированных на оценки сейсмической опасности, автоматизированный метод объединения каталогов обеспечивает достаточную точность идентификации дублей. Если объединённый каталог предполагается использовать в задачах, требующих более точной идентификации дублей, этот алгоритм может также быть полезен, т.к. он позволяет многократно сократить число “сомнительных” пар событий, которые требуют более тщательного ручного анализа для принятия окончательного решения.

Созданные алгоритм и ПО уже использованы, в частности, для создания объединенного каталога землетрясений Курило-Камчатской зоны (см. раздел 1.1, прогноз Камчатки). Этот же алгоритм и ПО были использованы в рамках проекта РНФ № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в Российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» для создания Объединенного каталога землетрясений Российской Арктики, 1962–2024 гг. [Воробьева и др., 2025а]. И.А. Воробьева, не входившая в 2025 г. в научный коллектив по проекту РНФ № 21-77-30010, для целей выполнения данной темы государственного задания выполнила анализ пространственных вариаций уровня регистрации в построенном комбинированном каталоге (рисунок 7). Карта построена мульти-масштабным методом [Vorobieva et al., 2013]. Лучший уровень регистрации с  $M_c \leq 3.0$  наблюдается в Якутии и Магаданской области. В акватории моря Лаптевых  $M_c \leq 3.8$ . В северной части Камчатки и частично на Чукотке  $M_c \approx 3.5$ . Каталог можно считать полным с  $M \geq 3.8$  с 1995 г. на всей территории восточного сектора АЗРФ.

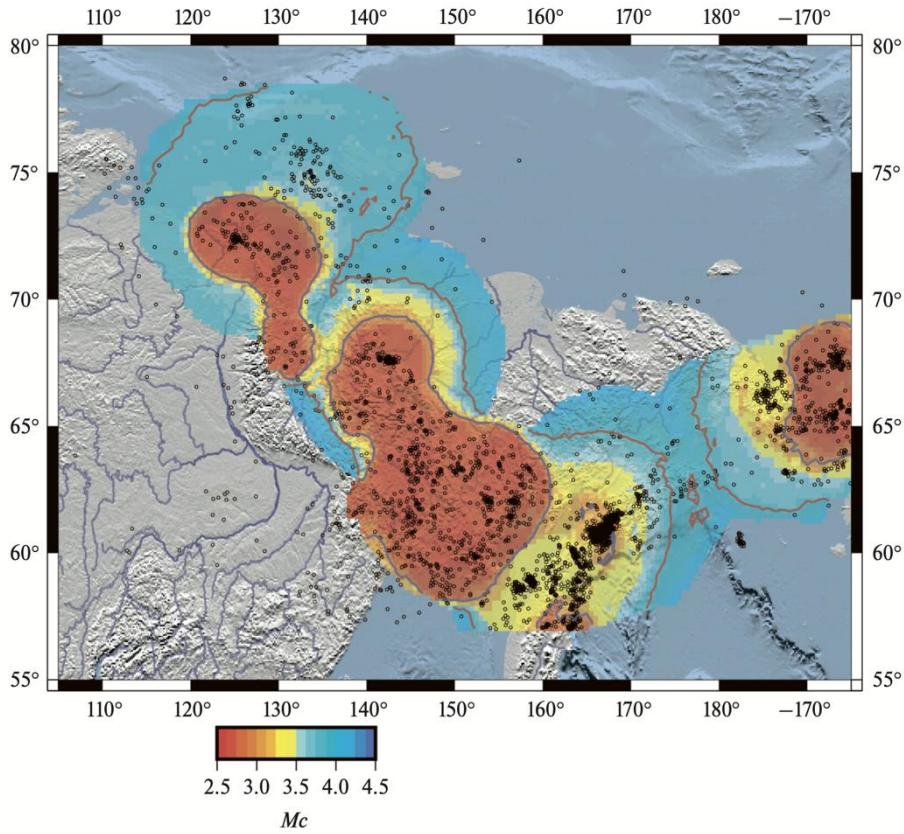


Рисунок 7 – Карта пространственных вариаций магнитуды полной регистрации  $Mc$  в Восточном секторе АЗРФ в период 1995 – 2024 гг.: синий контур –  $Mc \leq 3.0$ , красный контур –  $Mc \leq 3.8$

## **2 Исследование и учет фактора времени в задачах оценки сейсмической опасности**

### **2.1 Эксперимент по применению алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8**

Начиная с 1991 г. в ИТПЗ РАН ведется эксперимент по прогнозу сильнейших землетрясений мира по алгоритму M8 [Keilis-Borok, Kossobokov, 1990; Healy et al., 1992]. Определяются области, в которых в ближайшие несколько лет наиболее вероятны землетрясения магнитудой 8 и более и 7.5 и более. На сегодняшний день статистика результатов, полученных в Глобальном тесте, с достоверностью выше 99% свидетельствует о достаточно высокой эффективности прогнозов по алгоритму M8, а также в его комбинации с алгоритмом MSc, уточняющим локализацию очаговой зоны ожидаемого землетрясения. Тем самым нулевая гипотеза случайного возникновения в сейсмоактивных районах отвергнута с сейсмологической определенностью, по крайней мере, для сильнейших землетрясений мира

из магнитудных диапазонов 8.0+ и 7.5+. Результаты этого экспериментального тестирования являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений.

Высокая статистическая значимость методов среднесрочного прогнозирования землетрясений, достигнутая в ходе текущих экспериментальных испытаний во всем мире, подтверждает следующие парадигмы: (i) предвестники сильнейших землетрясений существуют; (ii) размер области, в которой ранние предвестники проявляются намного (примерно в десять раз) больше, чем размер зоны очага готовящегося сильного землетрясения; (iii) многие предвестниковые признаки сейсмичности схожи в регионах с разной сейсмической и тектонической обстановкой; и (iv) некоторые предвестники сейсмичности универсальны. Их аналоги предваряют катастрофические события и в других сложных нелинейных системах.

Результаты диагностики по алгоритмам M8 и MSc территорий, где сильнейшие землетрясения мира ожидаются в текущем полугодии, публикуются на сайте ограниченного доступа ИТПЗ РАН, о чём информируются более сотни геофизиков из ведущих сейсмологических центров мира.

Прогнозные Карты по состоянию на 01 января 2025 года приведены на рисунке 8.

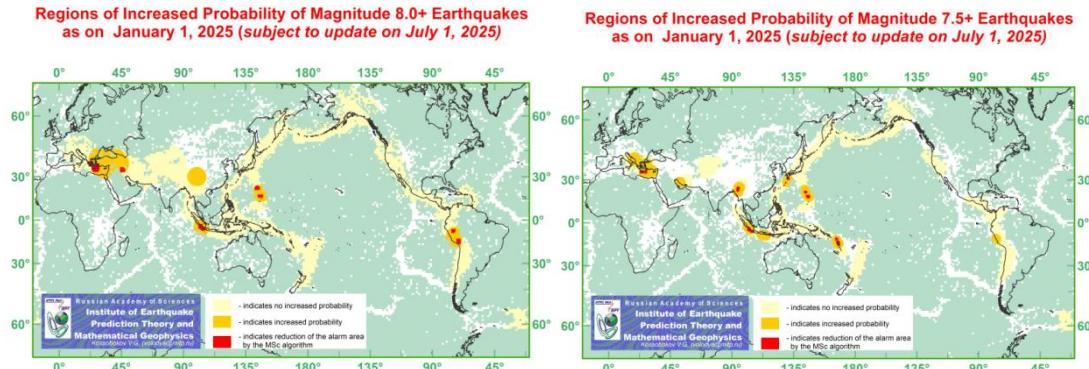


Рисунок 8 – Территории повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира в первой половине 2025 года в результате диагностики по алгоритму M8 (темно-желтый) и в его сочетании с уточнением локализации по алгоритму MSc (красный цвет). Светло-желтым и белым отмечены территории, где землетрясения-цели не ожидаются и где землетрясений, зарегистрированных глобальной сетью сейсмографов недостаточно для надежной диагностики, соответственно

Карты по состоянию на 01 июля 2025 года приведены на рисунке 9.

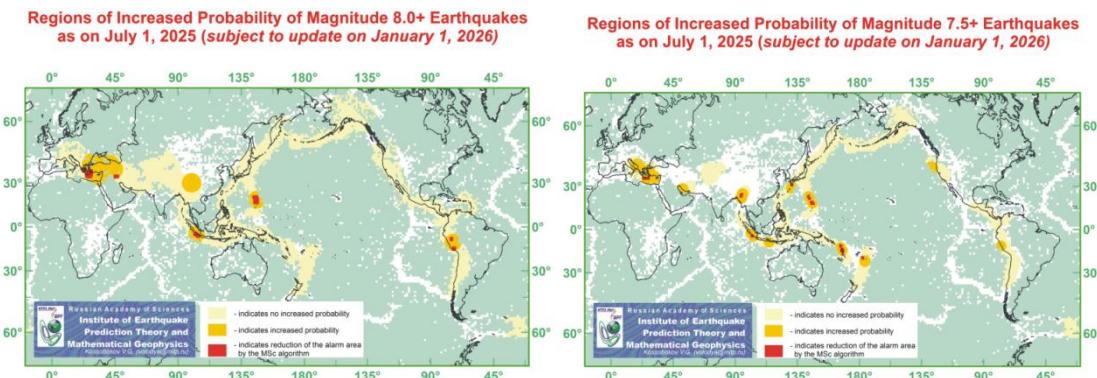


Рисунок 9 – Территории повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира во второй половине 2025 года в результате диагностики по алгоритму M8 (темно-желтый) и в его сочетании с уточнением локализации по алгоритму MSc (красный цвет). Светло-желтым и белым отмечены территории, где землетрясения-цели не ожидаются и где землетрясений, зарегистрированных глобальной сетью сейсмографов недостаточно для надежной диагностики, соответственно

В 2025 году в мире произошло шесть землетрясений-целей, из которых три – за пределами области диагностики (одно вблизи Каймановых островов и два в проливе Дрейка). Землетрясение 28 марта 2025 г., M7.7, в Мьянме добавило «успех» алгоритма M8 и «пропуск цели» алгоритма M8-MSc в статистику прогнозов в диапазоне M7.5+. Мега-землетрясение 29 июля 2025 г., M8.8 у полуострова Камчатка и его афтершок 18 сентября 2025 г., M7.8 пропущены (таблица 1).

Таблица 1

Время, UTC	Широта, °N	Долгота, °E	Глубина, км	Магнитуда	Район
2025-02-08 23:23:15	17.65	-82.40	44	7.6	210 km SSW of George Town,
2025-03-28 06:20:53	22.01	95.94	10	7.7	2025 Mandalay, Burma (Myanmar)
2025-07-29 23:24:52	52.49	160.24	35	8.8	2025 Kamchatka Peninsula, Russia
2025-08-22 02:16:18	-60.32	-61.92	40	7.5	2025 Southern Drake Passage
2025-09-18 18:58:15	53.18	160.54	30	7.8	128 km E of Petropavlovsk-
2025-10-10 20:29:21	-60.20	-61.80	9	7.6	Drake Passage

Таким образом, вклад 2025 года в статистику глобального тестирования алгоритмов M8 и MSc привел лишь к незначительному изменению высоких оценок достоверности прогнозов Глобального теста (таблица 2).

Таблица 2 – Эффективность прогнозов M8 и M8-MSc (по состоянию на 03 ноября 2025 г.)

Период тестирования	Землетрясения-цели			Пространственно-временной объем превог, $\mu$		Достоверность	
	Всего	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
<b>Магнитудный диапазон M8.0+</b>							
1985-2025	32	18	11	26.52%	11.82%	99.96%	99.92%

1992-2025	30	16	9	23.50%	9.76%	99.96%	99.83%
<b>Магнитудный диапазон M7.5+</b>							
1985-2025	103	44	17	22.41%	7.92%	>99.99%	99.70%
1992-2025	91	34	11	17.85%	7.01%	>99.99%	94.66%

В работе [Kossobokov, 2025] проводится анализ результатов глобального прогнозного эксперимента на основе диаграммы ошибок Молчана [Molchan, 1997]. В теоретическом анализе с точки зрения теории принятия решений [Molchan, 1997] оптимальная стратегия определяется как точка касания диаграммы ошибок (рисунок 10), кривой  $\Gamma$ , и контурной линии заданной функции потерь  $\gamma$ . На рисунке 10 потери и затраты пропорциональны ошибкам прогнозирования  $v$  и пространственно-временному объему тревоги  $\mu$  соответственно, в то время как кривая  $\Gamma$  является границей выпуклого множества ошибок (показано серым цветом), которое представляет все стратегии, основанные на фиксированном знании. Оптимист принимает отсутствие тревоги и 100% неудач ( $\mu = 0, v = 1$ ); пессимист полагается на постоянную общую тревогу и отсутствие неудач ( $\mu = 1, v = 0$ ); знающий эксперт, учитывая функцию потерь  $\gamma$ , предлагает следовать оптимальной стратегии  $Q^*$ , при которой  $\gamma(\mu, v)$  касается кривой  $\Gamma$ . Такой выбор для лиц, принимающих решения, будет соответствовать минимизации затрат на реагирование на прогноз и потенциальных потерь. (На рисунке 10 точка  $Q^*$  показана для минимаксной стратегии, когда  $\mu = v$ .)

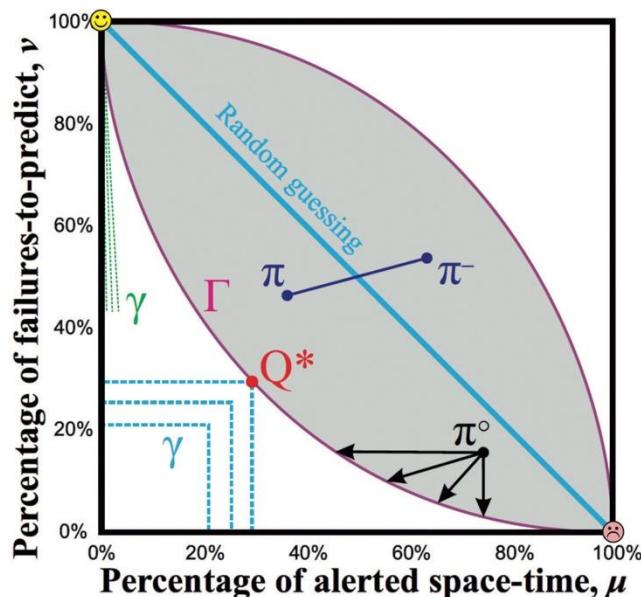


Рисунок 10 – Диаграмма ошибок (модифицировано относительно работы [Molchan, 1997]).  
По горизонтальной оси – процент пространства-времени в состоянии «тревоги»,  
по вертикальной оси – доля землетрясений-целей прогноза, произошедших вне тревоги

На рисунке 11 показаны пары  $(\mu, v)$  на диаграммах ошибок, а также кривые доверительного уровня 95% и 99%, полученные в случайных биномиальных испытаниях. По состоянию на декабрь 2004 года уровень достоверности, достигнутый в глобальном тесте прогнозов M8 и M8–MSc (таблица 2), значительно превышает 99% во всех случаях, кроме одного, а именно 93,12% достоверности для прогноза событий M7.5+ с использованием алгоритма M8–MSc (возможно, из-за переоценки области применимости алгоритма MSc). Несмотря на надежность, эти прогнозы не используются для оперативного оповещения о крупнейших землетрясениях за несколько месяцев или лет из-за отсутствия налаженных связей с руководителями служб чрезвычайных ситуаций и практики принятия решений на основе информации ограниченной точности.

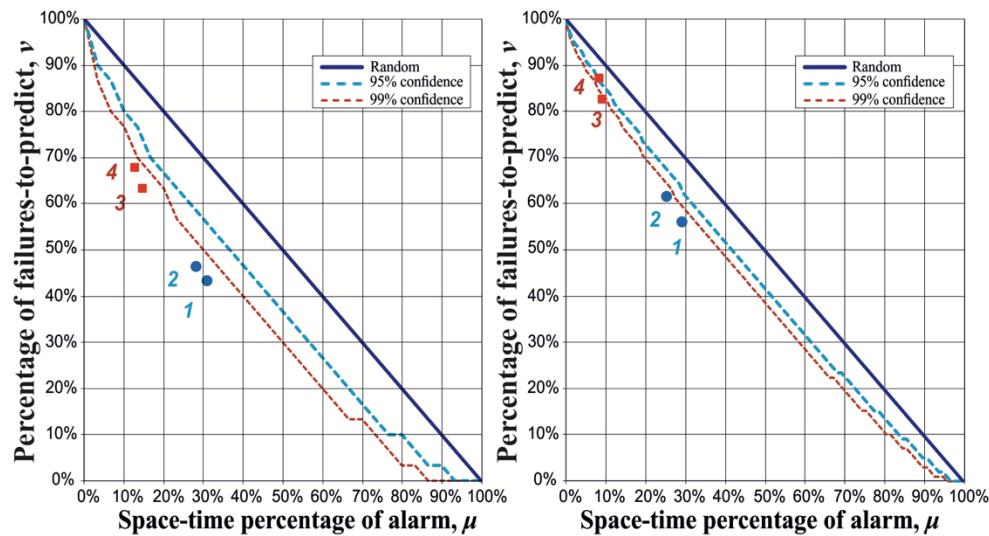


Рисунок 11 – Диаграммы ошибок для стратегий M8 и M8-MSc, ориентированных на землетрясения в диапазонах магнитуд M8,0+ (слева) и M7,5+ (справа): M8 в 1985–2024 гг. (1) и 1992–2024 гг. (2); M8–MSc в 1985–2024 гг. (3) и 1992–2024 гг. (4). Кривые нижних 95% (голубой) и 99% (красный) доверительных интервалов получены методом случайного угадывания в 31 и 101 независимых испытаниях с одинаковым распределением

## 2.2 Прогноз землетрясения 28 марта 2025 г., M7.7, в Мьянме

28 марта 2025 г. в Мьянме произошло катастрофическое землетрясение, которое унесло несколько тысяч человеческих жизней и разрушило огромное число жилых зданий и объектов культурного наследия. Когда происходят такие землетрясения, всегда возникают вопросы о том, в чём причины землетрясения, насколько ожидаемым было это событие, в чём его особенности, возможно ли повторение землетрясения, может ли оно вызвать новые землетрясения. Причиной землетрясения стало активное разломообразование, вызванное деформацией верхней мантии и земной коры. В этом регионе Индийская плита движется на

северо-северо-восток относительно Евразийской плиты. Эти движения плит приводят к субдукции Индийской плиты под юго-восточную Азию в Зондском жёлобе, столкновению континентальной Индии с Евразией вдоль Гималайского хребта и формированию трансформного сдвигового разлома Сагайн вдоль восточного края зоны коллизии за счёт вращательной компоненты движения Индийской плиты [Tapponnier et al., 1982]. С начала 20 века разлом Сагайн пережил серию крупных разрушительных землетрясений: M7.5 и M7.4 в 1930 году в южной части разлома, M7.6 в 1946 году и M7.1 в 1991 году к северу от очага землетрясения 28.03.2025 года, M7.2 в 1908 году и M7.6 в 1931 вблизи границы Индии и Мьянмы (Бирмы) в северной части разлома. Часть разлома, захваченная очагом землетрясения 2025 года, таким образом, не была активной в течение почти 100 лет, начиная с 1930 г. Более того, даже землетрясения умеренной силы происходили лишь в северной и центральной части разлома. По-видимому, с этим связана недооценка сейсмической опасности в рамках программы GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program, <https://www.gfz.de/en/gshap>) и её продолжения – программы GEM (Global Earthquake Model, <https://www.globalquakemodel.org/>). Район г. Мандалай, наиболее пострадавшего в результате землетрясения, в обеих программах отнесён к зоне с ожидаемым максимальным пиковым ускорением грунта менее 5 м/с, что соответствует интенсивности VIII баллов, тогда как в реальности, по данным USGS и EMSC, сотрясения в этом районе достигали IX и даже более баллов. Гипоцентр землетрясения 28 марта 2025 г. расположен на северной границе сейсмической бреши длиной 260 км, которая “хранила молчание” на протяжении как минимум 128 лет [Hurukawa, Maung, 2010].

Эпицентр землетрясения 28 марта 2025 г. находится в области, где землетрясение магнитудой M7.5+ в рамках глобального прогнозного теста по алгоритму M8 ожидалось с января 2021 года (рисунок 12). Во время следующих полугодовых обновлений прогноз был подтверждён – последний раз в январе 2025 года, ориентировочно до середины 2027 года. Эпицентр главного толчка M7.7 отстоит примерно на 70 км от уточнённой по алгоритму MSc области тревоги протяжённостью 390 км в Центральном Бассейне Мьянмы (рисунок 12). Таким образом, как указано в предыдущем разделе, событие добавляет “успех” M8 и “неудачу” M8-MSc в статистику среднесрочных прогнозов по этим алгоритмам.

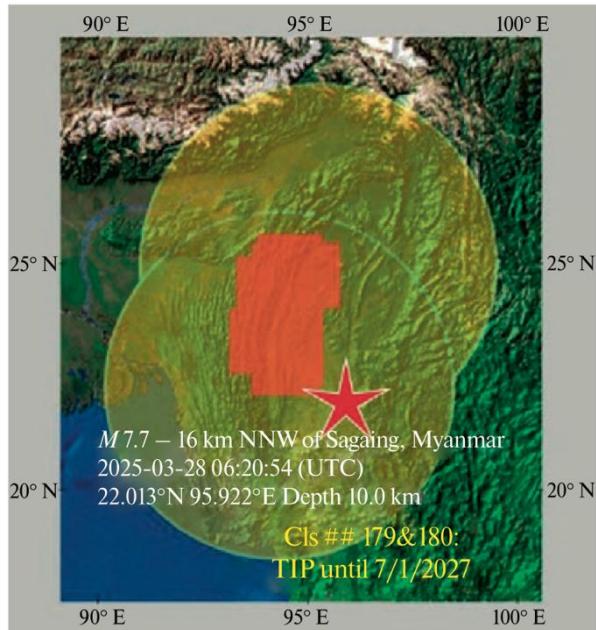


Рисунок 12 – Глобальное тестирование прогнозов М8-МСc перед землетрясением магнитудой 7.7 в Мандалае (Мьянма) 28 марта 2025 г.

Кругами обозначены области анализа алгоритмом радиуса 427 км, звёздочка – эпицентр землетрясения, красным обозначена область тревоги по алгоритму МСc

### 2.3 Моделирование последовательности афтершоков

В серии докладов на международных конференциях [Molchan et al., 2025a; Molchan et al., 2025b; Molchan et al., 2025c] рассматривались модели афтершоков эпидемического типа (ETAS) с точки зрения числа афтершоков (продуктивности). Главные элементы этих докладов:

- доказательство каскадной природы афтершоков для большинства сильных событий Мира ( $M \geq 6.5+$ ) (это свойство используется как допустимая альтернатива для описания кластеризации событий);
- важность геометрического распределения, предложенного в ИТПЗ РАН [Шебалин и др., 2018; Shebalin et al., 2020], для числа первичных афтершоков.

Анализируются распределения  $F_1(m_0)$  числа прямых и  $F_2(m_0)$  числа всех афтершоков (все «поколения») магнитудой  $m \geq M$  от землетрясений магнитудой  $m_0$ . Применяется так называемый  $\Delta$ -анализ:  $M = m_0 - \Delta$ . Традиционный порог магнитуды заменен на  $M = m_a - \Delta$ , где  $m_a$  – мода распределения магнитуды сильнейшего афтершока в кластере, рассматривается распределение  $F_{2a}(m_0)$ . Величина  $m_a$  может быть рассчитана из регрессионного соотношения (рисунок 13).

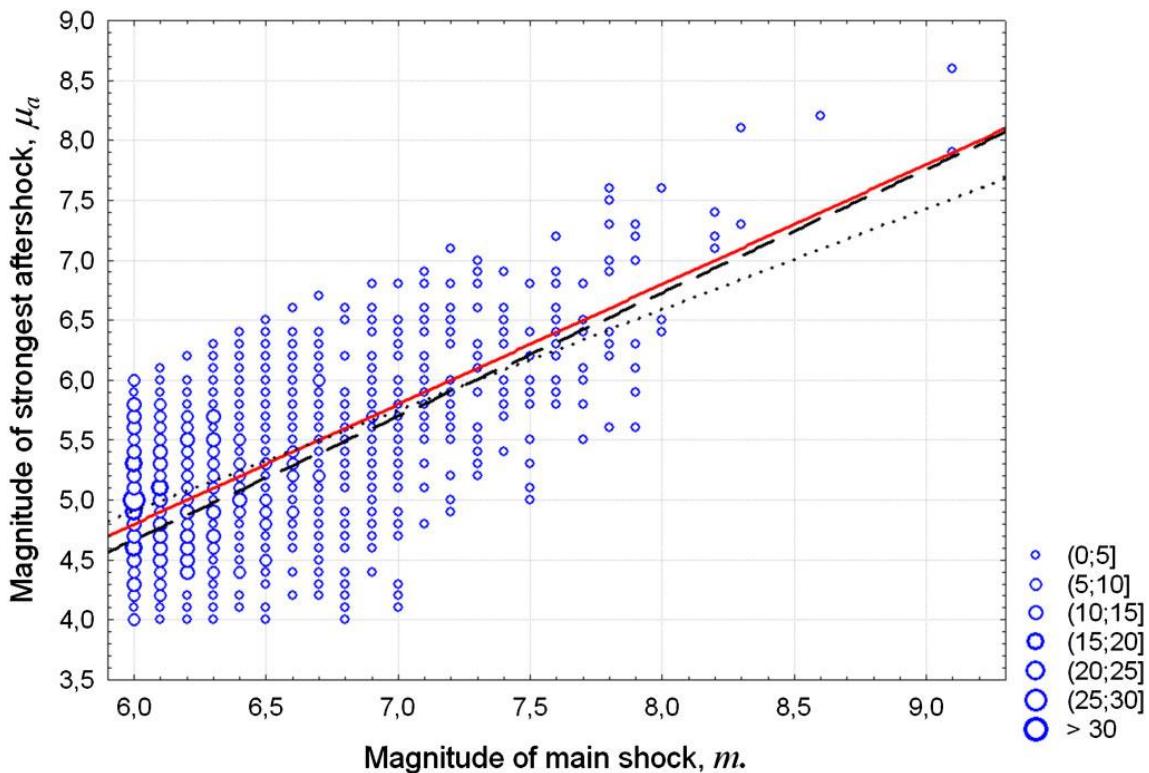


Рисунок 13 – Регрессионные соотношения магнитуды сильнейшего афтершока и магнитуды основного толчка:  $m_a = 0.84 m_0 - 0.13$ ,  $m_0 \geq 6.0$ ;  $m_a = 1.03 m_0 - 1.51$ ,  $m_0 \geq 6.5$

Доказано, что предел распределения  $F_2(m_a)$ , при условии  $m_0 \gg 1$ , существует и найдено соотношение с функцией  $F_1(m_0)$ . Более того, в субкритическом режиме предельное распределение  $F_{2a}(m_0)$  идентично распределению  $F_1$ .

#### 2.4 Прогнозы активности афтершоков в автоматизированной системе AFCast

##### Землетрясение 28 марта 2025 г., $M=7.7$ , в Мьянме

С 2019 г. в ИТПЗ РАН ведется автоматизированная оценка опасности афтершоков после сильных землетрясений мира (<https://www.itpz-ran.ru/afcast/>). Система AFCast каждые 4 часа загружает данные из каталога ANSS ComCat Американской геологической службы (<https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>). Оценка опасности сильных афтершоков выполняется для землетрясений мира с магнитудой 6.5 или выше, которые считаются основными толчками. Как только сведения о землетрясении с  $M \geq 6.5$  поступают в систему, выполняются следующие оценки по информации об основном толчке: оценка области, где ожидается афтершоковая активность; оценка магнитуды сильнейшего афтершока, оценка длительности опасного периода для землетрясений с  $M = 2$  или выше [Баранов и др., 2023]. Затем оценки максимальной магнитуды последующих афтершоков последовательно уточняются по обновленным данным с возрастающими интервалами между перерасчетами: через 6 часов, 12

часов, 24 часа, 48 часов,..., 128 суток. Расчёты выполняются при условии достаточности данных (не менее 5 представительных афтершоков из области ожидаемой афтершоковой активности), иначе используется оценка по динамическому закону Бота [Баранов и др., 2018]. Кроме того, при условии достаточности данных за 12 часов после основного толчка проводится уточнение оценки длительности опасного периода [Baranov et al., 2022].

Землетрясение 28 марта 2025 г.,  $M=7.7$ , в Мьянме имело один сильный афтершок ( $M=6.7$ ), который произошел через 11 минут после основного толчка, что соответствует известному закону Бота. Но число последующих афтершоков с учетом их магнитуды было несколько ниже, чем бывает в среднем по мировой статистике [Баранов и др., 2025]. В частности, даже через 16 дней после основного землетрясения не накопилось достаточного числа афтершоков представительной магнитуды (ее оценка составила  $M_c=4.5$ ) для уточнения оценки максимальной магнитуды последующих афтершоков, а фактические значения оказываются значительно ниже усредненных оценок по динамическому закону Бота. В некоторой, незначительной, степени это связано с тем, что ожидаемая область афтершоков оказалась даже меньше, чем фактический размер очага землетрясения, который оказался примерно втрое больше общепринятых усредненных оценок. Ожидаемая область афтершоков рассчитывается в пределах круга с радиусом, равным трем усредненным линейным размерам очага землетрясения данной магнитуды. Уточненная по данным за 12 часов оценка длительности опасного периода, в течение которого можно ожидать афтершоки магнитудой 5.7 и более, составила 4 суток с вероятностью 0.9. На момент написания статьи [Баранов и др., 2025] магнитуда сильнейшего афтершока (не считая афтершока в первые минуты) составила 5.5; более сильных афтершоков не произошло и на момент написания данного отчета, и, таким образом, оценка пока подтверждается.

В Геологической службе США также проводится оценка опасности последующих афтершоков разной магнитуды в течение суток, недели, месяца и года. Используется простейшая модель, являющаяся комбинацией законов Гутенберга-Рихтера и Омори-Утсу. В качестве параметров используются заранее рассчитанные региональные оценки. Модель не учитывает возможные каскады, когда сильные афтершоки могут иметь собственные серии афтершоков. В работе [Баранов и др., 2025] также проведена аналогичная оценки по нашей методике, используя модель ETAS-е [Shebalin et al., 2020], в которой учитывается не только возможность каскадов, но и экспоненциальный закон продуктивности землетрясений. Для

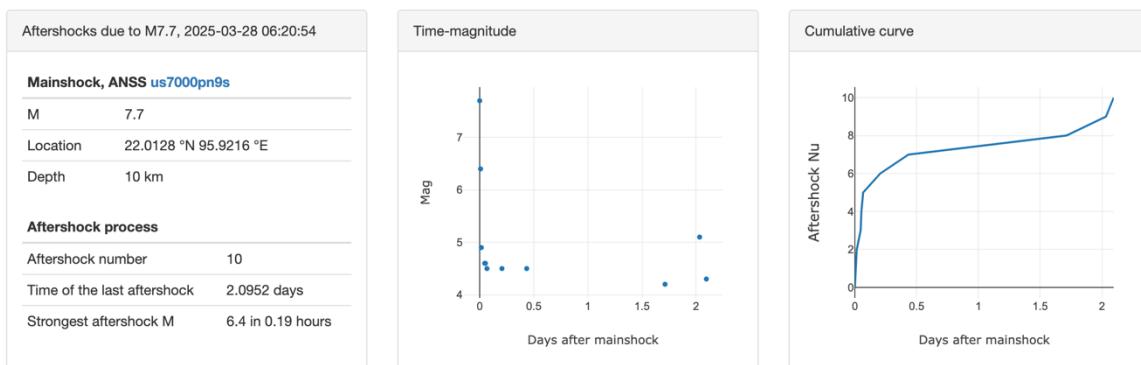
этого получены Байесовские оценки параметров модели по данным об афтершоках за первые 25 дней. Сравнение наших оценок с оценками USGS приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценки вероятности возникновения хотя бы одного афтершока заданной магнитуды в течение 1 месяца и 1 года, начиная с даты 23 апреля 2025 г.

Магнитуда афтершока	1 месяц		1 год	
	USGS	ИТПЗ	USGS	ИТПЗ
$M \geq 7$	0.01	0.002	0.06	0.007
$M \geq 6$	0.12	0.036	0.40	0.116
$M \geq 5$	0.68	0.38	0.97	0.68

Как видно из таблицы 3, оценки работы [Баранов и др., 2025] значительно ниже, несмотря на то, что они учитывают возможные каскады, что увеличивает вероятности. Через полгода после землетрясения, когда уже в течение 5 месяцев максимальная магнитуда землетрясения не превышает 4.6, оценки работы [Баранов и др., 2025] представляются значительно более точными.

Предварительные результаты прогноза афтершоковой активности после землетрясения 28 марта 2025 г. по данным за первые 4 суток были представлены в докладе [Шебалин, 2025] 24 апреля 2025 г. (рисунках 14, 15). Было указано, что афтершоковый процесс развивается по «мягкому сценарию» (зеленая линия на рисунке 14) и что опасный период уже, по-видимому, завершился. К настоящему моменту (на 10 декабря 2025 г.) эти выводы подтверждаются.



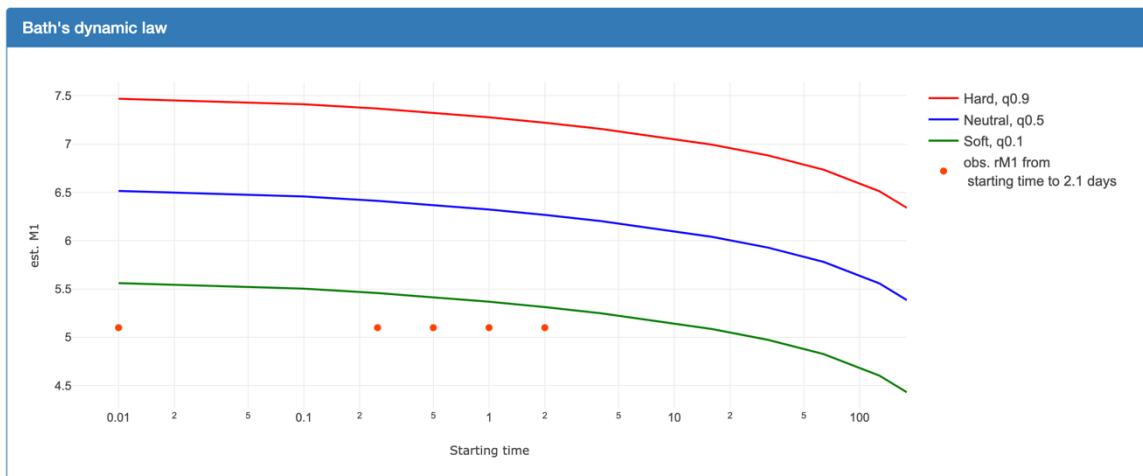


Рисунок 14 – Оценки максимальной магнитуды последующих афтершоков землетрясения 28 марта 2025 г. в Мьянме, отображавшиеся в системе AFCAST 02.04.2025 г. На верхней панели показана общая информация об основном толчке и афтершоков за первые 4 суток

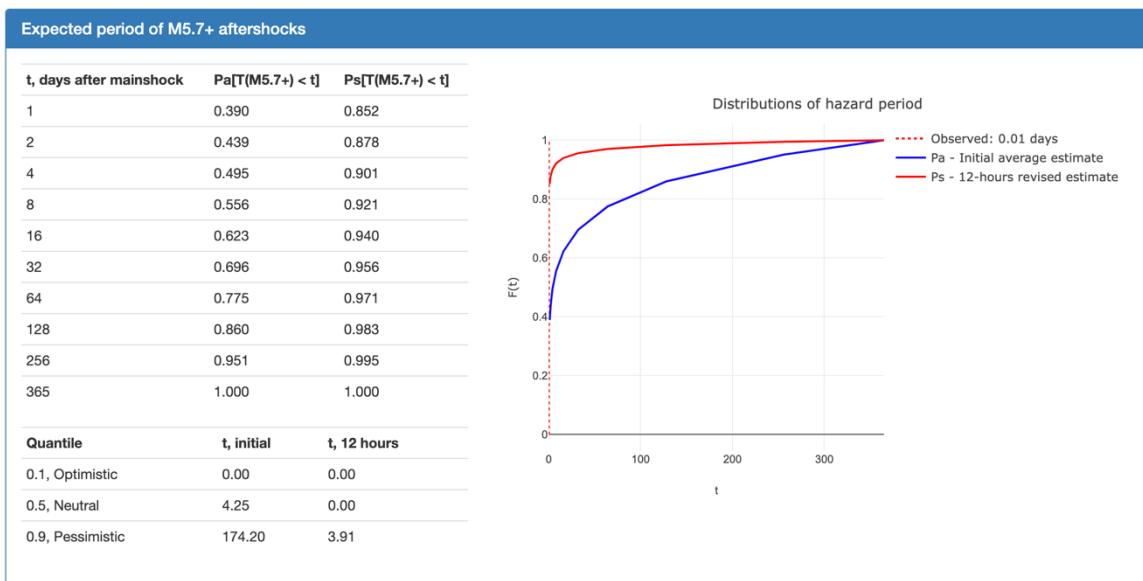


Рисунок 15 – Оценки ожидаемой длительности опасного периода афтершоков землетрясения 28 марта 2025 г. в Мьянме (магнитудой 5.7 или более), отображавшиеся в системе AFCAST 02.04.2025 г. По оценкам по данным за первые 12 часов уже через 4 суток после землетрясения с вероятностью 90% афтершоки магнитудой 5.7 и более уже не произойдут

### Землетрясение 29 июля 2025 г., M=8.8, на Камчатке

Автоматизированная система AFCAST отреагировала и на землетрясение 29 июля 2025 г., M=8.8, на Камчатке. Данные о работе системы на даты 16.08.2025 г. и 05.11.2025 г. были представлены в докладе [Шебалин и др., 2025b] 7 ноября 2025 г. (рисунок 16). В первые дни после землетрясения афтершоковый процесс развивался по «мягкому» сценарию, то есть магнитуды афтершоков были в среднем примерно на 0.5 меньше, чем в среднем бывает в соответствующие интервалы времени после землетрясений такой силы. 19 сентября

2025 г. произошел сильный афтершок магнитудой 7.8 на самом краю очаговой зоны основного землетрясения. В системе AFCAST это событие считается афтершоком по формальным основаниям, хотя многие специалисты склонны считать его самостоятельным землетрясением. Оно мгновенно «перевело» афтершоковый режим в «жесткий» сценарий, поскольку его магнитуда примерно на 0.5 больше, чем в среднем бывает в период через примерно 50 дней после основного события. Тем не менее, после этого события режим афтершоков вернулся в «мягкий» сценарий (рисунок 16, снизу).

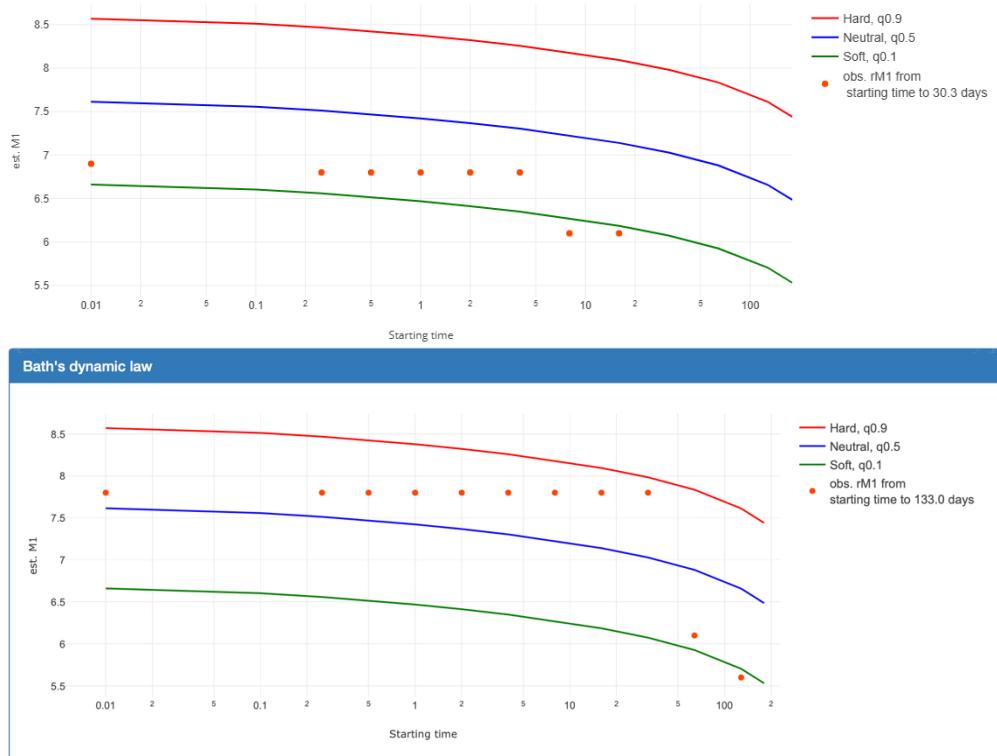


Рисунок 16 – Оценки максимальной магнитуды последующих афтершоков землетрясения по динамическому закону Бота 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$ , на Камчатке, отображавшиеся в системе AFCAST 16.08.2025 г. (сверху) и 10.12.2025 г. (снизу).

### 3 Исследование режимов сейсмичности в разных пространственных масштабах и в разных физических условиях

#### 3.1 Динамика сейсмичности в области сильных землетрясений

Продолжен анализ последовательностей сильных землетрясений с точки зрения их изменчивости и масштабных свойств, включая поведение контрольного параметра  $\eta$  общего закона подобия землетрясений (ОЗПЗ) [Filippova et al., 2025]. В частности, проведен анализ случаев четырех недавних землетрясений на юге Аляски – 22 июля 2020 г.,  $Mw$  7.8 в 105 км к юго-юго-востоку от Перривилла, 19 октября 2020 г.,  $Mw$  7.6 в 97 км к юго-юго-востоку от

Сэнд-Пойнт, 29 июля 2021 г., Mw 8.2 в 99 км к юго-востоку от Перривилла и 16 июля 2023 г., Mw7.2 в 106 км к югу от Сэнд-Пойнт, которые произошли прямо на западном краю зоны разрыва Великого Аляскинского мегаземлетрясения 1964 г., Mw9.3 и внесли свой вклад в очевидную активизацию региона, начавшуюся с трех крупных землетрясений (24 января 2016 г., Mw7.1, 23 января 2018 г., Mw7.9 и 30 ноября 2018 г., Mw7.1) на его северных и южных границах [Bukchin et al., 2020]. Все семь землетрясений, по-видимому, произошли в результате разрыва погружающейся Тихоокеанской плиты прямо на границе или в пределах расширенной области очага Великого Аляскинского землетрясения 27 марта 1964 года (рисунок 17). Сложность мегаразлома заключается в том, что он представляет собой множественный разрыв нескольких сегментов погружающейся Тихоокеанской плиты, включая боковой переходной разлом вдоль блока Якутат на стыке Тихоокеанской и Северо-Американской плит. Особого внимания заслуживает очевидная реактивация этого региона на уровне значительных крупных землетрясений.

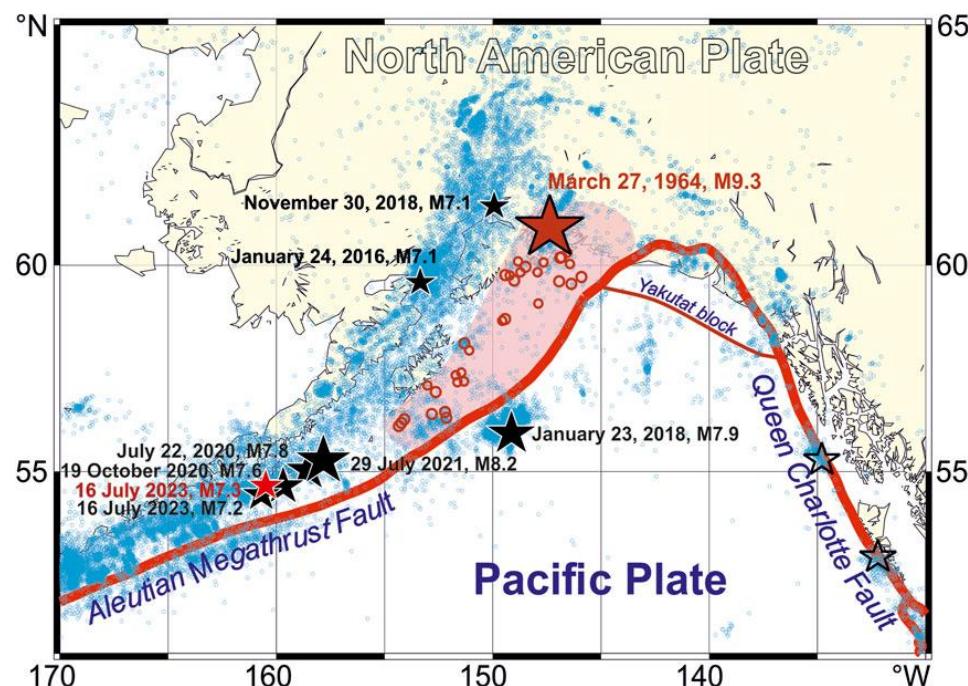


Рисунок 17 – Эпицентры землетрясений с магнитудой  $M \geq 2,5$  (ANSS, с 1 января 2006 г. по 11 ноября 2024 г.; маленькие синие кружки) и пять крупных землетрясений (чёрные звёздочки) на юге Аляски. Примечание: Красная линия отмечает границу Североамериканской и Тихоокеанской плит. Эпицентры Великого Аляскинского землетрясения 1964 года (большая красная звёздочка) и его первых афтершоков (красные кружки) показаны над зоной подземного разрыва (закрашена розовым). Землетрясение с магнитудой  $M 7,3$  в Сэнд-Пойнт, Аляска, 2025 года (красная звёздочка, ошибочно указан 2023 г. вместо 2025 г.) произошло 16 июля после подачи рукописи статьи [Filippova et al., 2025]

Аналогично работе [Bukchin et al., 2020], для каждого из четырех крупных землетрясений в 2020-2023 гг. проведен анализ средних значений управляющего параметра ОЗПЗ  $\eta$ , вычисляемого по формуле:

$$\eta = \tau 10^{B(5-M)} L^C,$$

где  $\tau$  это время между двумя последовательными землетрясениями,  $M$  является величиной второго, и  $L$  является расстоянием между ними;  $B$  и  $C$  – параметры общего закона подобия землетрясений (ОЗПЗ), который следующим образом обобщает соотношение Гутенберга-Рихтера [Kossobokov, 2021]:

$$\log_{10}N(M, L) = A + B(5 - M) + C \log_{10}L$$

где  $N(M, L)$  – количество землетрясений определенной магнитуды  $M$ , ожидаемых в течение года в сейсмоопасной зоне диаметром  $L$ ;  $A$  и  $B$  – константы, характеризующие годовую частоту событий магнитудой 5 и показатели магнитуды, аналогичные  $a$ - и  $b$ -значениям соотношения Гутенберга-Рихтера, а  $C$  – оценка фрактальной размерности эпицентров в заданной точке.

На рисунке 18 представлены данные за 128 дней до и 128 дней после основных толчков. Такой выбор временного интервала позволяет семикратно увеличить 1-дневный период, что подходит для анализа ускорения или замедления суточного ряда данных. Убывание параметра  $\eta$  для афтершоков следует, по-видимому, во всех четырех случаях степенному закону. На рисунке 19 приведены оценки параметров степенного распределения и соответствующие коэффициенты детерминации  $R^2$  как для самих значений параметра  $\eta$ , так и для их скользящего среднего  $\langle\eta\rangle$  по 50 последовательным значениям. Коэффициенты степенного закона Омори  $\langle\eta\rangle$  для афтершоков землетрясений 22 июля 2020 года магнитудой 7,8 и 29 июля 2021 года магнитудой 8,2, которые являются ближайшими по расположению из семи рассматриваемых событий, заметно совпадают. Очевидное выполнение функции  $\langle\eta\rangle$  в сериях афтершоков через 80, 30 и 35 дней после крупных землетрясений 24 января 2016 года магнитудой 7,1, 29 июля 2021 года магнитудой 8,2 и 16 июля 2023 года магнитудой 7,2 соответственно позволяет предположить, что в этих трёх из семи случаев прямое воздействие на локальную сейсмическую активность могло прекратиться раньше, независимо

от магнитуды землетрясения. С другой стороны, вышеупомянутая серия <η> землетрясений в Кадьяке в 2018 году продолжает расти в соответствии с законом Омори уже более 7 лет. Это землетрясение с подвижкой в 280 км к юго-востоку от острова Кадьяк магнитудой 7,9 произошло прямо перед южной границей зоны разрыва Великого Аляскинского землетрясения 1964 года магнитудой 9,3.

Table 3

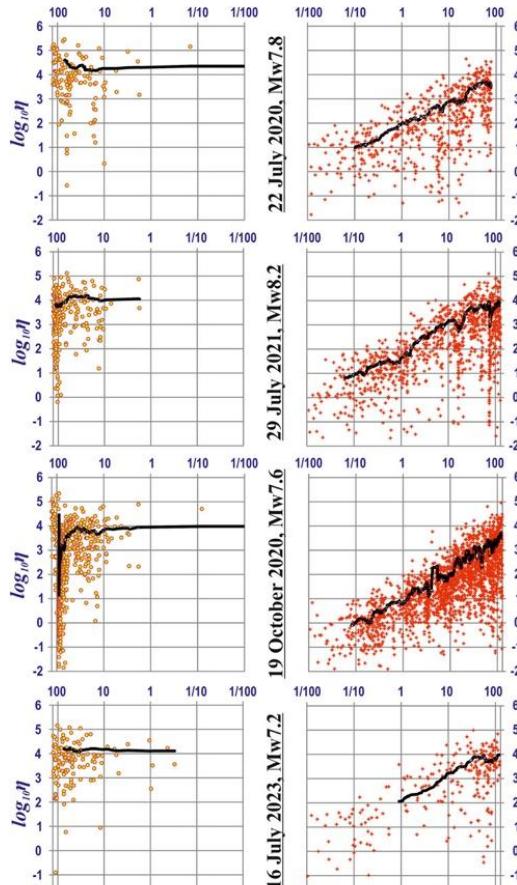


Рисунок 18 – Управляющий параметр ОЗПЗ  $\eta$  до (желтые круги) и после (красные точки) каждого из четырех землетрясений.

Время указано в днях до ( $t^* - t$ ) и после ( $t - t^*$ ) каждого крупного землетрясения,  $t^*$ .

Черная линия обозначает скользящее среднее по 50 последовательным значениям

Earthquake	$\eta(t - t^*) = a \times 10^{b \times (t - t^*)}$			$\langle \eta \rangle (t - t^*) = a \times 10^{b \times (t - t^*)}$		
	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
24 January 2016, Mw7.1	48.181	1.006	0.602	79.794	1.183	0.988
23 January 2018, Mw7.9	8.466	0.661	0.250	22.611	1.181	0.949
30 November 2018, Mw7.1	5.760	1.066	0.529	19.853	0.883	0.932
22 July 2020, Mw7.8	21.978	0.817	0.321	75.391	0.957	0.979
19 October 2020, Mw7.6	4.028	1.009	0.508	9.934	1.197	0.961
29 July 2021, Mw8.2	24.847	0.806	0.384	74.776	1.000	0.952
16 July 2023, Mw7.2	71.086	0.822	0.452	165.645	0.884	0.904

Рисунок 19 – Параметры аппроксимации степенным законом для параметра управления ОЗПЗ  $\eta(t - t^*)$  и его скользящего среднего  $\langle \eta \rangle (t - t^*)$  в первые 128 дней после возникновения основного толчка  $t^*$

Проведенный анализ последовательностей землетрясений на Юге Аляски в 2016-2023 годах [Bukchin et al., 2020] и [Filippova et al., 2025], по-видимому, еще раз подтверждает, что их возникновение не случайно, а скорее лишено какого-либо очевидного принципа организации. Поэтому наблюдаемая группа из семи крупных ( $Mw \geq 7$ ) землетрясений требует особого внимания и мониторинга продолжающейся сейсмической активности на северо-востоке Тихого океана, в частности с учётом вышеупомянутого продолжающегося развития сейсмического процесса на северной границе Тихоокеанской плиты.

В работе [Родкин и др., 2025] рассмотрены предвестниковые аномалии в очаговых зонах землетрясений 06.02.2023 г.  $Mw$  7.8 и 7.6 в Турции, проведено сравнение с аналогичными аномалиями в обобщенной окрестности сильных землетрясений перед мегаземлетрясениями на Суматре в 2004 г. и Тохоку в 2011 г. Для анализа первых двух землетрясений использованы данные регионального каталога землетрясений (доступен на сайте <https://deprem.afad.gov.tr>, магнитуды  $ML$ ). Области афтершоков двух рассматриваемых сильных землетрясений (37.04 E, 37.29 N,  $Mw$  7.8) и (37.24 E, 38.09 N,  $Mw$  7.6), несмотря на близкое расположение их эпицентров, не перекрываются; области плотного расположения афтершоков этих землетрясений разделяются узкой полосой слабой сейсмичности (рисунок 20). Поэтому в работе раздельно анализируются землетрясения, расположенные в полигонах, соответствующих очаговым зонам этих землетрясений (рисунок 20). Начало первого сильного (Пазарджыкского) землетрясения произошло не на Восточно-Анатолийском

разломе, а на его оперяющем разломе (рисунок 20). Поэтому зона оперяющего разлома выделена в отдельную область (0 на рисунке 20).

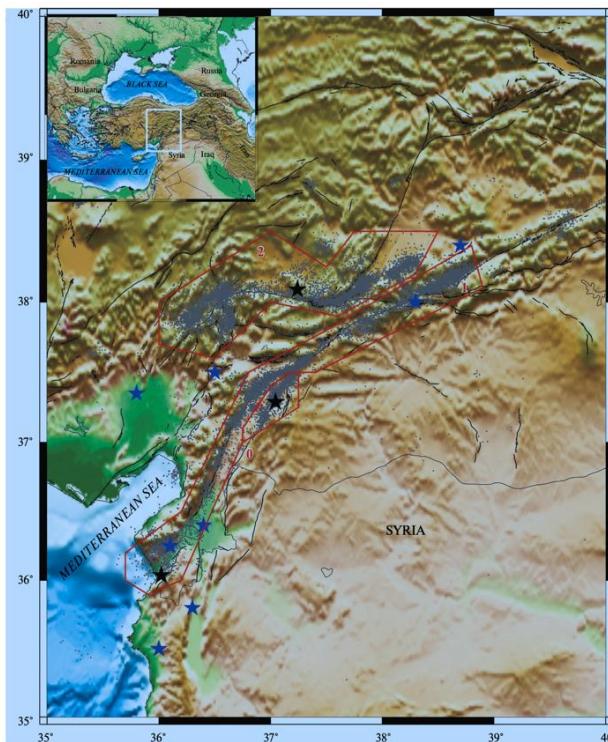


Рисунок 20 – Сейсмичность области дуплета турецких землетрясений 06.02.2023 г. ( $Mw$  7.8 и 7.6). Серые точки – очаги событий, произошедших в течение месяца после первого сильного события. Красные полигоны: область 0 – зона зарождения первого сильного землетрясения  $Mw$  7.8; область 1 – область развития этого события вдоль Восточно-Анатолийского разлома; область 2 – зона второго сильного землетрясения  $Mw$  7.6. Черные звездочки – сильные землетрясения ( $Mw$  7.8 и 7.6 и события  $Mw$  6.4, 20.02.2023 г.). Синие звездочки – сильные исторические землетрясения

Было проведено сравнение режимов развития фор- и афтершоковой аномалий в областях 0, 1 и 2. На рисунке 21 показаны данные по режиму сейсмичности в областях 0 и 1. Расчеты параметров производились для групп из 7 последовательных по времени событий с перекрытием. Для области 0 число  $ML \geq 1.7$  событий в форшковой области длительностью 100 дней равно 41. В обеих областях выявляется только одна предвестниковая аномалия, связанная с ростом текущих средних значений магнитуды. Аномалия не является статистически значимой.

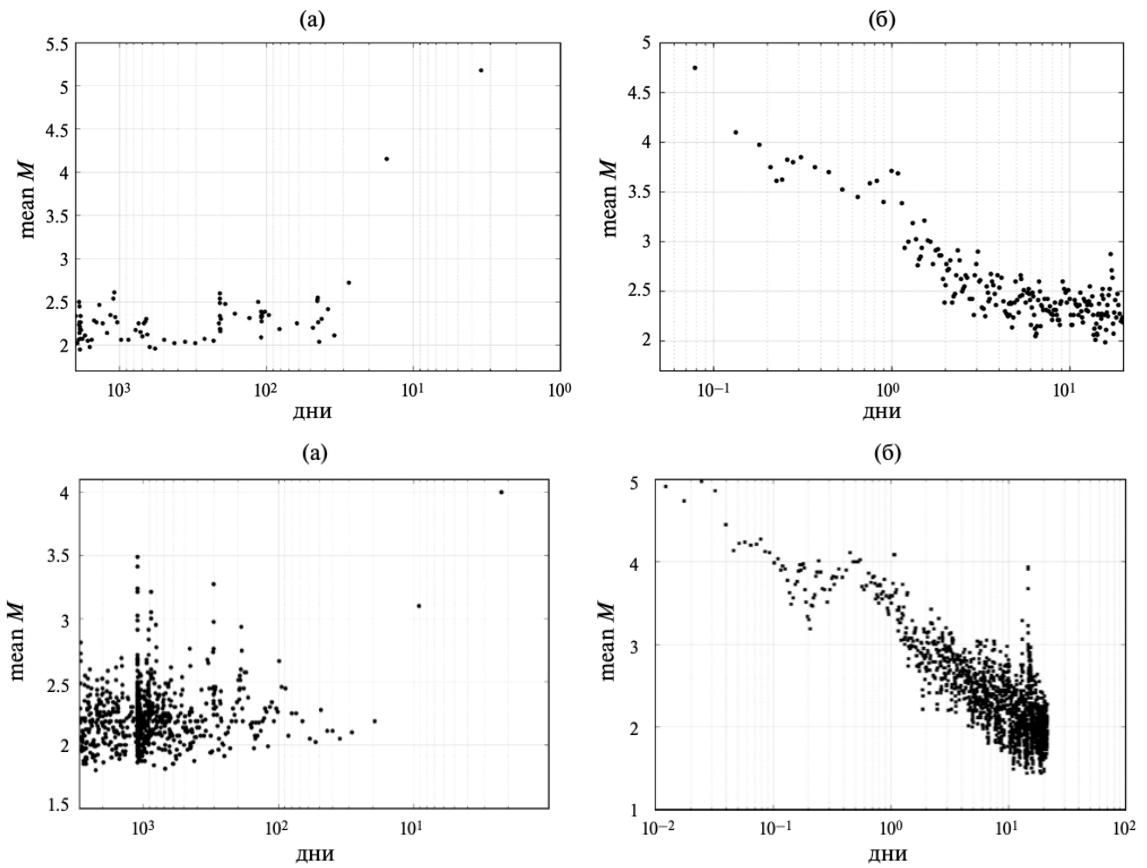


Рисунок 21 – Аномалии изменения величин магнитуды в области 0 (верхние панели) и 1 (нижние панели); форшоковая (а) и афтершоковая (б)

На рисунке 22 представлены аномалии для области 2. Близко соответствующие типовым ООСЗ-аномалиям особенности режима наблюдаются как для форшоковой и афтершоковой последовательностей числа событий, так и для текущих средних значений магнитуды. Аномалии изменения средней глубины событий, так же как и в двух предыдущих случаях, не наблюдается.

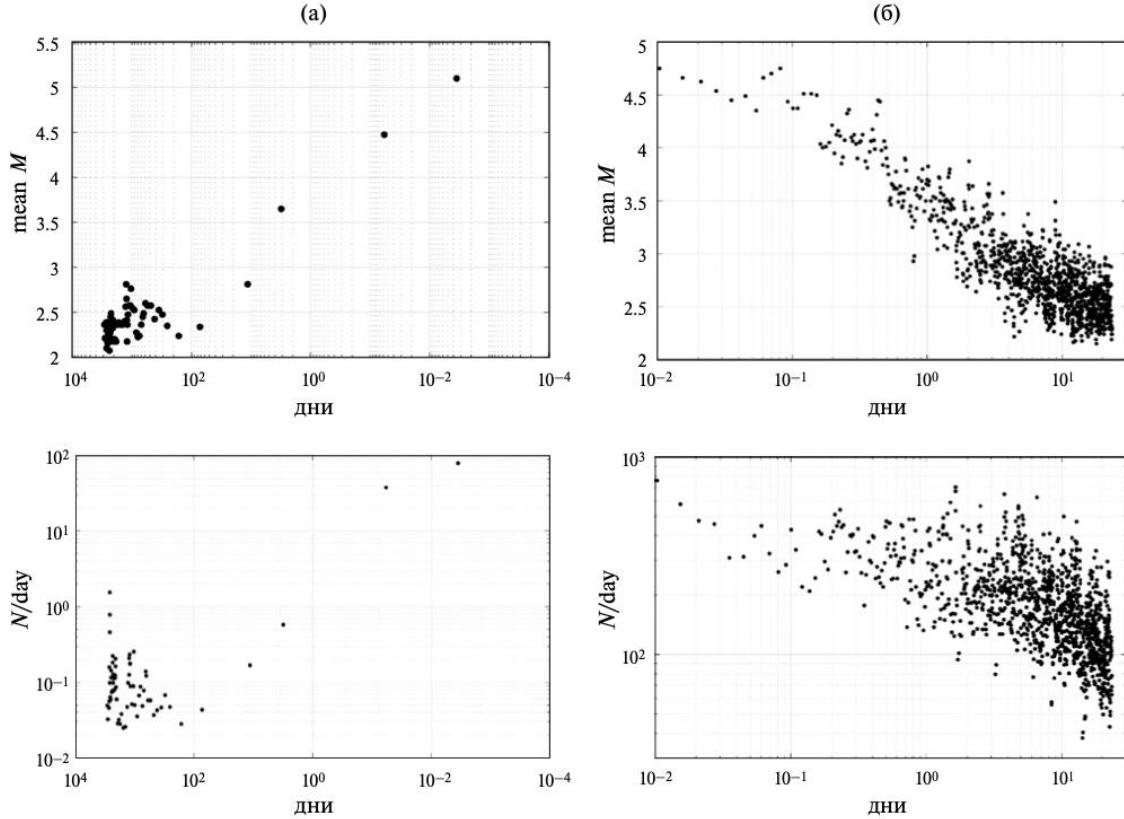


Рисунок 22 – Аномалии роста величин магнитуды и потока событий в области 2; форшоковая (а) и афтершоковая (б). Верхние панели – аномалии среднего значения магнитуды; нижние – интенсивности потока событий

Достаточно явственное развитие аномалий в очаговой области второго сильного землетрясения в определенной степени является неожиданностью. Это событие предполагалось инициированным предшествующим Пазарджыкским сильным землетрясением. Выявление предвестниковых аномалий указывает, что второе сильное землетрясение не было только инициированным, но также и подготавливалось.

Возникает вопрос, не являются ли форшоковые аномалии в области 2 случайностью. Было исследовано, насколько часто такого рода аномалии наблюдаются в режиме сейсмичности. С этой целью было проанализировано, насколько часто аналогичные аномалии возникают в сейсмическом режиме области 2 вне связи с этим сильным землетрясением (в случайные моменты времени). Была получена весьма низкая вероятность случайной реализации аномалии, подобной аномалиям на рисунке 22а.

Аналогичный анализ был проведен для окрестностей очагов мегаземлетрясений Андаманского и Тохоку,  $Mw$  9.0+ (рисунок 23). Текущие параметры режима сейсмичности рассчитывались ниже для последующих по времени групп из  $K = 13$  землетрясений. Тенденции степенного роста интенсивности потока фор- и афтершоков наблюдаются для

окрестностей обоих мегаземлетрясений. При этом исходная фоновая сейсмическая активность в области очаговой зоны Андаманского землетрясения была аномально низкой. Для очаговых областей двух мегаземлетрясений были рассмотрены также изменения изменению средней магнитуды. Форшоковая аномалия длительностью около 100 дней довольно определенно выделяется для мегаземлетрясения Тохоку и предположительно имеет место также и для Андаманского землетрясения. Ранее длительные аномалии уменьшения  $b$ -value перед землетрясением Тохоку отмечались в работах [Nanjo et al., 2012; Rodkin, Tikhonov, 2014].

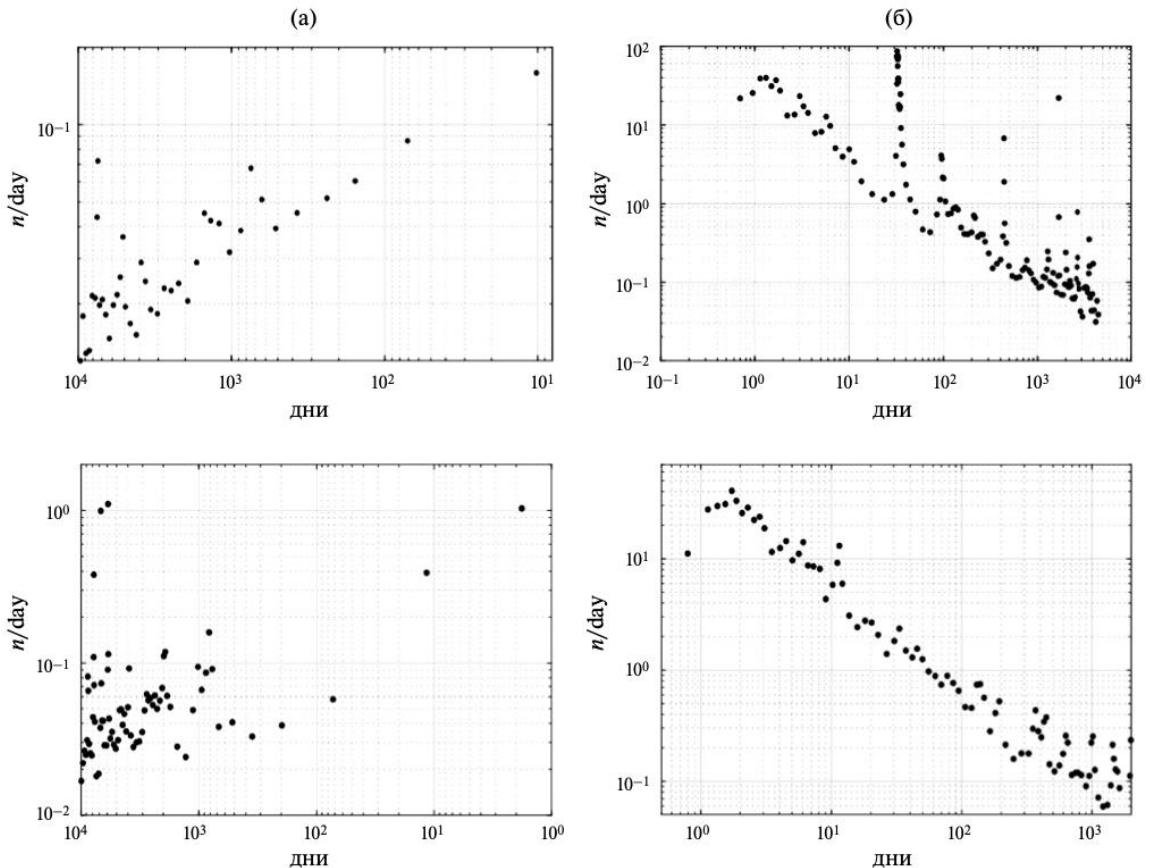


Рисунок 23 – Режим фор- и афтершоков Андаманского землетрясения (верхняя панель) и землетрясения Тохоку (нижняя панель); поток событий. Виден степенной рост потока событий к моменту обоих мегаземлетрясений

Таким образом, по крайней мере одна, а чаще несколько аномалий вполне однозначно наблюдаются в очаговой области каждого из 4 рассмотренных событий. Отсюда предварительно следует, что при использовании достаточно полных каталогов метод поиска ООСЗ-аномалий может оказаться перспективным для прогноза землетрясений. При этом представляется возможным сформулировать предварительные требования к полноте

используемого каталога. Магнитуда сильных турецких землетрясений составляет  $Mw$  7.5–7.8. Региональный каталог зоны Восточно-Анатолийского разлома полон на уровне  $M = 2$ . Магнитуда рассмотренных мегаземлетрясений  $Mw$  9.0+; каталог GCMT удовлетворительно полон для событий  $Mw$  5.0+. Разница между магнитудами целевых событий и полнотой используемого каталога в обоих случаях составляет 4–5 единиц магнитуды. Отсюда можно предположить, что такому соотношению и должен удовлетворять каталог, чтобы с высокой вероятностью обеспечить возможность идентификации прогнозных ООСЗ-аномалий при целевых сильных событиях магнитудой  $Mo+$ . А именно используемый для прогноза событий магнитуды  $Mo+$  каталог должен обеспечивать регистрацию событий не хуже ( $Mo-4$ ). Заметим, однако, что на данном этапе заведомо неясной остается доля ложных тревог; их может оказаться достаточно много, чтобы существенно обесценить такой прогноз в практическом отношении.

В работе [Родкин, Андреева, 2025] по данным регионального каталога Камчатки и Северных Курил КФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривается вопрос, насколько часто типовые усредненные аномалии статистически надежно выявляются в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений. За основу берется набор предвестниковых аномалий, ранее надежно выявленных в результате построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения: рост числа событий, увеличение средней магнитуды и уменьшение средней глубины гипоцентров землетрясений. Принимается во внимание различие физических механизмов разноглубинных землетрясений.

Рассматривался вопрос, насколько часто аномалии могут статистически надежно выявляться в очаговых областях отдельных сильных землетрясений. Для данного каталога по крайней мере одна аномалия (а чаще несколько) выявляется с помощью ООСЗ примерно для трети событий магнитудой  $M \geq 6.5$ . При этом вероятность получения ретроспективного прогноза конкретного землетрясения в решающей степени зависит от числа слабых землетрясений, зарегистрированных в его форшоковой области. При регистрации в форшоковой области 40 и более событий доля ретроспективно спрогнозированных сильных ( $M \geq 6.5$ ) событий приближается к 80%. Эти оценки и оценки эффективности ретроспективных прогнозов, исследованных ранее приведены в таблице 4. Тенденция к росту доли ретроспективно прогнозируемых событий подкрепляется результатами анализа для событий с  $M \geq 7.5$  по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT и для дублета сильных Турецких землетрясений 2023 г.

Таблица 4 – Доля ретроспективно “предсказанных” сильных событий

Каталоги	Число событий	Число выявленных аномалий	Число целевых событий с аномалиями	Доля “предсказанных” землетрясений, %
<i>Mировые</i>				$M \geq 7.5$
ISC-GEM (1904–2014)	414	75	23	4
GCMT (1976–2023)	117	40	14	12
<i>Камчатка – Северные Курилы (1962–2020)</i>				$M \geq 6.5$
	49	59	13	27
<i>Южная Турция (2015–2023)</i>				$M \geq 7.5$
	2	4	2	100

Как видно из таблицы 4, доля ретроспективно предсказанных землетрясений минимальна (всего 4%) для наименее полного каталога ISC-GEM, выше (12%) – для более полного каталога GCMT, еще выше (27%) – для регионального каталога Камчатки и Северных Курил. Такая тенденция дает возможность предположить, что доля ретроспективно прогнозируемых землетрясений в решающей степени зависит от числа слабых событий, зарегистрированных в форшоковой области данного сильного землетрясения.

### 3.2 Планетарное воздействие на глобальную сейсмичность

Исследована временная изменчивость сейсмичности в глобальном масштабе за последние 124 года, а также её потенциальные драйверы [Dumont et al., 2025]. Для этого была построена и проанализирована усреднённая глобальная кривая сейсмичности для землетрясений магнитудой 6,0 и более, начиная с 1900 года (рисунок 24) в сравнении с двумя глобальными геофизическими параметрами, связанными с земными приливами: вариациями продолжительности суток (LOD) и изменениями уровня моря в г. Брест, Франция (SL@B). Последний является репрезентативным показателем общего уровня океана, особенно в Северном полушарии. Эти три ряда были разложены с помощью сингулярного спектрального анализа (SSA), что показало, что они могут быть представлены в виде суммы семи квазипериодических компонентов, связанных с планетарными эфемеридами основных планет-гигантов, а также Солнца и Луны (таблица 5). В совокупности эти периоды составляют ~88% общей энергии сигнала сейсмических событий, ~89% вариаций LOD и 90% вариаций флюктуаций SL@B. Они включают в себя годовое колебание, квазидвухлетнее колебание (QBO), ~11-летний, ~14-летний, ~19-летний, ~33-летний и, наконец, ~60-летний псевдоциклы, все из которых, как известно, проявляются в различных геофизических явлениях. Показано, что они в основном находятся в фазовой квадратуре с планетарными

эфемеридами. Этот постоянный, точный фазовый сдвиг возникает, в частности, в решениях уравнения Лапласа в глобальной механике, в которых гидросфера, как известно, колеблется в квадратуре с вариациями LOD.

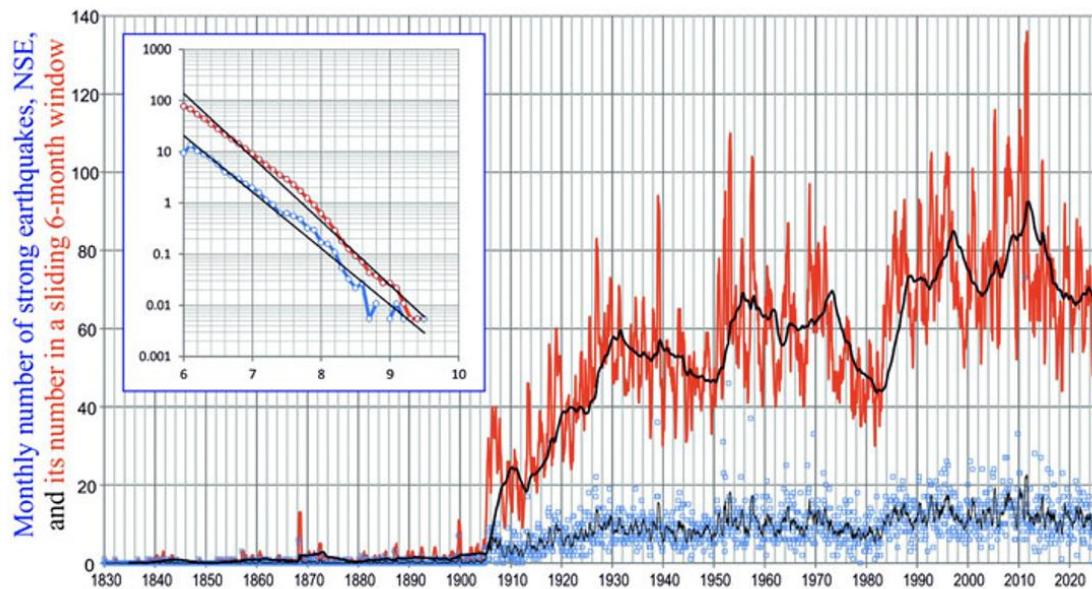


Рисунок 24 – Динамика изменения числа сильных землетрясений (с магнитудой 6,0 или более; NSE) в мире с 1830 года, извлеченная из базы данных USGS ANSS. Ежемесячный разброс NSE (синие квадраты) вместе с его 6-месячным средним значением (черная линия) и суммой (красная кривая) используются в качестве входных данных ССА; NSE в 5-летнем окне (жирная черная линия) показана только для информационных целей. На врезке представлены инкрементные (синий) и кумулятивные (красный) графики Гутенберга-Рихтера

Таблица 5 – Сводка псевдопериодов, обнаруженных и извлеченных из трёх наборов геофизических данных: NSE, LOD и SL@B. В последней строке указан процент сигнала, восстановленного с использованием перечисленных циклов

Число сильных землетрясений, NSE	Продолжительность суток, LOD	Уровень моря в Бресте, SL@B
$1.00 \pm 0.00$	$1.00 \pm 0.01$	$1.00 \pm 0.01$
$2.35 \pm 0.03$	$2.36 \pm 0.06$	
$11.36 \pm 0.57$	$11.80 \pm 1.21$	
$14.48 \pm 1.03$	$13.48 \pm 0.71$	$13.40 \pm 0.70$
$18.66 \pm 2.04$	$19.23 \pm 3.79$	$18.94 \pm 3.34$
$34.10 \pm 43.33$	$33.08 \pm 3.85$	$36.55 \pm 3.05$
$65.03 \pm 22.25$	$65.55 \pm 17.02$	
~88%	~89%	~90%

Обнаружение периодичностей в различных геофизических явлениях согласуется с гипотезой о внешнем воздействии, распространяющемся по всей Земле. Спектральный анализ, проведённый отдельно для океанических и континентальных землетрясений, выявил

очень похожие доминирующие периодичности, что позволяет предположить, что наблюдаемые модуляции носят глобальный характер и выходят за рамки локальных тектонических условий. Если бы в реакции разломов на эти длительные колебания преобладали локальные процессы, фазовый сдвиг, скорее всего, не был бы постоянным и не сохранялся бы с течением времени. Однако внешние гравитационные воздействия, будучи чрезвычайно слабыми, вряд ли сами по себе могут вызвать сильные землетрясения. Самые сильные приливы на Земле, имеющие лунно-солнечное происхождение, связаны с приливными напряжениями, которые на два-четыре порядка ниже прочности горных пород и разломов ( $\sim 101$ – $103$  МПа, [Scholz, 2019]). Таким образом, влияние других планет нашей Солнечной системы слабее, чем влияние Луны и Солнца, что ставит вопрос о том, как может происходить такое взаимодействие. Предлагается сценарий косвенного воздействия: планетарные угловые моменты, влияя на глобальные параметры, такие как вращение Земли и распределение массы океана, могут оказывать незначительное, но достаточное влияние на режим напряжений в земной коре, потенциально ускоряя или замедляя возникновение землетрясений при определённых условиях. В этом гипотетическом сценарии важная роль отводится флюидам в земной коре. Важно учитывать, что не все минералы находятся в термодинамическом равновесии с водой в условиях, в которых грунтовые воды хранятся в земной коре. Таким образом, грунтовые воды можно рассматривать как эволюционную систему, обеспечивающую термодинамический баланс между нестабильными и вновь образовавшимися, но уже стабильными минеральными фазами за счёт процессов растворения и осаждения. В основном это приводит к изменениям содержания воды, отражающимся на ионном балансе и составе (основные элементы, электропроводность), выделении CO<sub>2</sub>, окислительно-восстановительных условиях, уровнях pH и изменениях стабильных изотопных соотношений, таких как  $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ . Эти изменения, в свою очередь, влияют на поверхность минералов и свойства горных пород, особенно на пористость и проницаемость, что может сказать на внутренней стабильности породы. Разломы, как сложные пути движения флюидов, создают обширные поверхности для реакций растворения и осаждения, которые ослабляют или запечатывают структуру горных пород [Кочарян, Шатунов, 2024]. Это делает их более уязвимыми к разрывам даже при низкоамплитудных долгосрочных колебаниях, таких как межгодовые и десятилетние колебания. Можно отметить, что процесс растворения – сложное и нелинейное явление, поэтому не стоит ожидать, что сейсмичность в конкретном регионе будет напрямую зависеть от внешних сил. Однако в долгосрочной перспективе и с

глобальной точки зрения нет причин исключать такую возможность, и именно на это указывает проведенный анализ. Таким образом, это взаимодействие будет иметь два основных последствия: растворение минералов, которое ослабляет почву, и выделение газов.

### **3.3 Обобщение описания форшоковых и афтершоковых последовательностей**

В сейсмологии из практических и теоретических соображений весьма важно описание процессов форшоковой и афтершоковой активизации. Эмпирически установлена аналогия математических соотношений, описывающих характер прямого и обратного законов Омори-Утсу. Исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) выявили еще более тесную аналогию свойств форшоков и афтершоков. В качестве унифицирующей модели всего форшок–афтершокового процесса в работе [Богомолов и др., 2025] предложено использовать кинетические уравнения, имеющие решения в виде локализованных во времени сильно выраженных максимумов, называемых инстантонами (по аналогии с солитонами – локализованными волнами). Наглядный образ инстанtonного решения – график производной по времени от логистической зависимости, описывающей переходный процесс. Скорость такого процесса сначала значительно возрастает, достигает максимума, а затем асимптотически убывает до нуля.

Использование кинетических нелинейных уравнений, имеющих инстантонные решения, для моделирования потока сейсмических событий перед и после главного удара позволяет унифицировать описание форшоковых и афтершоковых последовательностей. Эти уравнения описывают временные зависимости, которые согласуются с наблюдаемыми форшок–афтершоковыми последовательностями в интервале длиной до 10 суток до и после главного события. С общефизической точки зрения непрерывные временные зависимости сейсмической активности с максимумом в момент главного события могут быть интерпретированы как то, что в зонах, существенно превышающих радиус очага, в среде реализуется процесс релаксации накопленной энергии. Инстантонное описание обобщает естественным образом модель саморазвивающихся процессов (СРП), в рамках которой была выделена стадия взрывного роста числа форшоков перед главным событием, имеющая значение как один из прогнозных признаков. Инстантонная модель для описания форшок – афтершоковых последовательностей имеет более узкий диапазон применимости (вблизи главного события) по сравнению с прямым и обратным законом Омори, она является скорее уточнением, но не альтернативой этим классическим результатам. Тем не менее эта модель, в особенности ее вариант, представленный выражением

$$n(t) = n_m \left( \frac{2t}{t_m} \right)^p / (1 + \frac{t^2}{t_m^2})^p,$$

где  $n_m$ -максимальное значение активности, которое достигается при  $t = t_m$ , имеет принципиальную теоретическую и методологическую значимость. Она подтверждает возможность “сквозного” описания сейсмической активности в окрестности сильного землетрясения, отражающего непрерывный во времени деформационный процесс (рисунок 25) [Богомолов и др., 2025].

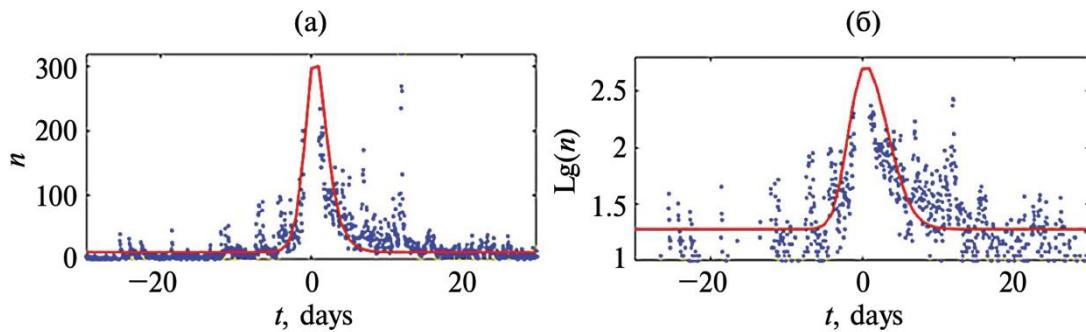


Рисунок 25 – Временная зависимость суточного числа форшоков и афтершоков в обобщенной окрестности сильных землетрясений для каталога юга о. Сахалин и ее аппроксимация (сплошная линия) с помощью инстанционного решения (15) с параметрами (а)  $f = 0.4$ ,  $a = 0.4$ ,  $n_m = 300$ ,  $A_f = A_a = 1$ ; (б) – та же зависимость и ее аппроксимация в логарифмическом масштабе на интервале  $\pm 10$  суток от главного события

### 3.4 Вулканическая сейсмичность

В работах [Греков и др., 2025; Греков, Шебалин, 2025] анализируется изменение режимов вулканической сейсмичности на примере извержения вулкана Августина 2006-го года на Аляске. В период длинного вулканического роя, предшествовавшего извержению, удалось выделить два процесса с разными режимами сейсмичности. Первый можно связать с общими радиальными деформациями, вызванными повышением давления в подземной магматической камере, такой режим имеет высокое значение параметра наклона магнитудно-частотного распределения и низкую степень кластеризации. Второй же процесс, предположительно, можно связать с интрузией по дайке и локальным разрушением пород под давлением дайки. Такой процесс характеризуется значением параметра наклона магнитудно-частотного распределения, близким к 1, и высоким уровнем кластеризации перед наиболее сильными событиями, за которыми следует затишье.

Была проанализирована сейсмичность вулкана Августина на Аляске в период перед извержением 2006-года, которое длилось с 11.01.2006 по 16.03.2006. [Jacobs, Mcnutt, 2010]. В

начале извержения с 11.01.2006 по 28.01.2006 наблюдалась взрывная вулканическая активность, а после 28.01.2006 началась продолжительная эруптивная фаза (постоянный выброс пепла), которая затем плавно перешла в эфузивную фазу (истечение лавы) в первую неделю февраля, а затем извержение завершилось экструзивной фазой, начавшейся 03.03.2006. Перед извержением выделяются два роя событий длинный (с 30.04.2005 по 10.01.2006) и короткий (длительностью 13 ч до 11.01.2006). Судя по изменениям активности и деформациям поверхности [Cervelli et al., 2006], этот период охватывает два процесса: сперва радиальные деформации и поднятие вулканической постройки, затем интрузия по дайке. Начальный период характеризуется высоким значением параметра наклона магнитудно-частотного распределения. С фазой интрузии связаны сильные аномалии и временные вариации наклона графика повторяемости [Jacobs, Mcnutt, 2010].

Для анализа были использованы данные каталога вулканической обсерватории Аляски (AVO), который покрывает период с 1989 по 2018 гг. За это время на вулкане произошло только одно извержение. События исследуемых длинного и короткого роев представлены на рисунке 26. Длинный рой разделен на две фазы. Вторая фаза примерно соответствует процессу начала интрузии магмы по дайке. Рассматриваются события непосредственно под вулканической постройкой, в пределах участка от  $-153.48$  до  $-153.40$  по долготе и от  $59.34$  до  $59.38$  по широте. Таким образом, в указанных пределах рассмотрены три интервала времени: две фазы длинного роя и период короткого роя. Для каждого из интервалов определены параметры серий сейсмических событий: число событий, параметр  $b$  закона Гутенберга-Рихтера, коэффициент  $k$ , оценивающий долю долю независимых событий от общего числа, максимальная наблюденная магнитуда  $M_{max}$  и средняя магнитуда  $\bar{M}$  (таблица 6). Анализ группирования сейсмических событий проводился по методу ближайшего соседа Залипина [Zaliapin, Ben-Zion, 2013].

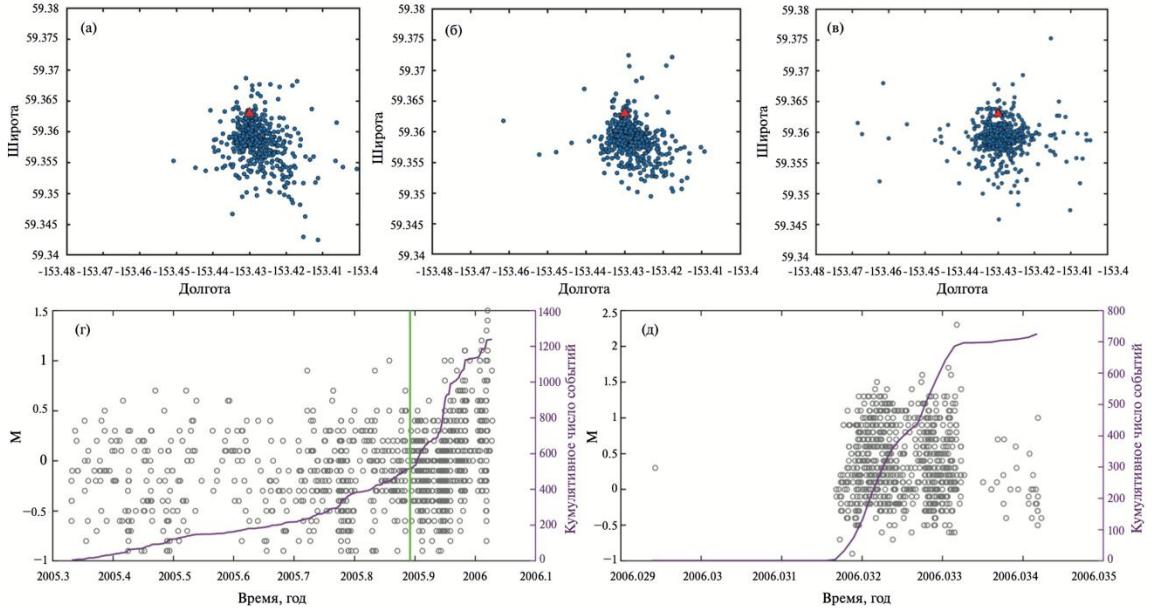


Рисунок 26 – Распределение событий выше порога представительности ( $Mc = 0.1$ ) в пространстве и времени для исследуемого участка. Пространственное распределение: (а) – для первой фазы длинного роя (до 21.11.2005), (б) – для второй фазы длинного роя (после 21.11.2005), (в) – для короткого роя. Синие кружки – эпицентры землетрясений, красный треугольник – примерное место извержения вулкана Августина 2006-го года. Распределение событий во времени: (г) – длинный рой, (д) – короткий рой. Кружки – моменты землетрясений, фиолетовая линия – кумулятивное число событий. Вертикальная линия соответствует дате 21.11.2005, разделяющей две фазы длинного роя

Таблица 6 – Параметры серий сейсмических событий трех рассмотренных интервалов

Фаза	Интервал	Число событий	$b$	$k$	$M_{max}$	$\bar{M}$
Первая фаза длинного роя	30.04.2005 – 21.11.2005	145	1.822	0.90	1	0.2766
Вторая фаза длинного роя	21.11.2005 – 10.01.2006	296	1.456	0.64	1.5	0.3412
Короткий рой	10.01.2006 – 12.01.2006	510	0.869	0.99	2.3	0.5998

Как оказалось, первый и третий интервалы характеризуются незначительным уровнем группирования событий (таблица 6). Второй интервал (период интрузии по дайке), напротив, можно охарактеризовать значительной степенью группирования событий. При этом, если выделить только независимые события, значения параметра наклона магнитудно-частотного распределения, средней и максимальной магнитуды (таблица 7) оказываются схожими со значениями, наблюдавшимися в первой части длинного роя до начала процесса интрузии (таблица 6). Это может говорить о том, что в течение всего длинного роя продолжался один и тот же процесс – давление сферического источника. Такой процесс имеет высокое значение

наклона графика повторяемости и относительно низкую максимальную магнитуду, то есть происходит много мелкомасштабных разрушений. Повышение же максимальной магнитуды во второй части длинного роя, видимо, вызвано другим процессом – интрузией магмы по дайке, которая вызывает уже локальное разрушение среды. Этот процесс имеет наклон графика повторяемости близкий к “классическому” значению для тектонической сейсмичности. Этот факт также позволяет частично объяснить наблюдающиеся перед извержением сильные вариации параметра  $b$ : сперва повышается давление в магматической камере, давая аномально большое значение  $b$ , затем ближе к извержению на это накладывается процесс интрузии, при котором значение  $b$  снижается, а степень группирования событий возрастает.

Таблица 7 – Параметры независимых и связанных событий второй фазы длинного роя

	$b$	$M_{max}$	$\bar{M}$
Кластеризованные	0.989	1.5	0.4401
Несвязанные	1.906	1.1	0.2726

Рассмотрим подробнее этот процесс (рисунок 27). Можно проследить следующую тенденцию: сперва происходит серия кластеров, в конце которой реализуется сильнейшее в серии событие, затем наблюдается затишье до начала следующей серии кластеров. Исключение составляет лишь четвертая серия (отмечено красной стрелкой на рисунок 27), в ней сильнейшее событие оказалось первым в серии.

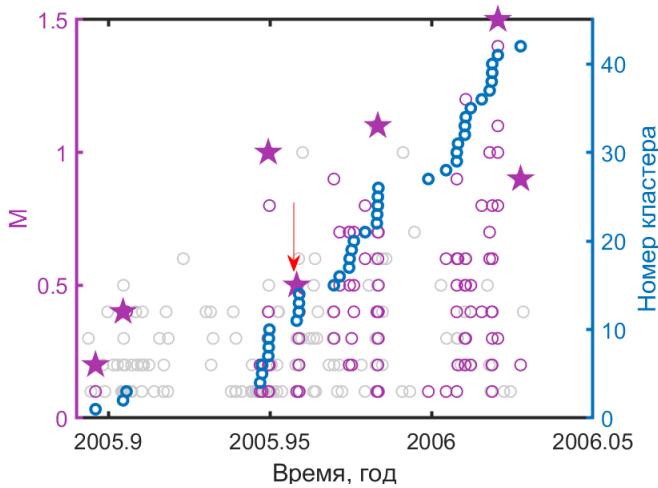


Рисунок 27 – Распределение кластеров второй фазы длинного роя во времени. Синие кружки – среднее положение событий кластера во времени, при этом значение по вертикали – порядковый номер кластера. Фиолетовые кружки – события, входящие в кластеры, серые – остальные, несвязанные события; фиолетовыми звездами показаны сильнейшие события в сериях кластеров. Красной стрелкой отмечена серия, выпадающая из общей закономерности

Если объединить кластеры в серии, получается в совокупности 98 форшоков и 32 афтершока. Таким образом, форшоковая активность преобладает над афтершоковой, в отличие от того, что обычно наблюдается в тектонической сейсмичности. Возможно, это вызвано тем, что в данной ситуации происходит вынужденное разрушение ещё не подготовленной среды под действием интенсивного внешнего источника, в то время, как образование афтершоков зависит от состояния среды и сформированной системы трещин. Также можно выделить ряд качественных тенденций: (а) чем больше магнитуда основного события, тем больше у него форшоков и тем больше их магнитуда; (б) чем больше магнитуда основного события, тем длиннее серия форшоков.

Можно предложить одну из возможных интерпретаций. Сам процесс интрузии неоднороден, какие-то участки проходят без сопротивления, а в каких-то местах встречаются «пробки». Чтобы сломать препятствие нужно накопить достаточное напряжение, зависящее от условной прочности этого препятствия (затишье между сериями). Когда накопленные напряжения достигают некоторого порогового значения, начинается процесс разрушения, причём он, видимо, происходит постепенно, а не мгновенно. Такой механизм соответствует, например, модели ЛНТ [Соболев, 2019]. Величина максимального толчка, вероятно, зависит от прочности препятствия, что влияет на длительность процесса разрушения и на количество и силу форшоков. Связь с количеством и силой форшоков, вероятно, тривиальна и следует из закона Гутенберга-Рихтера. Связь же с длительностью, видимо, характеризуется скоростью накопления напряжений и свойствами среды.

Анализ кластеров сейсмических событий (рисунок 28) показывает, что кластеры сами объединяются в серии. Наблюдаются тенденция: серия кластеров оканчивается сильнейшим событием, затем следует затишье, затем новая серия кластеров. Такая картина соответствует модели подготовки землетрясений в виде накопления напряжений с последующим разрушением, начинающимся с малых масштабов. Механизмом накопления напряжений в данном случае выступает интенсивное внешнее воздействие – давление магмы. Это, видимо, также приводит к преобладанию форшоковой активности над афтершоковой по сравнению с тектонической сейсмичностью.

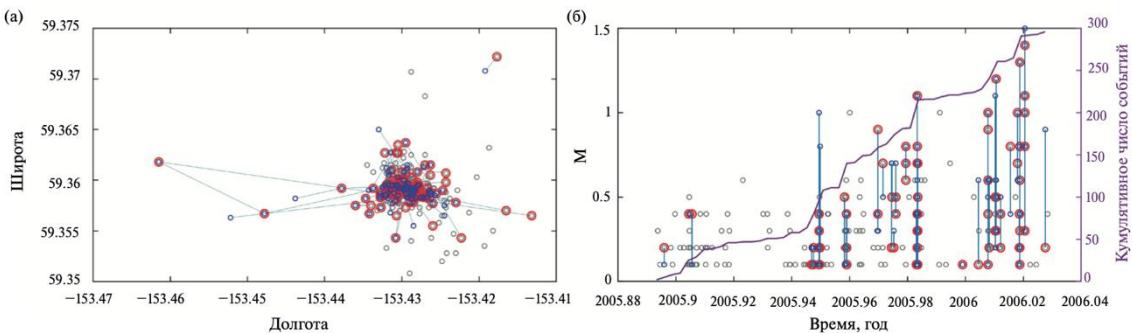


Рисунок 28 – Кластеры событий во второй фазе длинного роя: (а) – распределение в пространстве, (б) – во времени. Серые кружки – независимые события (функция близости относительно ближайшего соседа больше порога), синие – связанные события (функция близости меньше порога); красным обведены события, у которых есть “потомки” (т.е. связанные с ним события), синими линиями показаны связи между событиями в кластерах

### 3.5 Индуцированная (вызванная) сейсмичность

Проблема вызванной (индукционной) сейсмичности имеет важный как практический, так и теоретический аспект. Практический аспект связан с опасностью вызванной сейсмичности. В ряде случаев опасность сильной вызванной сейсмичности приводила к закрытию важных промышленных проектов. Теоретический аспект связан с известным парадоксом сейсмичности, о невозможности реализации обычных землетрясений на глубинах более нескольких десятков километров. Отсюда следует, что физика вызванных, как правило, приповерхностных землетрясений может отличаться от физики большинства более глубоких событий. Рассмотрены примеры ряда областей вызванной сейсмичности, представляющих собой как окрестности крупных водохранилищ, так и области интенсивной добычи углеводородного и рудного сырья. Во всех рассмотренных районах, более или менее определенно, выявляется ряд общих тенденций. После роста вызванной сейсмичности, даже и при продолжающемся сильном техногенном воздействии, наблюдается тенденция спада сейсмической активности. Также, методом анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), для зон вызванной сейсмичности выявляется близость интенсивности фор- и афтершокового процесса, что контрастирует со случаем обычной сейсмичности, для которой активность афтершокового процесса обычно много сильнее. Можно предположить, что спад вызванной сейсмичности связан с разгрузкой исходных тектонических напряжений, а близость интенсивности фор- и афтершокового процесса указывает на отличие физического механизма вызванных приповерхностных землетрясений от обычных, более глубоких землетрясений.

В работе [Родкин, 2025] единообразным образом рассмотрен сейсмический режим ряда удовлетворительно обеспеченных статистическим материалом областей развития вызванной сейсмичности. Области представляют районы крупных водохранилищ, районы интенсивной добычи традиционных и сланцевых УВ и районы горнорудных предприятий. Во всех рассмотренных районах (таблица 8) более или менее определенно выявляется ряд общих тенденций.

Таблица 8 – Список рассмотренных локальных каталогов и их характеристики

Каталог	Число значимых событий	Диапазон магнитуд/классов $M_c - M_{max}$	Диапазон глубин, км	Отношение интенсивности потоков фор/афтершоков	Время активизации, дни
Койна	321	2–5	1–15	~ 0.3	50–100
Варна	538	2–5.1	1–13		
Гронинген	1238	0.9–3.6	1–3.5	~ 1	~ 100
Оклахома	6368	2.7–5.8	0–29	~ 0.6	~ 100
Жезказган	2576	3.0–7.6	мелкие	~ 2	~ 100
Северо-Уральский рудник	1536	3.5–8.6	до ~ 4.5	~ 1	~ 10
Сев. Кизеловский 1983–1998	5391	$Lg(E, Дж)$ 4.5–7.7	до ~ 4	~ 1	

После роста вызванной сейсмичности, даже и при продолжающемся сильном техногенном воздействии, в рассмотренных случаях наблюдается тенденция спада сейсмической активности. Для всего интервала времени роста и спада сейсмической активности характерна тенденция роста величин наклона графика повторяемости землетрясений, эпизодически нарушаемая всплесками сейсмичности с реализацией более сильных событий и времененным уменьшением величин *b-value* (на рисунке 29). Тенденция роста величин наклона графика повторяемости отвечает уменьшению вероятности реализации сильных опасных событий.

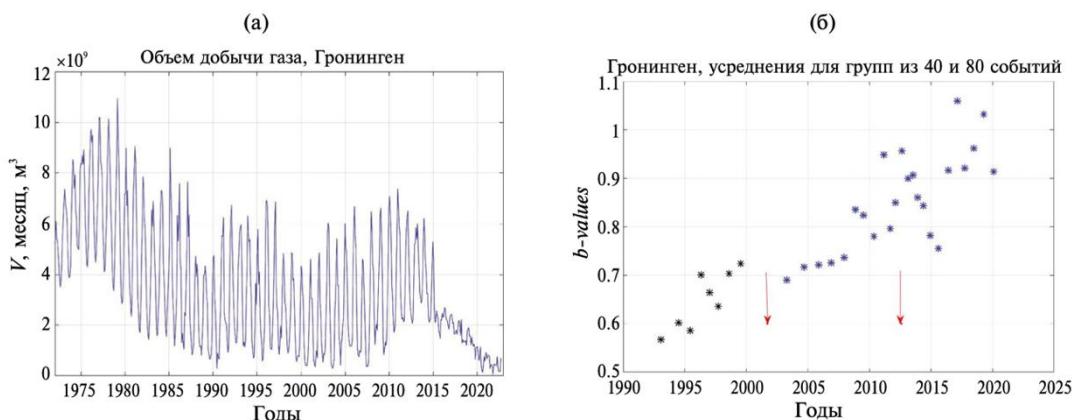


Рисунок 29 – Добыча газа на месторождении Гронинген (а), изменение интенсивности потока значимых событий и тенденция роста *b-value* (б). Стрелками на рисунке 29б даны

сильнейшие события  $M = 3.6$ ,  $M = 3.5$ . цвет точек отражает осреднение по группам из разного числа событий; для начального периода времени, с меньшим потоком событий, размер группы меньше

Следующий за ростом сейсмической активности спад числа значимых событий наблюдался и при уменьшении техногенной нагрузки, и при продолжающемся сильном техногенном стрессе (рисунок 30). Можно предположить, что спад вызванной сейсмичности может быть связан как с уменьшением техногенной нагрузки (по коммерческим соображениям или из-за опасности вызванной сейсмичности), так и с релаксацией естественных тектонических напряжений. Восстановление последних в условиях стабильных чрезвычайно медленно деформируемых внутриконтинентальных областей, видимо, должно происходить достаточно медленно. Реализация относительно более сильных землетрясений имеет тенденцию происходить на большем расстоянии и с большей задержкой по времени, чем основная масса вызванных землетрясений. По-видимому, это связано с распространением техногенно инициированных фронтов возмущения состояния геосреды до близлежащих разломных зон, нагруженных тектоническими напряжениями. Отсюда, с одной стороны, опасность вызванной сейсмичности выше, чем это предполагается в рамках широко используемой методики уменьшения риска вызванной сейсмичности “Семафор”, ориентированной на снижение опасности от землетрясений, реализующихся в непосредственной близости от зон техногенного воздействия. С другой стороны, с течением времени, видимо, следует ожидать развития описанного выше общего спада вызванной сейсмичности.

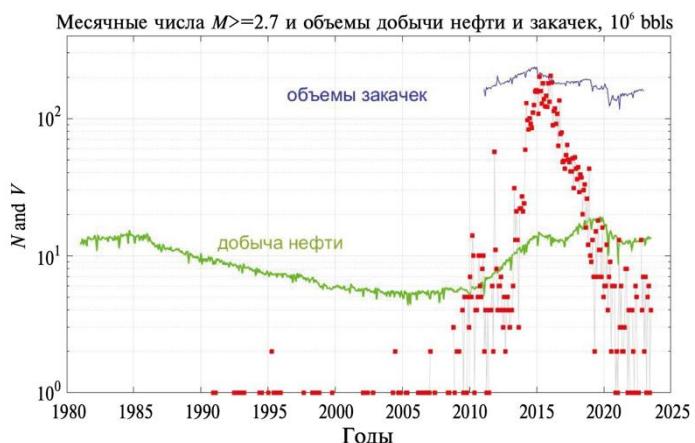


Рисунок 30 – Число значимых событий ( $M \geq 2.7$ , красные точки) в месяц и суммарные объемы добычи нефти и закачек в районе интенсивной добычи сланцевых углеводородов и закачки отработанной воды в скважины, Оклахома, США

Построение обобщенной окрестности сильного события (ООСЗ) и для рассмотренных районов вызванной сейсмичности, и для ранее рассмотренных результатов экспериментальных наблюдений акустической эмиссии показало развитие степенных фор- и афтершоковых каскадов, во многом аналогичных получаемым при анализе данных по разным каталогам землетрясений, см., например, рисунок 31. Однако для событий, реализующихся при нормальных условиях, и для сейсмичности верхнего горизонта земной коры (глубиной примерно до 10 км) наблюдается иное среднее соотношение числа фор- и афтершоков. Для обычных землетрясений максимальная интенсивность форшокового каскада в ООСЗ примерно на порядок меньше максимальной интенсивности афтершокового каскада. Для данным для акустической эмиссии и для событий верхнего горизонта земной коры максимальные интенсивности фор- и афтершокового каскадов оказываются близкими. Такое различие может отвечать разным условиям сейсмического разрушения в верхнем горизонте земной коры (в условиях субгидростатических давлений флюида) и для случаев сублитостатического флюидного давления в более глубоких горизонтах земной коры.

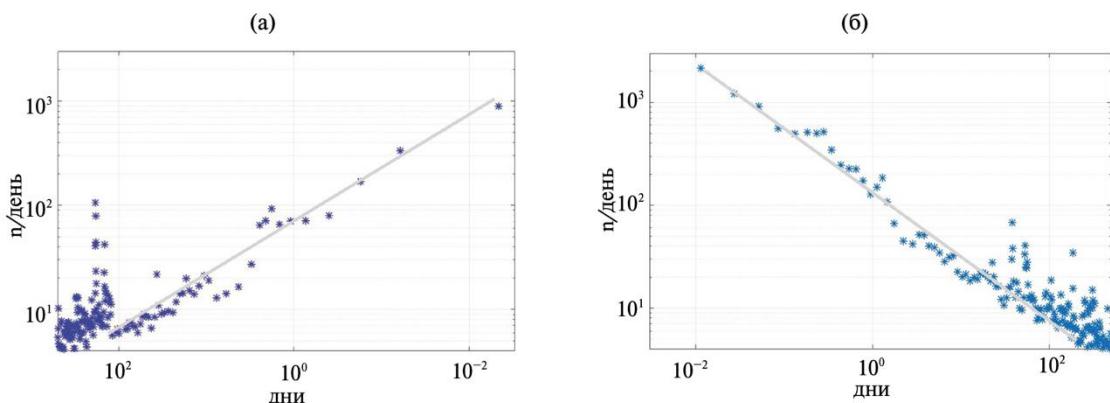


Рисунок 31 – Форшоковый (а) и афтершоковый (б) ООСЗ режимы, Оклахома

Полученные результаты требуют дополнительного подтверждения. На данный момент они представляются имеющими определенный практический интерес, указывая на вероятно имеющее место систематическое уменьшение вызванной сейсмичности при длительном сильном техногенном воздействии и на различие условий реализации сейсмических событий в верхней части земной коры (выше примерно 10–15 км) и в более глубоких ее горизонтах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работ по теме в 2025 году рассматривался широкий круг задач по разработке новых подходов к оценке сейсмической опасности; определению мест возможного возникновения сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах России и приграничных областей; исследованию и учету фактора времени в задачах оценки сейсмической опасности; исследованию, исследованию режимов сейсмичности в разных пространственных масштабах и в разных физически условиях. Выполненные по теме исследования являются существенным вкладом в решение задачи расчета и районирования опасности и риска природных катастрофических явлений с учетом фактора времени на основе моделирования сейсмического процесса.

В 2025 году выполнено комплексное исследование сильного ( $Mw=7.7$ ) землетрясения, произошедшего 28 марта 2025 г. в Мьянме. Среднесрочный прогноз по алгоритму M8, регулярно выполняемый ИТПЗ РАН, полностью оправдался: с 2021 г. район будущего очага стабильно входил в зону прогноза  $M7.5+$ , что было подтверждено очередным выпуском прогноза в январе 2025 г. Это демонстрирует высокую надежность разработанного в ИТПЗ РАН метода оценки сейсмической опасности, в то время как международные модели заметно недооценили риск для центральной Мьянмы на разломе Сагайн. Локальный ретроспективный анализ сейсмического режима за 25 лет подтвердил высокую вероятность события с  $M \geq 7.7$  в разлома Сагайн. Проанализирована афтершоковая активность после события.

Анализ сейсмического режима проведен и для землетрясений Камчатки. Были определены наиболее вероятные эпицентры следующих землетрясений магнитудой 7.7 и более на Камчатке. Эпицентр землетрясения 29 июля 2025 г.,  $M=8.8$  оказался недалеко от предполагаемого эпицентра. С помощью автоматизированной системы AFCAST проанализирована афтершоковая активность. В начале серии процесс развивался по «мягкому» сценарию: афтершоки были в среднем слабее, чем обычно бывает после мегаземлетрясений магнитудой 8.8. Несмотря на сильный афтершок 19 сентября 2025 г. магнитудой 7.7, после него продолжился «мягкий» сценарий афтершоковой активности.

Проведены исследования по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений с магнитудой 6 и более на основе морфоструктурного районирования сейсмоопасных регионов с выделением морфоструктурных узлов на Сахалине. Все узлы, в которых известны землетрясения с  $M6+$ , в результате распознавания отнесены к высокосейсмичному классу.

Для территорий Большого Кавказа, Алтай-Саяны и Прибайкалья выполнено совместное использование метода Распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений и Общего закона подобия для землетрясений. Синергия двух методов способствует более глубокому пониманию процесса возникновения землетрясений в рамках сложной нелинейной иерархически самоорганизованной системы разломов и блоков литосферы Земли.

Проведен анализ землетрясений на юге Аляски 2016-2023 гг. Показано, что группа крупных ( $M_w \geq 7$ ) землетрясений Аляски требует особого внимания и мониторинга продолжающейся сейсмической активности на северо-востоке Тихого океана, в частности с учётом продолжающегося развития сейсмического процесса на северной границе Тихоокеанской плиты.

Исследованы отдельные случаи вулканической и индуцированной сейсмичности.

Разработана Программа для ЭВМ для автоматического объединения двух каталогов событий с использованием модифицированного метода ближайшего соседа с последующей идентификацией и обработкой дублирующихся записей. Учитывая высокую прикладную значимость такой разработки, предполагается ее использовать для широкого круга исследований.

Полученные в 2025 г. результаты явились важным этапом создания методов расчета и районирования опасности и риска природных катастрофических явлений с учетом фактора времени на основе моделирования сейсмического процесса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности З. Динамический Закон Бота // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129-136.
2. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В. Автоматизированная оценка опасности афтершоков землетрясения в Турции 06.02.2023 г.,  $M_w$  7.8\* // Физика Земли. 2023. № 6. С. 133-141. DOI:[10.31857/S0002333723060042](https://doi.org/10.31857/S0002333723060042).
3. Баранов С.В., Винберг Ф.Э., Владимира И.С., Воробьева И.А., Кособоков В.Г., Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д., Некрасова А.К., Стеблов Г.М., Филиппова А.И., Фомочкина А.С., Шебалин П.Н. Прогноз сейсмической и геодинамической обстановки до и после землетрясения 28 марта 2025 г., M7.7, в Мьянме // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 523. № 2. С. 311-321. DOI:[10.31857/S2686739725080161](https://doi.org/10.31857/S2686739725080161) EDN:CERDHY.
4. Богомолов Л.М., Родкин М.В., Сычев В.Н. Инстанционное представление форшок-афтершоковых последовательностей // Физика Земли. 2025. № 2. С. 43-57. DOI:[10.31857/S0002333725020045](https://doi.org/10.31857/S0002333725020045) EDN:DLIACW.
5. Воробьева И.А., Шебалин П.Н., Малютин П.А., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А. Объединенный каталог землетрясений Российской Арктики, 1962–2024 гг. // Вулканология и сейсмология. 2025а. № 6. С. 3–17.
6. Воробьева И.А., Малютин П.А., Шебалин П.Н. Автоматизированный метод объединения каталогов землетрясений с дублирующей идентификацией // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025б. Т. 524. № 2. С. 302-309. DOI:[10.7868/S3034506525100153](https://doi.org/10.7868/S3034506525100153) EDN:CMLGIT.
7. Воробьева И.А., Малютин П.А. Программа для ЭВМ «Программа автоматического объединения каталогов землетрясений с идентификацией дублей». Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ №2025666532.
8. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзебоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: [10.31857/S0002333720010044](https://doi.org/10.31857/S0002333720010044).
9. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320

10. Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335. DOI: 10.7868/S0869565218090219.
11. Греков Е.М., Шебалин П.Н. Анализ группирования вулканической сейсмичности по данным извержения вулкана Августина 2006-го года // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 4. Article ES4005. DOI:10.2205/2025ES001025 EDN:XPILAB.
12. Греков Е.М., Шебалин П.Н., Смирнов В.Б. Два типа сейсмической активности перед извержением вулкана Августина 2006-го года на Аляске // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 521. № 1. С. 98-106. DOI:10.31857/S2686739725030121 EDN:FTSXIN.
13. Емельянов И.В., Некрасова А.К. DDLAFS – плагин QGIS для оценки доминирующих направлений системы локальных активных разломов // Геоинформатика. 2022. № 4. С. 54–62. DOI:10.47148/1609-364X-2022-4-54-62.
14. Кочарян Г.Г., Шатунов И.В. Актуальные вопросы гидрогеологии сейсмогенных разломных зон // Физика Земли. 2024. № 4. С. 182–211.
15. Кревсун Д.А., Некрасова А.К., Прохорова Т.В. ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). – М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 88-89.
16. Крушельницкий К.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В., Антипова А.О. Границы применимости закона Гутенберга-Рихтера в задачах оценки сейсмической опасности и риска // Физика Земли. 2024. № 5. С. 69-84. DOI:[10.31857/S0002333724050058](https://doi.org/10.31857/S0002333724050058) EDN:EJZGGD.
17. Некрасова А.К., Горшков А.И., Кособоков В. Г. Синергия независимых методов для мониторинга сейсмического режима // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). – М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 119-121.
18. Новикова О.В., Горшков А.И., Семка М.А., Ливинский А.И. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений (M6+) на Сахалине // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). – М.: ИТПЗ РАН, 2025.

19. Родкин М.В. О режиме вызванной сейсмичности // Физика Земли. 2025. № 2. С. 145-157. DOI:10.31857/S0002333725020127 EDN:DMUUQV.
20. Родкин М.В., Андреева М.Ю. О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2025. № 2. С. 62-72. DOI:10.31857/S0203030625010053 EDN:GIQKQG.
21. Родкин М.В., Ирмак Т.С., Таймаз Т., Липеровская Е.В. Типовые предвестниковые аномалии дуплета Кахраманмарашских турецких землетрясений 06.02.2023 г. Mw 7.8 и 7.6 и мегаземлетрясений андаманского (Суматра) и Тохоку (Япония) Mw 9.0+ // Физика земли. 2025. № 4. С. 50-62. DOI:10.31857/S0002333725040046 EDN:QIQKNF.
22. Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166-179. DOI:10.31857/S0002-333720191166-179.
23. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации Редакторы В.И.Уломов, Н.С.Медведева, 2014, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Earthquake-Catalog-CKZ.pdf>.
24. Харахинов В.В., Тузов И.К., Бабошина В.А., Терещенков А.А. и др. Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. М.: Национальный геофизический комитет РАН, 1996. 335 с.
25. Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзебоев Б.А. Закон повторяемости количества афтершоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 3. С. 320-323. DOI:10.31857/S086956520001387-8.
26. Шебалин П.Н. Землетрясение 28.03.2025 г. M 7.7 в Мандалае (Мьянма), пример сейсмологического анализа: сейсмическое районирование, заблаговременный прогноз, прогноз активности афтершоков, оценка опасности повторения // Совместное заседание Научного Совета РАН по изучению Арктики и Антарктики и Карельского научного центра РАН, 24–25 апреля 2025 года, г. Петрозаводск.
27. Шебалин П.Н., Баранов С.В., Воробьева И.А., Греков Е.М., Крушельницкий К.В., Скоркина А.А., Селюцкая О.В. О моделировании сейсмического режима в задачах оценки сейсмической опасности // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515. № 1. С. 95-109. DOI:10.31857/S268673972403012.

28. Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Горшков А.И., Стеблов Г.М., Баранов С.В., Скоркина А.А., Некрасова А.К., Владимирова И.С., Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д., Греков Е.М., Малютин П.А. Почему, что и как надо менять в действующих подходах к оценке сейсмической опасности? // Общемосковский тектонофизический семинар, Москва, 18 февраля 2025 г. DOI:10.31857/S2686739724030121, EDN: HQDOAN. 2025a.
29. Шебалин П.Н., Молчан Г.М., Горшков А.И., Стеблов Г.М., Желиговский В.А., Подвигина О.М., Новиков Р.Г., Кособоков В.Г., Воробьева И.А., Скоркина А.А., Некрасова А.К., Владимирова И.С., Ландер А.В., Крушельницкий К.В., Молокова А.П., Греков Е.М., Малютин П.А. Задачи математической геофизики в ИТПЗ РАН // Третья конференция Геофизика и математика. Екатеринбург, 7 ноября 2025 г. 2025b.
30. Bachmanov D., Trifonov V., Kozhurin A., Zelenin E. Active Faults of Eurasia Database AFEAD v2022. 2022. DOI:10.13140/RG.2.2.25509.58084.
31. Baranov S., Narteau C., Shebalin P. Modeling and Prediction of Aftershock Activity // Surveys in Geophysics. 2022. V. 43. № 2. P. 437-481. DOI:[10.1007/s10712-022-09698-0](https://doi.org/10.1007/s10712-022-09698-0).
32. Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing the Foreshock, Main Shock, and Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018 // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. Article 584659. DOI:10.3389/feart.2020.584659.
33. Cervelli P.F., Fournier T., Freymueller J., Power J.A. Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L18304. DOI:10.1029/2006GL027219.
34. Dumont S., de Bremond d'Ars J., Boulé J-B., Courtillot V., Gèze M., Gibert D., Kossobokov V., Le Mouël J-L., Lopes F., Neves M.C., Silveira G., Petrosino S., Zuddas P. On a planetary forcing of global seismicity // Frontiers in Earth Science. 2025. V. 13. Article 1587650. DOI:10.3389/feart.2025.1587650.
35. Filippova A., Fomochkina A., Kossobokov V., Nekrasova A. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2020–2024 // Frontiers in Earth Science. 2025. V. 13. Article 1660221. DOI:10.3389/feart.2025.1660221.
36. Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T., Pagani M., Adams J., Danciu L. et al. Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. e2019RG000653. DOI:10.1029/2019RG000653.

37. Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. Recognition of earthquake prone areas // In: Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (Eds.) Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction, Springer, Heidelberg. 2003. P. 239-310. DOI: 10.1007/978-3-662-05298-3\_6.
38. Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // U.S. Geol. Surv. Open-File Report. 1992. 92-401, 23 p. with 6 Appendices. DOI:10.3133/ofr92401.
39. Hurukawa N., Maung P.M. Two seismic gaps on the Sagaing Fault, Myanmar, derived from relocatin of historical earthquakes since 1918 // Geophysical Research Letters. 2010. V. 38. L01310.
40. Jacobs K., Mcnutt S. Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006 // US Geological Survey Professional Paper. 2010. P. 59–75.
41. Keilis-Borok, V.I. and Kossobokov, V.G. Premonitory activation of seismic flow: algorithm M8 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 61. P. 73–83. DOI:10.1016/0031-9201(90)90096-G.
42. Kossobokov V. Unified Scaling Law for Earthquakes that Generalizes the Fundamental Gutenberg-Richter Relationship // In: Gupta H.K. (eds) Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. 2021. P. 1893-1896. DOI: 10.1007/978-3-030-58631-7\_257.
43. Kossobokov V.G. How to Win at Seismic Roulette // Journal of the Geological Society of India. 2025. V. 101. № 6. P. 855-860. DOI:10.17491/jgsi/2025/174173. Kossobokov V.G. Erratum: How to Win at Seismic Roulette // Journal of the Geological Society of India. 2025. V. 101. № 8. P. 1297. DOI:10.17491/jgsi/2025/174239.
44. Kossobokov V.G., Mazhkenov S.A. On similarity in the spatial distribution of seismicity // In Chowdhury DK, Biswas NN, et al. (Eds.), Computational seismology and geodynamics. 1994. V. 1, P. 6–15. American Geophysical Union. DOI:10.1029/CS001p0006.
45. Kossobokov V.G., Nekrasova A. Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region // Natural Hazards. 2018a. V. 93. P. 1435–1449. DOI: 10.1007/s11069-018-3359-z EDN: WYAEHK
46. Kossobokov V.G., Nekrasova A. Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea // Journal of Seismology. 2018b. V. 22. P. 1157–1169. DOI: 10.1007/s10950-018-9759-4 EDN: AHFOSS

47. Molchan G.M. Earthquake prediction as a decision-making problem // Pure and Applied Geophysics. 1997. V. 149. P. 233–247. DOI:10.1007/BF00945169.
48. Molchan G., Peresan A., Varini E. 2025a. Number of Aftershocks in Epidemic-Type Seismicity Models and in Reality // EGU General Assembly 2025. 27 April–2 May 2025 Vienna, Austria.
49. Molchan G., Peresan A., Varini E. 2025b. Productivity as an indicator of the cascade property of aftershocks // International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng  $M7.3$  Earthquake 8-11 July, 2025 , Shenyang, Liaoning, China.
50. Molchan G., Peresan A., Varini E. 2025c. Epidemic character of aftershock clusters: a statistical analysis // The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science (JCSDS 2025). 11-13 July, 2025, Hangzhou,China.
51. Nanjo K.Z., Hirata N., Obara K., Kasahara K. Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. № 20. DOI:10.1029/2012GL052997.
52. Nekrasova A., Kossobokov V. Seismic risk assessment for the infrastructure in the regions adjacent to the Russian Federation Baikal–Amur Mainline based on the Unified Scaling Law for Earthquakes // Natural Hazards. 2023. V. 116. P. 1995-2010. DOI:[10.1007/s11069-022-05750-9](https://doi.org/10.1007/s11069-022-05750-9).
53. Panza G.F., Kossobokov V.G., Laor E., De Vivo B. (Eds.), 2022. Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather than Cure. Elsevier, Amsterdam.
54. Rodkin M.V., Tikhonov I.N. Seismic Regime in the Vicinity of the 2011 Tohoku Mega Earthquake (Japan,  $Mw = 9$ ) // Pure Appl. Geophys. 2014. V. 171. Iss. 12 P. 3241–3255. DOI: 10.1007/s00024-013-0768-5.
55. Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge University Press. 2019. DOI:10.1017/9781316681473.
56. Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. Iss. 2. P. 1264–126913. DOI: 10.1093/gji/ggaa252.
57. Tapponnier P., Peltzer G., Le Dain A.Y., Armijo R., Cobbold P. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine // Geology. 1982. 10 (12). 611–616. DOI:10.1130/0091-7613.

58. Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C., Beauducel F., Nercessian A., Clouard V., Bouin M.P. Multiscale mapping of completeness magnitude of earthquake catalogs // Bull. Seism. Soc. Am. 2013. V. 103. № 4. P. 2188-2202. DOI:10.1785/0120120132.
59. Vorobieva I., Gvishiani A., Dzeboev B., Dzeranov B., Barykina J., Antipova A. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs // Frontiers in Earth Sciences. 2022. V. 10. Article 820277. DOI:10.3389/feart.2022.820277.
60. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. V. 118. P. 2847–2864. DOI: 10.1002/jgrb.50179.
61. Zhang Y., Rugarli P., Romanelli F., Peresan A., Ji Zh., Jiang Ch., Kossobokov V.G., Panza G.F. The Mdesign for engineering applications of Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment (NDSHA) within the China Seismic Experimental Site (CSES) // Engineering Geology. 2025. V. 358. Article 108415. DOI:10.1016/j.enggeo.2025.108415.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А. Публикации по теме НИР в российских и международных журналах, входящих в Web of Science, Scopus, ядро РИНЦ**

1. Dumont S., de Bremond d'Ars J., Boulé J-B., Courtillot V., Gèze M., Gibert D., Kossobokov V., Le Mouël J-L., Lopes F., Neves M.C., Silveira G., Petrosino S., Zuddas P. On a planetary forcing of global seismicity // *Frontiers in Earth Science*. 2025. V. 13. Article 1587650. DOI:10.3389/feart.2025.1587650.
2. Filippova A., Fomochkina A., Kossobokov V., Nekrasova A. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2020–2024 // *Frontiers in Earth Science*. 2025. V. 13. Article 1660221. DOI:10.3389/feart.2025.1660221.
3. Kossobokov V.G. How to Win at Seismic Roulette // *Journal of the Geological Society of India*. V. 101. № 6. P. 855-860. DOI:10.17491/jgsi/2025/174173  
Kossobokov V.G. Erratum: How to Win at Seismic Roulette // *Journal of the Geological Society of India*. 2025. V. 101. № 8. P. 1297. DOI:10.17491/jgsi/2025/174239.
4. Zhang Y., Rugarli P., Romanelli F., Peresan A., Ji Zh., Jiang Ch., Kossobokov V.G., Panza G.F. The Mdesign for engineering applications of Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment (NDSHA) within the China Seismic Experimental Site (CSES) // *Engineering Geology*. 2025. V. 358. Article 108415. DOI:10.1016/j.enggeo.2025.108415.
5. Баранов С.В., Винберг Ф.Э., Владимирова И.С., Воробьева И.А., Кособоков В.Г., Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д., Некрасова А.К., Стеблов Г.М., Филиппова А.И., Фомочкина А.С., Шебалин П.Н. Прогноз сейсмической и геодинамической обстановки до и после землетрясения 28 марта 2025 г., М7.7, в Мьянме // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 523. № 2. С. 311-321. DOI:10.31857/S2686739725080161 EDN:CERDHY [Baranov S.V., Vinberg F.E., Vladimirova I.S., Vorobieva I.A., Kossobokov V.G., Krushelnitskii K.V., Matochkina S.D., Nekrasova A.K., Steblov G.M., Filippova A.I., Fomochkina A.S., Shebalin P.N. Forecast of Seismic and Geodynamic Settings before and after the Earthquake of March 28, 2025, M7.7, in Myanmar // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 523. № 2. Article 32. DOI:10.1134/S1028334X25607436 EDN:PJKUXI].
6. Богомолов Л.М., Родкин М.В., Сычев В.Н. Инстанционное представление форшок-афтершоковых последовательностей // *Физика Земли*. 2025. № 2. С. 43-57. DOI:10.31857/S0002333725020045 EDN:DLIACW [Bogomolov L.M., Rodkin M.V., Sychev V.N.

Instanton Representation of Foreshock–Aftershock Sequences // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2025. V. 61. № 2. P. 195-206. DOI:10.1134/S1069351325700144 EDN:GTPXYY].

7. Греков Е.М., Шебалин П.Н. Анализ группирования вулканической сейсмичности по данным извержения вулкана Августина 2006-го года // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 4. Article ES4005. DOI:10.2205/2025ES001025 EDN:XPILAB.

8. Греков Е.М., Шебалин П.Н., Смирнов В.Б. Два типа сейсмической активности перед извержением вулкана Августина 2006-го года на Аляске // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 521. № 1. С. 98-106. DOI:10.31857/S2686739725030121 EDN:FTSXIN [Grekov E.M., Shebalin P.N., Smirnov V.B. Two Types of Seismic Activity Prior to the 2006 Eruption of Augustine Volcano in Alaska // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 520. № 2. Article 45. DOI:10.1134/S1028334X24605273 EDN:RQEZKQ].

9. Родкин М.В. О режиме вызванной сейсмичности // Физика Земли. 2025. № 2. С. 145-157. DOI:10.31857/S0002333725020127 EDN:DMUUQV [Rodkin M.V. On the Behavior of Induced Seismicity // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2025. V. 61. № 2. P. 277-287. DOI:10.1134/S1069351325700235 EDN:DSMHCJ].

10. Родкин М.В., Андреева М.Ю. О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2025. № 2. С. 62-72. DOI:10.31857/S0203030625010053 EDN:GIQKQG [Rodkin M.V., Andreeva M.Y. On the Occurrence of Typical Precursory Anomalies in the Foreshock Areas of Some Large Earthquakes, Kuril-Kamchatka Region // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. V. 19. № 2. P. 163-171. DOI:10.1134/S0742046325700046 EDN:VILMGO].

11. Родкин М.В., Ирмак Т.С., Таймаз Т., Липеровская Е.В. Типовые предвестниковые аномалии дуплета Кахраманмарашских турецких землетрясений 06.02.2023 г. Mw 7.8 и 7.6 и мегаземлетрясений андаманского (Суматра) и Тохоку (Япония) Mw 9.0+ // Физика земли. 2025. № 4. С. 50-62. DOI:10.31857/S0002333725040046 EDN:QIQKNF [Rodkin M.V., Irmak T.S., Taymaz T., Liperovskaya E.V. Typical Precursor Anomalies of the February 6, 2023, Mw 7.8 and Mw 7.6 Kahramanmaraş Earthquake Doublet, Turkey, and the Mw 9.0+ Andaman-Sumatra and Tohoku, Japan Mega-Earthquakes // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2025. V. 61. № 4. P. 575-585. DOI:10.1134/S1069351325700569 EDN:EEMLKU].

12. Kossobokov V., Nekrasova A. Earthquake Forecast/Prediction: What's Next for Science? The edited book entitled "Reliable Seismic Hazard Assessment and Earthquake Engineering: a New Horizon" (on the 80th anniversary of Professor Giuliano F. Panza), CRC press, Taylor & Francis Group, USA. 2025. ISBN 978-1-041-11298-3. P.23-16.

13. Nekrasova A., Kossobokov V., Gorshkov A. Unraveling fractal characteristics of seismogenic nodes, The edited book entitled "Reliable Seismic Hazard Assessment and Earthquake Engineering: a New Horizon" (on the 80th anniversary of Professor Giuliano F. Panza), CRC press, Taylor & Francis Group, USA. 2025. ISBN 978-1-041-11298-3. P.33-43.

14. Воробьева И.А., Малютин П.А. Программа для ЭВМ «Программа автоматического объединения каталогов землетрясений с идентификацией дублей». Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ №2025666532.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Доклады по теме НИР на российских и международных конференциях**

1. Греков Е.М. Анализ сейсмического режима процесса интрузии перед извержением вулкана Августина 2006-го года// Двадцать шестая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. 210 с. С. 46-51, [http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/Сборник\\_УМНШГ-2025.pdf](http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/Сборник_УМНШГ-2025.pdf)
2. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Мифы о землетрясениях: Камо грядеши? // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., ИТПЗ РАН, Москва), с.84-85.
3. Кревсун Д.А., Некрасова А.К., Прохорова Т.В. ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., ИТПЗ РАН, Москва), с. 88-89.
4. Липеровская Е.В., Родкин М.В. Статистика сейсмоионосферных эффектов в F-области ионосферы для разноглубинных землетрясений: дополнительные данные для интерпретации // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., ИТПЗ РАН, Москва), с.95-96.
5. Молокова А.П. Изучение эффекта ближней зоны для вулканических землетрясений Ключевской группы вулканов // Двадцать шестая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. 210 с. С. 109-112., [http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/Сборник\\_УМНШГ-2025.pdf](http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/Сборник_УМНШГ-2025.pdf)
6. Некрасова А.К., Горшков А.И., Кособоков В. Г. Синергия независимых методов для мониторинга сейсмического режима // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., ИТПЗ РАН, Москва), с.119-121.
7. Родкин М.В. О прогнозе землетрясений на основе комплекса типичных предвестниковых аномалий: текущие результаты, трудности // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (22–23 октября 2025 г., ИТПЗ РАН, Москва), с.142-143.

8. Родкин М.В., Андреева М.Ю. Опыт массового ретроспективного прогноза землетрясений на основе типовых прогнозных аномалий, Камчатка – Курильские острова – Япония // Десятая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов". 28 сентября - 04 октября 2025 г., г. Петропавловск-Камчатский. Программа, тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский, 2025. С. 40.

9. Родкин М.В., Андреева М.Ю., Липеровская Е.В. Новый подход к прогнозу землетрясений на основе комплекса типичных предвестниковых аномалий // Десятая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов". 28 сентября - 04 октября 2025 г., г. Петропавловск-Камчатский. Программа, тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский, 2025. С. 40.

10. Родкин М.В., Прохорова Т.В. Новое о режиме вызванной сейсмичности // Труды VIII Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», Том II(III) [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2025. С. 99-103.

11. Родкин М.В., Прохорова Т.В., Рукавишникова Т.А. Особенности режима вызванной сейсмичности // Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 28 сентября – 04 октября 2025 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 156-160.

12. Родкин М.В., Прохорова Т.В., Рукавишникова Т.А. Тенденции изменения вызванной сейсмичности при продолжительном сильном антропогенном воздействии // Новые идеи в науках о Земле: в 9 т. Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». Т. 1: Геофизика, геоинформатика, математическое моделирование и искусственный интеллект в недропользовании. М.: Издательство МГРИ, 2025. С. 103-106. EDN:QCPTTT.

13. Шебалин П.Н. Землетрясение 28.03.2025 г. M 7.7 в Мандалае (Мьянма), пример сейсмологического анализа: сейсмическое районирование, заблаговременный прогноз, прогноз активности афтершоков, оценка опасности повторения // Совместное заседание Научного Совета РАН по изучению Арктики и Антарктики и Карельского научного центра РАН, 24–25 апреля 2025 года, г. Петрозаводск.

14. Шебалин П.Н. Эмпирические законы в сейсмологии: физическая интерпретация и применение // Научный совет РАН по проблемам геохимии, Москва, 22 мая 2025 г.
15. Шебалин П.Н. Долгосрочный прогноз землетрясений на Камчатке // Президиум РАН, 18 ноября 2025 г.
16. Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Горшков А.И., Стеблов Г.М., Баранов С.В., Скоркина А.А., Некрасова А.К., Владимирова И.С., Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д., Греков Е.М., Малютин П.А. Почему, что и как надо менять в действующих подходах к оценке сейсмической опасности? // Общемосковский тектонофизический семинар, Москва, 18 февраля 2025 г.
17. Шебалин П.Н., Молchan Г.М., Горшков А.И., Стеблов Г.М., Желиговский В.А., Подвигина О.М., Новиков Р.Г., Кособоков В.Г., Воробьева И.А., Скоркина А.А., Некрасова А.К., Владимирова И.С., Ландер А.В., Крушельницкий К.В., Молокова А.П., Греков Е.М., Малютин П.А. Задачи математической геофизики в ИТПЗ РАН // Третья конференция Геофизика и математика. Екатеринбург, 7 ноября 2025 г.
18. Kossobokov V., Liu T. Seismic Kaleidoscope // International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng M7.3 Earthquake, July 8–11, 2025 – Shenyang, Liaoning, China (S06. Modernized multidisciplinary methodology of operational earthquake forecast and seismic hazard assessment (M3 for OEF & SHA)).
19. Kossobokov V., Nekrasova A. Testing the M8 earthquake prediction algorithm: The 2025, M7.7 Myanmar earthquake // IAGA / IASPEI Joint Scientific Meeting 2025, 31 August – 5 September 2025, Lisbon, Portugal: Book of Abstracts. AS25-1464. Prague: CZECH-IN s. r. o., 2025. P. 1041.
20. Kossobokov V., Nekrasova A. Testing the M8 earthquake prediction algorithm: The 2025, M7.7 Myanmar earthquake // AGU25 Annual Meeting, 15 - 19 December 2025 in New Orleans, LA, USA, 1891451.
21. Kossobokov V., Nekrasova A. What do we know about earthquakes and their predictability? // International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng M7.3 Earthquake, July 8–11, 2025 – Shenyang, Liaoning, China (S011: Test sites and in-situ experiments for earthquake predictability: lessons and experiences) (INVITED).

22. Kossobokov V., Nekrasova A. Testing the M8 earthquake prediction algorithm: The 2025, M7.7 Myanmar earthquake // International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng M7.3 Earthquake, July 8–11, 2025 – Shenyang, Liaoning, China (S012. Earthquake scientific investigation, case studies, and earthquake prediction).
23. Krevsun D., Nekrasova A., Prokhorova T. GIS-Based Project for SHA using the Unified Scaling Law for Earthquakes, Lake Baikal Region case study // IAGA / IASPEI Joint Scientific Meeting 2025, 31 August – 5 September 2025, Lisbon, Portugal: Book of Abstracts. AS25-0097. Prague: CZECH-IN s. r. o., 2025. P. 1058 (стендовый доклад).
24. Molchan G., Peresan A., Varini E. Number of Aftershocks in Epidemic-Type Seismicity Models and in Reality // EGU General Assembly 2025. 27 April–2 May 2025 Vienna, Austria.
25. Molchan G., Peresan A., Varini E. Productivity as an indicator of the cascade property of aftershocks // International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng M7.3 Earthquake 8-11 July, 2025 , Shenyang, Liaoning, China.
26. Molchan G., Peresan A., Varini E. Epidemic character of aftershock clusters: a statistical analysis // The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science (JCSDS 2025). 11-13 July, 2025, Hangzhou, China (стендовый доклад).
27. Nekrasova A., Kossobokov V. Analyzing the recent major earthquakes in Southern Alaska // AGU25 Annual Meeting, 15 - 19 December 2025 in New Orleans, LA, USA. 2025. 1885202 (стендовый доклад).