

Формирование общей базы данных механизмов очагов для Курило-Камчатской зоны, сравнение оценок в разных источниках, определение приоритетов в выборе источника при дублировании данных;

Механизмы очагов землетрясений Курило-Камчатской зоны рассчитываются по разным методикам несколькими агентствами. Наиболее авторитетные и полные из них: оценки Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (далее КФ), USGS (Sipkin, 2002; Duputel et al., 2012), Global Centroid Moment Tensor (Dziewonski et al., 1981, Ekström et al., 2012) и Scardec (Vallée et al., 2011). В Таблице 1 приведена основная информация о количестве данных, имеющихся в этих агентствах для исследуемого региона, а на рис. 1 представлены эпицентры очагов землетрясений с определенным механизмом.

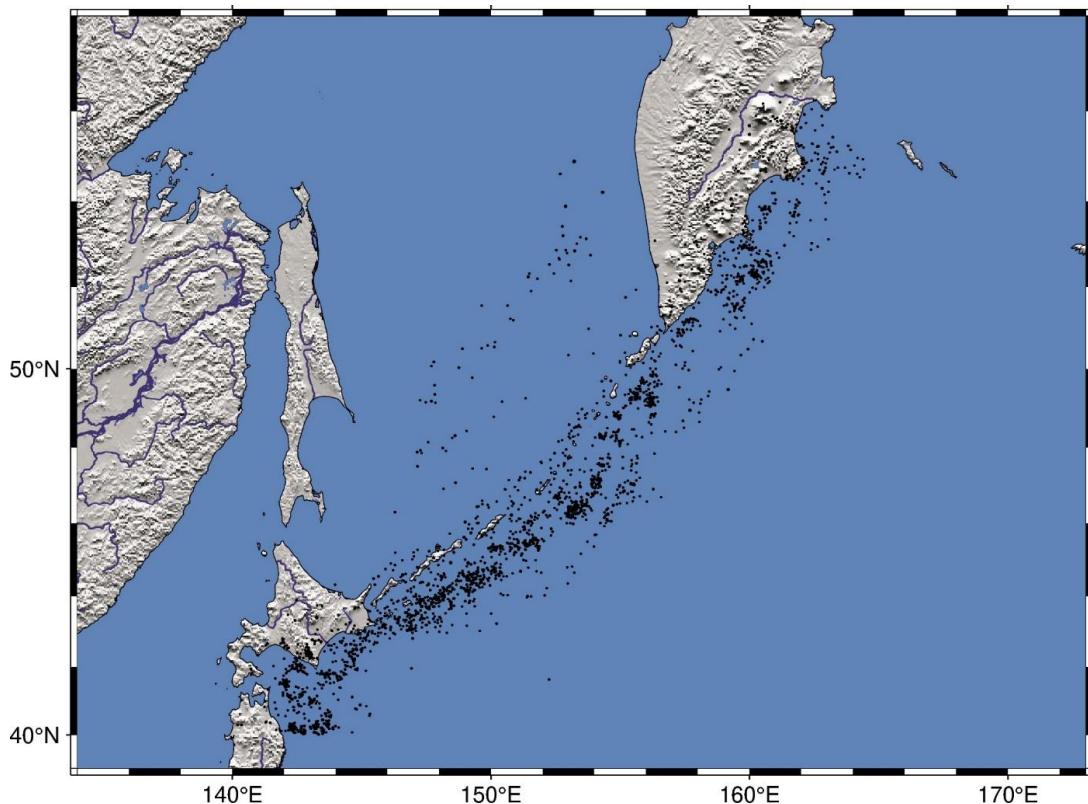


Рис. 1. Эпицентры землетрясений с определенными механизмами очагов.

Отметим, что оценки КФ ФИЦ ЕГС РАН получены двумя способами – по знакам первых вступлений объемных волн (с 1970 г.) и по региональной методике RSMT (Павлов, Абубакиров, 2021). Сопоставление механизмов по знакам первых вступлений с оценками классического подхода GCMT показал существенные различия неясной природы. Кроме того, сами сотрудники КФ рекомендуют к использованию оценки второго подхода (Раевская, Матвеенко, 2025), поэтому именно эти оценки будут анализироваться далее в проекте.

Таблица 1. Краткое описание имеющихся баз данных по механизмам очагов землетрясений Курило-Камчатской зоны субдукции.

| Агентство | Год начала каталога | Количество событий | Представительная магнитуда |
|-----------|---------------------|--------------------|----------------------------|
| КФ | 2010 | 495 | 4.5 |
| GCMT | 1976 | 2298 | 5 |

| | | | |
|---------|------|------|-----|
| USGS | 1991 | 1341 | 5 |
| SCARDEC | 1992 | 261 | 5.5 |

Таблица 2. Пересечение оценок по определению тензора сейсмического момента для землетрясений Курило-Камчатского региона.

| | КФ | GCMT | USGS | SCARDEC |
|---------|-----|------|------|---------|
| КФ | 495 | 151 | 69 | 36 |
| GCMT | — | 2298 | 1229 | 210 |
| USGS | — | — | 1341 | 178 |
| SCARDEC | — | — | — | 261 |

Данные разных агентств были сопоставлены по ряду параметров (рис. 2), в первую очередь, по геометрическим параметрам механизмов очага: угол падения (dip), угол простирации (strike) и угол сдвига (rake/slip).

Как видно из таблицы 2 максимальные пересечения имеют три глобальных каталога (GCMT, USGS, SCARDEC). Данные механизмы SCARDEC больше отличаются от каталога GCMT (рис. 3) в связи с другой методикой определения функции очага, в первую очередь, во временной области, поэтому на данном этапе работ этот каталог использовали в качестве дополнения к GCMT. Таким образом, при наличии решений нескольких агентств для одного землетрясения приоритет в итоговом каталоге отдается решению GCMT, затем КФ ФИЦ ЕГС РАН, который близок к GCMT, и является его «расширением в сторону меньших магнитуд», SCARDEC и USGS.

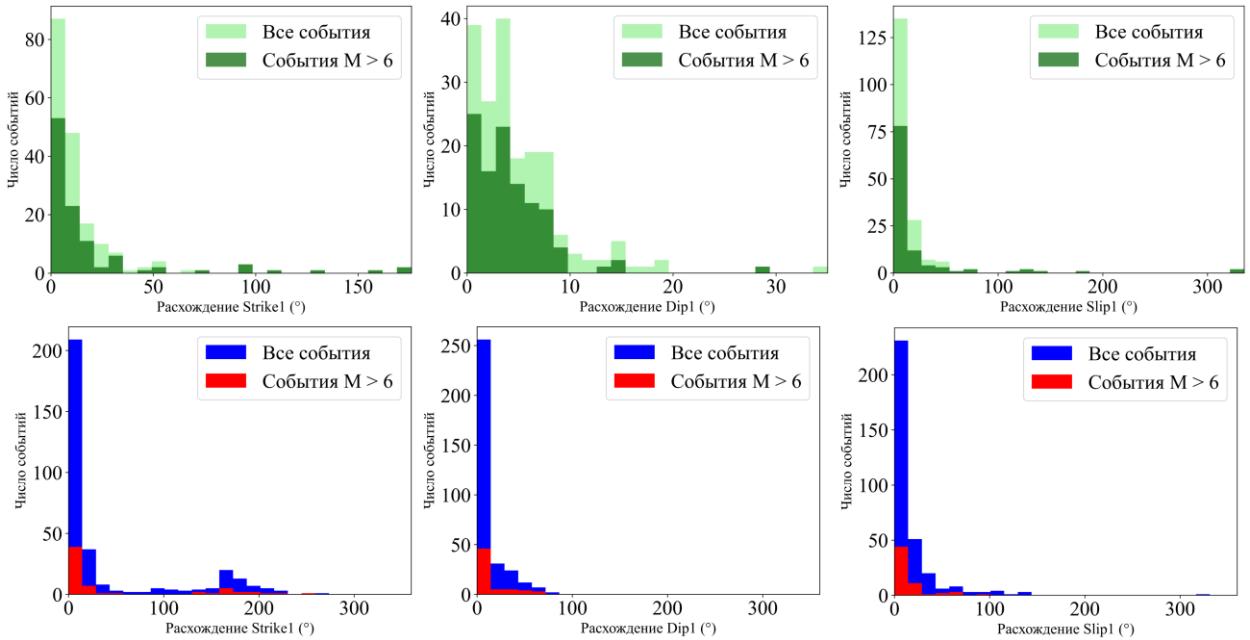


Рисунок 2. Распределение расхождений между оценками углов (dip, slip/rake, strike) для пар SCARDEC-GCMT (верхний ряд) и USGS-GCMT (нижний ряд).

Пространственный анализ расхождений оценок показал, что максимальные расхождения, в целом, распределены равномерно (рис. 3).

Difference: NP1 Rake

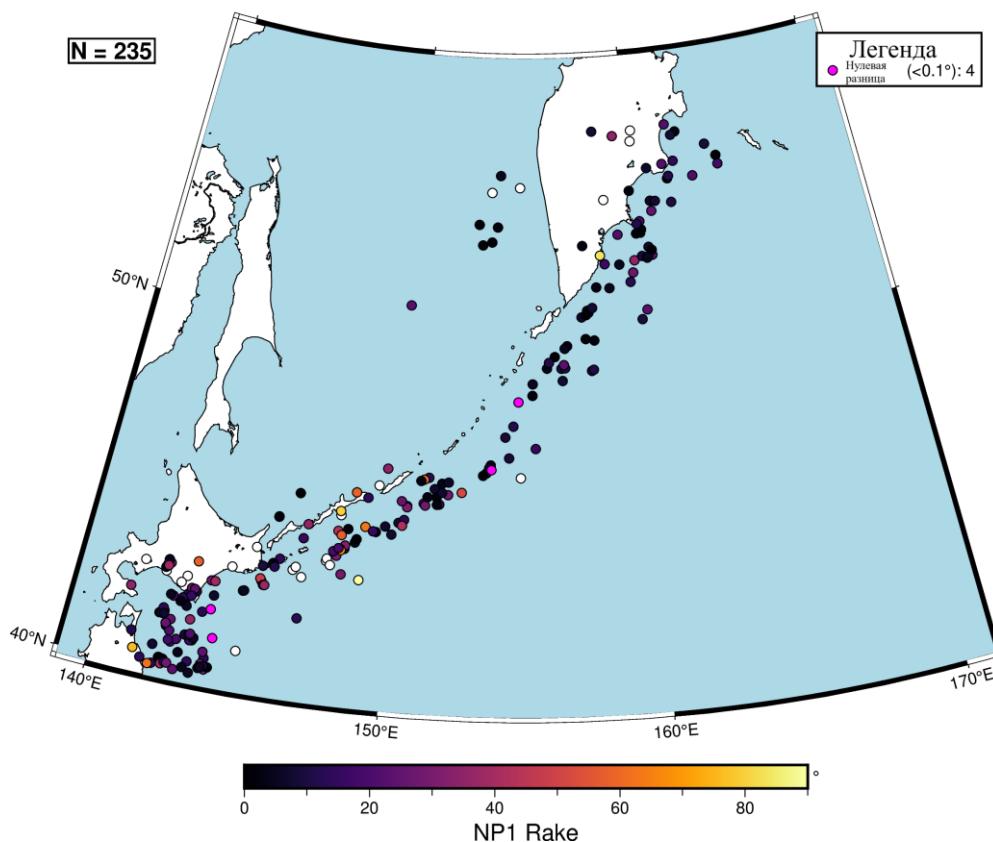


Рисунок 3. Пространственное распределение расхождений между оценками GCMT и USGS для параметра – угол сдвига (rake/slip), для землетрясений с $M > 6$.

Распределение по источникам в объединенном каталоге (рис. 4, 5):

RSMT: 328 событий (11,8%)

RSMT, Scardec: 16 событий (0,6%)

Scardec: 35 событий (1,3%)

GCMT: 960 событий (34,5%)

GCMT, RSMT: 80 событий (2,9%)

GCMT, RSMT, USGS: 51 событие (1,8%)

GCMT, RSMT, Scardec: 2 события (0,1%)

GCMT, RSMT, Scardec, USGS: 18 событий (0,6%)

GCMT, Scardec: 30 событий (1,1%)

GCMT, Scardec, USGS: 160 событий (5,7%)

GCMT, USGS: 997 событий (35,8%)

USGS: 106 событий (3,8%)

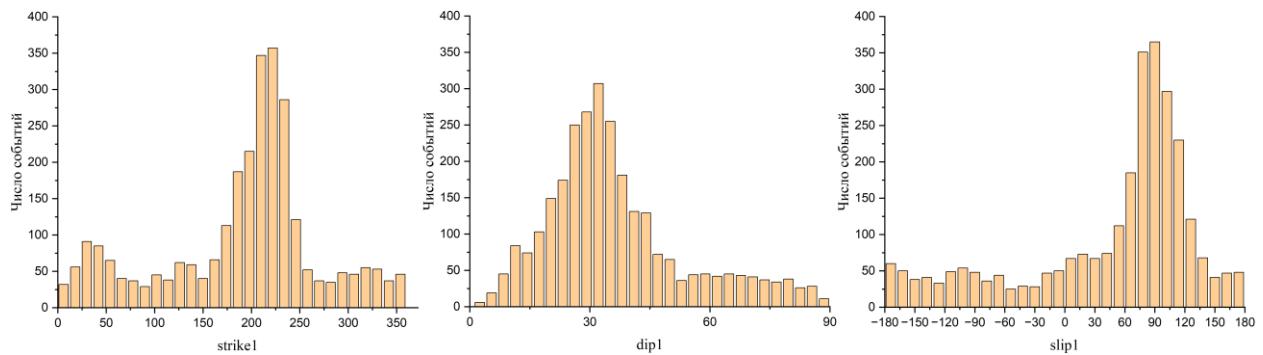


Рисунок 4. Распределение параметров механизмов очагов землетрясений в итоговом каталоге, демонстрирующее преобладающие диапазоны углов падения (dip), простирания (strike) и сдвига (rake/slip), связанные с классическими субдукционными землетрясениями.

Выбор шага сетки для построения модели распределения параметров механизмов очагов:

Для оценки оптимального шага по сетке было рассчитано распределение эпицентров с определенным механизмом очага на квадратный километр (рис. 5, таблица 3). При шаге в 1° – 79.7% территории покрывается ячейками, в которых осреднено не менее 2 решений, однако в некоторых районах, например, вблизи Авачинской бухты (и г. Петропавловск-Камчатский), а также для Южных Курил есть возможность использовать более детальный масштаб – 0.5° .

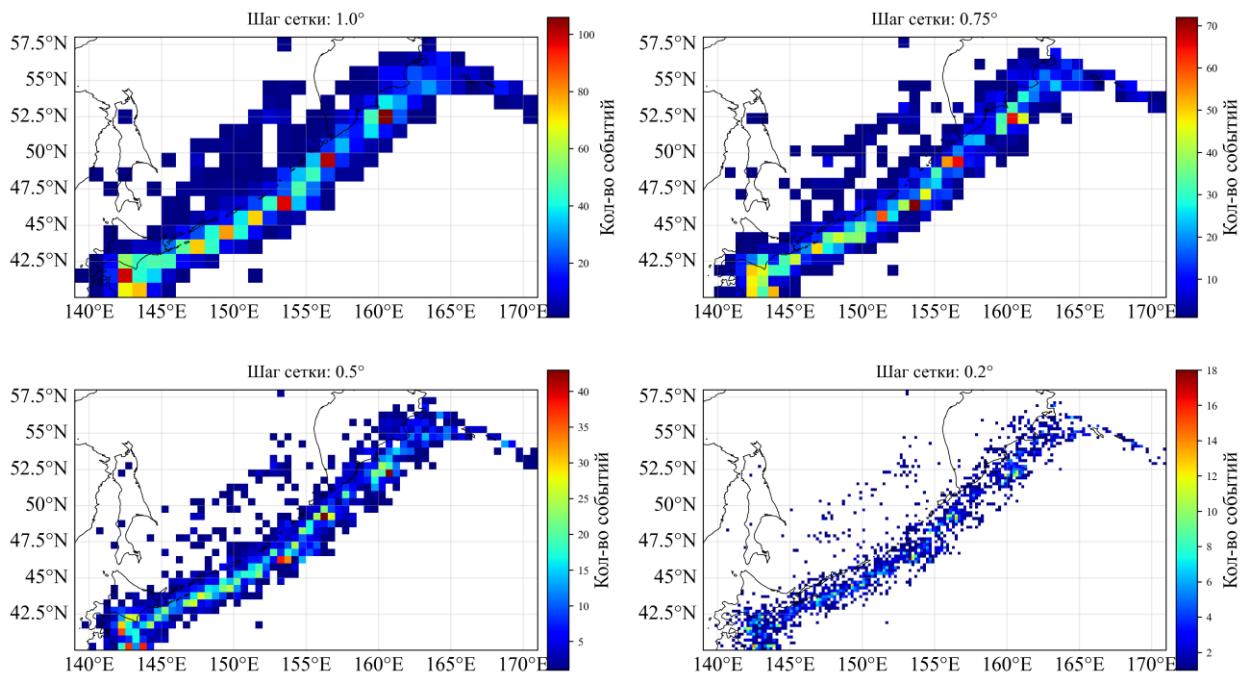


Рисунок 5. Плотность эпицентров землетрясений с оценками по механизмам для собранной базы данных на квадратный километр при шаге по сетке 1° , 0.5° и 0.2° , соответственно.

Таблица 3. Оценка параметров для выбора шага по сетке

| Размер ячейки | $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ | $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ | $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ | $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|

| | | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Площадь всех ячеек с ≥ 1 событием | 1 544 757.54 км ² | 1261543.01 км ² | 966 438.22 км ² | 429 682.04 км ² |
| Площадь всех ячеек с ≥ 2 событиями | 1 231 247.46 км ² | 919834.54 км ² | 659 959.12 км ² | 195 206.37 км ² |
| Доля площади (≥ 2 события) / (≥ 1 событие) | 79.70 % | 72.91 % | 68.29 % | 45.43 % |
| Площадь всех ячеек с ≥ 3 событиями | 999 839.65 км ² | 781021.95 км ² | 547 204.06 км ² | 104 967.48 км ² |
| Доля площади (≥ 3 события) / (≥ 1 событие) | 64.72 % | 61.91 % | 56.62 % | 24.43 % |

Также была проведена апробация метода (Kagan, Jackson, 2014) для моделирования распределения вероятных очагов землетрясений на основе составленной базы данных. Поскольку разные слои сейсмичности (межплитовый, внутриплитовый и поверхностный), вероятно, значительно отличаются по характерным механизмам очагов, то и моделирование далее будет выполняться независимо для этих групп землетрясений. В качестве примера из собранной базы данных были выделены межплитовые землетрясения согласно методике (Воробьев и др., 2026) и на их основе построена модель пространственного распределения вероятных механизмов очагов на равномерной пространственной сетке с размером ячеек $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (рис. 6). Видно, что в подавляющем большинстве ячеек преобладающим механизмом является надвиг (Охотской плиты на Тихоокеанскую), что соответствует естественному физическому механизму землетрясений, происходящих на границе плит в зоне субдукции.

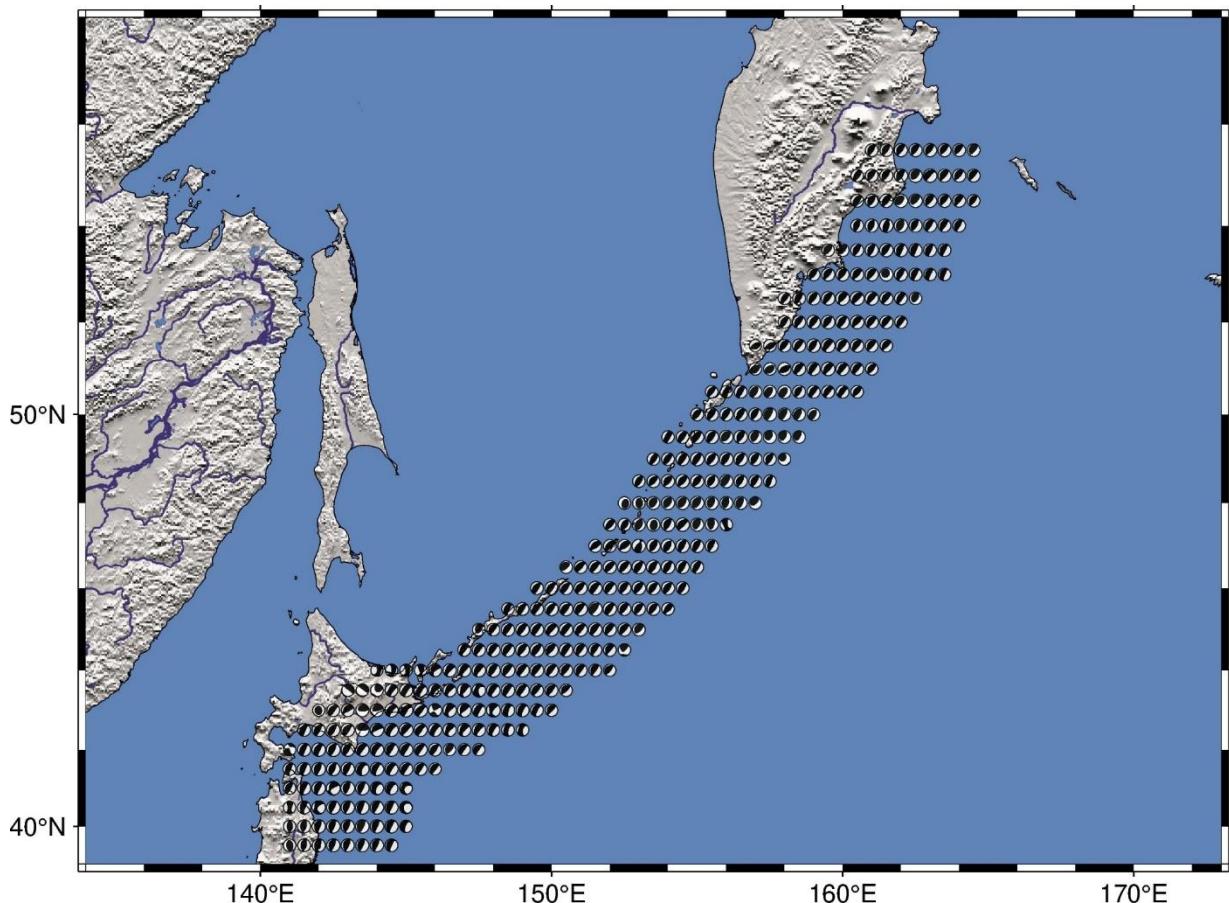


Рисунок 6. Предварительное моделирование вероятного механизма очага землетрясения с шагом 0.5° по каталогу GCMT

Прогнозный алгоритм STVP

Алгоритм прогноза STVP состоит в следующем: если в круге радиуса R_{alarm} за период T_{alarm} произошло минимум n_{min} событий магнитудой M_0 или более со значением прокси-продуктивности pr_{alarm} или более, то в области, образованной объединением кругов радиуса R_{alarm} с центрами в эпицентрах этих событий ("область тревоги"), ожидается землетрясение магнитудой M_{alarm} в период времени T_{alarm} от момента первого события. Таким образом алгоритм содержит 6 параметров.

Для тестов использовалась диаграмма ошибок Молчана (Molchan, Kagan, 1992). Было фиксировано значение $M_{\text{alarm}}=7.5$, другие параметры варьировались следующим образом: $T_{\text{alarm}} = \{1.5, 2, 2.5\}$ (лет), $R_{\text{alarm}} = \{200, 250, 300\}$ (км), $pr_{\text{min}} = \{0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5\}$, $M_0 = \{5.7, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7\}$, $n_{\text{min}} = \{1, 2, 3\}$. Диаграммы ошибок для этих наборов параметров показаны на рис.7.

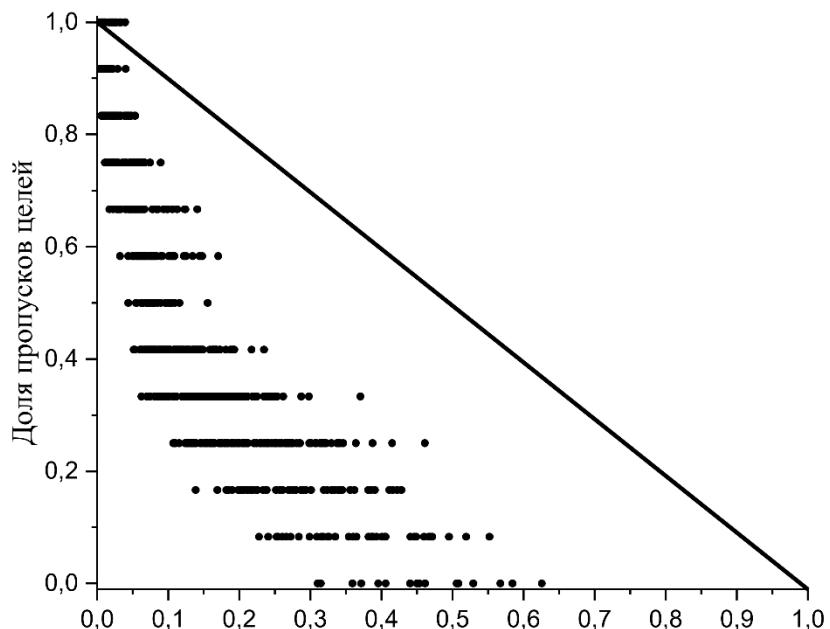


Рисунок 7. Диаграмма ошибок Молчана для результатов ретроспективных тестов алгоритма при различных наборах параметров.

В соответствии с планом, построена диаграмма ошибок прогнозного алгоритма STVP с вариациями контрольного параметра (рис. 8, ссылка) относительно выбранного оптимального набора параметров, в качестве которого выступает величина продуктивности.

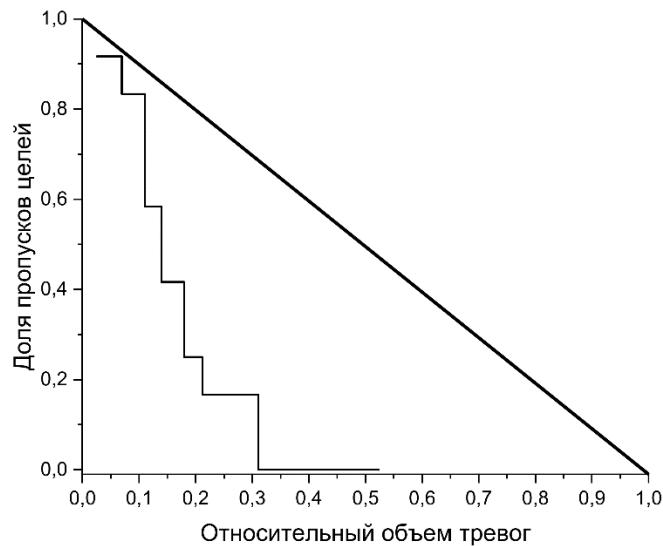


Рисунок 8. Диаграмма Ошибок Молчана для результатов теста алгоритма при вариациях контрольного параметра относительно оптимального набора параметров.

На основании полученной диаграммы ошибок была рассчитана сглаженная зависимость дифференциального вероятностного выигрыша [Shebalin et al., 2014] от значения управляющего параметра (в качестве которого выбрана величина прокси-продуктивности) (рис. 9, ссылка).

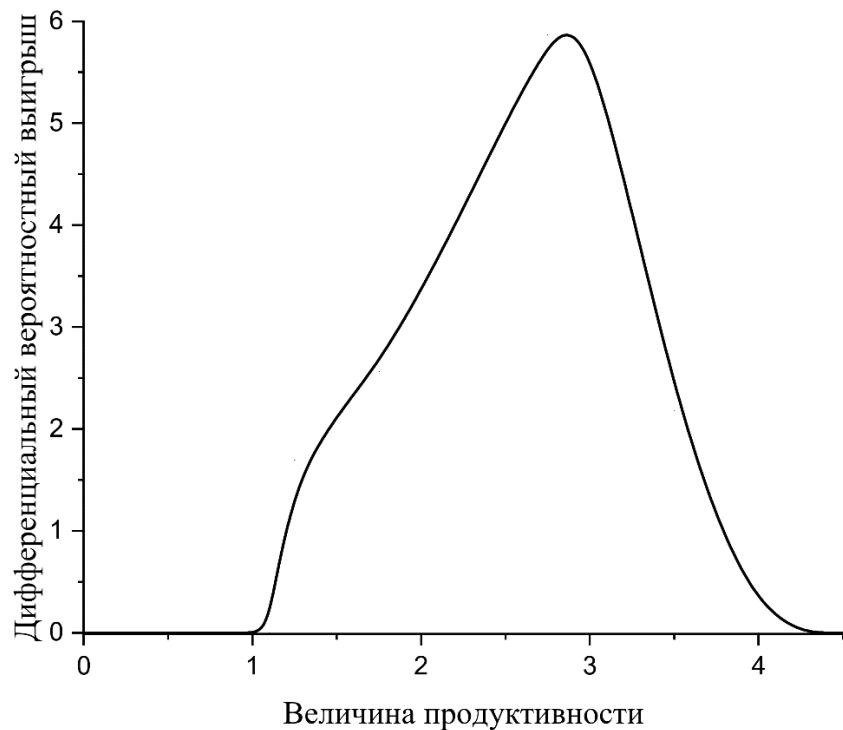


Рисунок 9. Зависимость дифференциального вероятностного выигрыша от величины контрольного параметра.

Литература

Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Определение тензора момента двойного диполя для землетрясений Камчатки по волновым формам региональных сейсмических станций // Физика Земли. 2021. № 3. С. 45–62.

Раевская А.А., Матвеенко Е.А. Оперативное определение тензоров момента двойного диполя землетрясений Камчатки и Командорских островов в 2023 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2025. № 2 (66). С. 53–63.

Duputel Z. et al. W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010) // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. № 2. P. 1125–1147.

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou, J. H. Woodhouse. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.

Ekström, G., M. Nettles, A.M. Dziewonski. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002

Kagan Y.Y., Jackson D.D. Statistical earthquake focal mechanism forecasts // Geophysical Journal International. 2014. V. 197. № 1. P. 620–629.

Molchan G., Kagan Y. Earthquake prediction and its optimization // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97. P. 4823-4838. doi:10.1029/91JB03095.

Sipkin S. A. USGS earthquake moment tensor catalog // International Geophysics. Academic Press, 2002. V. 81. P. 823–825.

Shebalin P., Narteau C., Zechar J., Holschneider M. Combining earthquake forecasts using differential probability gains // Earth Planets and Space. 2014. V. 66. doi: 10.1186/1880-5981-66-37

Vallée M. et al. SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism and source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution // Geophysical Journal International. 2011. V. 184. № 1. P. 338–358.

Механизмы очагов землетрясений от КФ ФИЦ ЕГС РАН -
<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php>

GCMT – globalcmt.org

USGS – earthquake.usgs.gov

SCARDEC – scardec.projects.sismo.ipgp.fr/