

Технический отчет о создании калиброванного каталога землетрясений региона Алтай-Саяны-Прибайкалье

1. Имеющиеся исходные данные

Для отдельных частей рассматриваемого региона и отдельных периодов наиболее полными являются следующие источники:

- «Землетрясения в СССР» [17], Алтай-Саянский регион, 1962-1991;
- «Землетрясения в СССР» [17], Байкальский регион, 1962-1991;
- «Землетрясения в СССР» [17], Якутский регион, 1962-1991;
- «Землетрясения в СССР» [17], регион Приморье, 1962-1991;
- «Землетрясения Северной Евразии» [27], Алтай-Саянский регион, 1992-2014;
- «Землетрясения Северной Евразии» [27], Байкальский регион, 1992-2014;
- «Землетрясения Северной Евразии» [27], Якутский регион, 1992-2014;
- «Землетрясения Северной Евразии» [27], регион Приморье, 1992-2014;
- «Землетрясения России» [28], Алтай-Саянский регион, 2015-2019;
- «Землетрясения России» [28], Байкальский регион, 2015-2019;
- «Землетрясения России» [28], Якутский регион, 2015-2019;
- «Землетрясения России» [28], регион Приморье, 2015-2019;
- Каталог Байкальского отделения ГС РАН [16], 1962-2021;
- Каталог ISC [15], 1962-2021.

2. Объединение каталогов землетрясений и идентификация дублей

Для автоматической идентификации дублей в объединенном каталоге землетрясений использован алгоритм и соответствующее программное обеспечение, разработанные ранее на основе модифицированного метода ближайшего соседа и вероятностной метрики в пространстве сетевых погрешностей определения эпицентров и времен сейсмических событий при объединении каталогов [Vogobieva et al., 2022] (далее *алгоритм объединения каталогов*). Этот алгоритм позволяет с большой точностью идентифицировать данные в разных каталогах, относящиеся к одному и тому же землетрясению даже в случае близких по времени и пространству землетрясений.

Идея *алгоритма объединения каталогов* состоит в том, что данные о даже очень близких по пространству и времени сейсмических событиях, представленные в разных каталогах, могут

быть правильно ассоциированы, если удачно определить меру близости данных. В качестве такой меры в работе [Vorobieva et al., 2022] предложено использовать метрику в пространстве сетевых погрешностей определения эпицентров. Было показано, что при использовании такой метрики ее значение для данных, относящихся к одному и тому же сейсмическому событию, в подавляющем числе случаев значительно меньше, чем для данных, относящихся к разным событиям. Для эффективного автоматического использования этого алгоритма необходимо определить его параметры и обеспечить отсутствие дублей в каждой из объединяемых компонент. Объединение нескольких каталогов делается последовательно: на каждом этапе одной из входных компонент объединения является предыдущий результат объединения каталогов.

Каталог ISC является композитным каталогом, где собраны данные множества мировых агентств, в том числе российских. Каталоги Приморья и Якутии используются в пределах рассматриваемого региона.

Построенный по алгоритму объединения каталогов каталог региона Алтай-Саяны-Прибайкалье содержит 121159 событий с магнитудой $M \geq 2$; 59702 событий из Российских каталогов, 65263 события из ISC.

3. Метод

В алгоритме автоматической идентификации дублей (записей, относящимся к одному и тому же сейсмическому событию) [Vorobieva et al., 2022], используется вероятностная метрика в пространстве сетевых погрешностей определения эпицентров и времен сейсмических событий при объединении каталогов (1). Эта метрика для оценки близости записей включает разницу во времени DT , разность долготы DX , и широты DY .

$$Ro = \sqrt{\frac{DT^2}{\sigma_T^2} + \frac{DX^2}{\sigma_X^2} + \frac{DY^2}{\sigma_Y^2}} \quad (1)$$

где $\sigma_T, \sigma_X, \sigma_Y$ - стандартные отклонения разницы во времени, долготе и широте.

Сборка объединенного каталога осуществлялась последовательно с учетом установленных приоритетов источников данных.

4. Приоритет источников данных

Для выбора данных определенного источника при наличии для землетрясения данных нескольких источников используется система приоритетов источников данных. Установлены следующие приоритеты источников данных

1. Землетрясения из глобального каталога ISC, имеющие магнитуду $MW_GCMТ$ и/или mb_ISC , ядро сборки, далее CORE.
2. Землетрясения из российских каталогов, в зонах пересечения преимущество дается данным из каталогов Байкальского региона.
3. Остальные землетрясения из ISC.

5. Проверка на дубли в исходных каталогах

Каждый из исходных каталогов был проверен на наличие абсолютных дублей. В каталоге землетрясений Байкальского филиала геофизической службы РАН обнаружен 1 абсолютный дубль, В каталогах «Землетрясения северной Евразии» обнаружено по одному дублю в данных Алтая и Байкала, и в ISC – 2 дубля (всего 5). Статистический анализ каждого из каталогов не выявляет аномальные группы близких записей. Для дублей характерно значение $Ro < 10$. Число столь близких событий внутри каждого из каталогов очень мало. Статистических оснований считать такие события дублями нет. Анализ выполнен с параметрами метрики $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км.

6. Этапы сборки каталога

Региональные каталоги «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии» и «Землетрясения России» не пересекаются во времени, поэтому идентификация дублей не требуется в отдельно взятом регионе. Объединенные во времени каталоги назовем ALT_RUS, BLK_RUS0, PRM_RUS и YAK_RUS

В регионе Байкал имеется дополнительный «Каталог землетрясений Байкальского филиала геофизической службы РАН» [16], назовем его BLK_GS. Этот каталог содержит примерно в 2 раза больше событий, чем каталог BLK_RUS0 за 2015-2019г., кроме того он содержит данные за 2020-2021г.

Для объединения данных Байкала в качестве главного каталога выбираем BLK_RUS0, в качестве дополнительного BLK_GS. Предварительный анализ дублей выполнен с параметрами распределения, типичными для инструментальных каталогов $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км.

Выявлено 6735 дублей, 5808 дублей являются абсолютными, подавляющее большинство остальных дублей объясняется различной точностью представления данных в

исходных каталогах, поэтому оптимизация параметров метрики и порога для определения дублей невозможна. Распределение метрики показано на Рис. 1. 2136 уникальных событий добавляются к каталогу BLK_RUS0. Объединенный каталог российских данных для Байкала BLK_RUS содержит 33084 события.

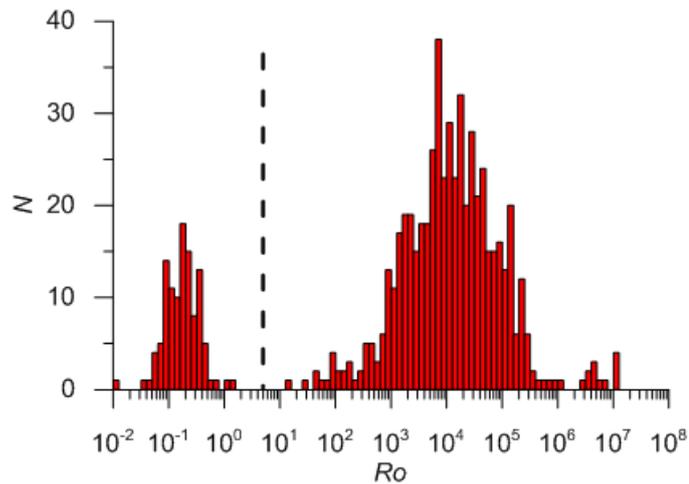


Рис. 1. Распределение метрики Ro для ближайших соседей из каталогов BLK_RUS0 и BLK_GS. Абсолютные дубли не показаны. Анализ выполнен с параметрами метрики $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км.

Для объединения данных Якутии и Приморья в качестве главного каталога выбираем YAK_RUS, в качестве дополнительного PRM_RUS. Предварительный анализ дублей выполнен с параметрами распределения, типичными для инструментальных каталогов $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км.

Выявлено 80 дублей, 25 дублей являются абсолютными. Число дублей, недостаточно для оптимизации параметров метрики и порога. Распределение метрики показано на Рис. 2. 1037 уникальных событий из каталога PRM_RUS добавляются к каталогу YAK_RUS. Объединенный каталог российских данных для Якутии и Приморья YAK_PRM_RUS содержит 7203 события.

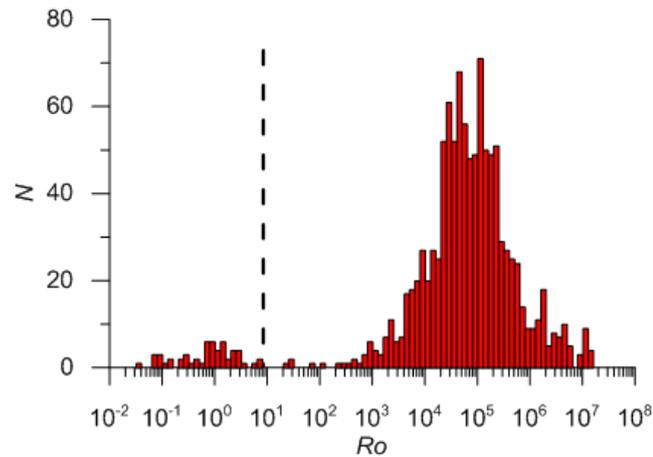


Рис. 2. Распределение метрики Ro для ближайших соседей из каталогов YAK_RUS и PRM_RUS. Абсолютные дубли не показаны. Анализ выполнен с параметрами метрики $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км.

Регионы Алтай и Якутия-Приморье находятся далеко друг от друга, поэтому идентификация дублей не требуется. Объединенный каталог ALT_YAK_PRM_RUS создается как простое объединение каталогов ALT_RUS и YAK_PRM_RUS, он содержит 31218 событий.

Объединение Российских данных Байкала, Алтая, Якутии и Приморья. Для последнего шага объединения российских данных в качестве главного каталога выбираем BKL_RUS, в качестве дополнительного ALT_YAK_PRM_RUS.

Предварительный анализ дублей выполнен с параметрами распределения, типичными для инструментальных каталогов $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км. Предварительный порог определяется по минимуму распределения метрики. Выявлено около 1800 дублей, 653 дубля являются абсолютными. Для определения дисперсий абсолютные дубли не используются (Рис. 3). Мы убедились, что каждый из параметров следует нормальному распределению, и что среднее мало по сравнению со стандартным отклонением для всех трех параметров DT, DX, DY . Мы также убедились, что дисперсия почти не зависит от магнитуды событий и времени.

Окончательный анализ дублей выполнен с параметрами, полученными на предыдущем шаге $\sigma_T = 0.035$ мин, $\sigma_X = 10.7$ км, $\sigma_Y = 10.8$ км. Мы также вычисляем значения метрики между событиями каталога BKL_RUS, это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой плотности землетрясений. В каталоге BLK всего 189 землетрясений имеют расстояние до ближайшего соседа $Ro < 5.4$ (алгоритм вычисления метрики такой же как для двух разных каталогов, только исключено сравнение землетрясения с самим собой). Это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой

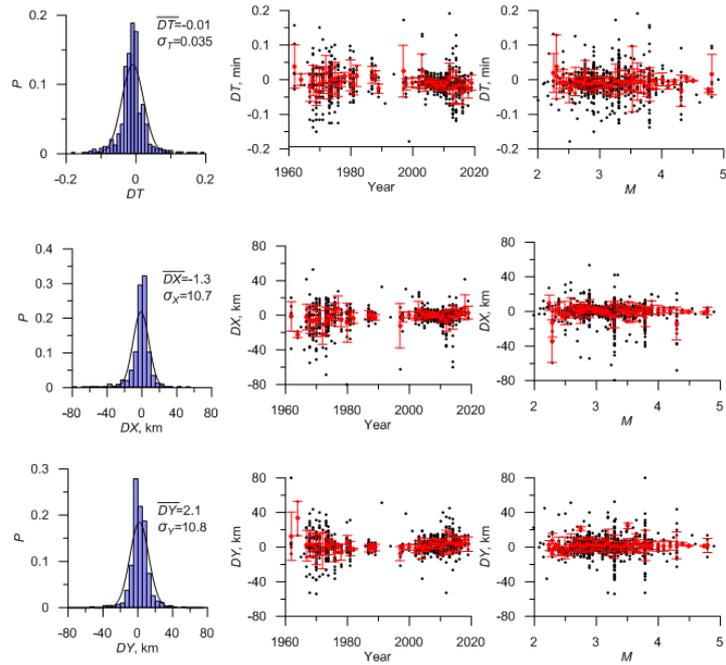


Рис. 3. Объединение данных российских агентств в регионах Байкал и Алтай-Якутия-Приморье. Распределения DT , DX , DY , и зависимость дисперсии и средних значений от времени и от магнитуды событий. Распределения построены по предварительно определенным дублям, абсолютные дубли не включены.

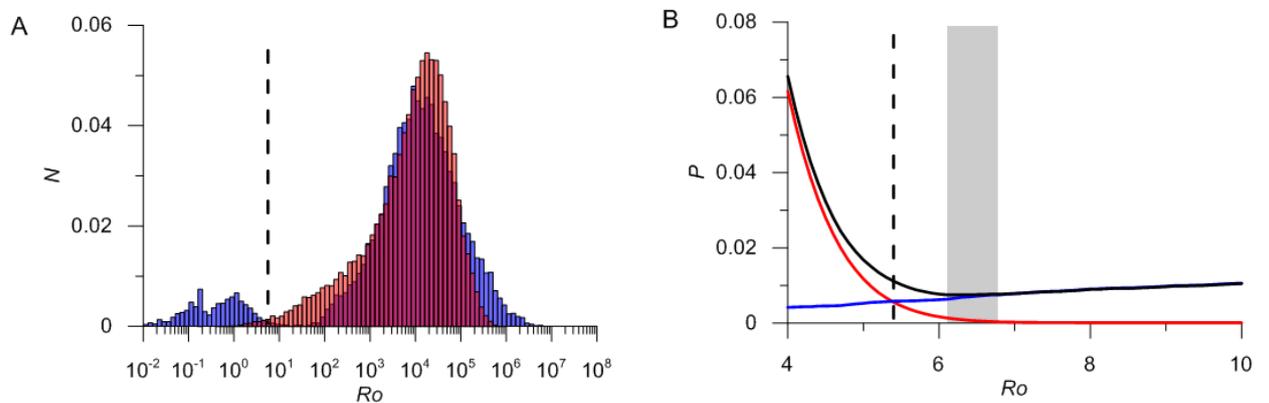


Рис. 4. А. Сравнение распределения метрики (1) для пар ВКЛ/АЛТ_ЯКУ_ПРМ и такой же метрики для землетрясений ВКЛ/ВКЛ. В. Оптимизация порога: красная линия показывает вероятность пропуска дубля в модели с метрикой (1), синяя линия – вероятность ложного дубля (см текст), черная линия суммарная вероятность ошибок первого и второго рода, пунктирная линия $Ro=5.4$ соответствует равному числу ошибок первого и второго рода (число ложных дублей равно числу пропущенных дублей), оценка суммарного числа ошибок примерно 1.1%, серая полоса показывает диапазон значений метрики $Ro=6.1\div 6.8$, минимизирующих суммарное число ошибок, примерно 0.75%.

плотности землетрясений. $P=189/33084=0.057$, верхняя оценка вероятности ложных дублей примерно 0.57%. При $Ro=6.8$ число таких землетрясений возрастает до 245, что соответствует вероятности 0.74% (см синюю линию на Рис. 4В). Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах ВКЛ/АЛТ_УАК_РРМ и землетрясений в каталоге ВЛК показывает хорошее разделение дублей и естественно кластеризованных событий (афтершоки, рои и т.п.) (Рис. 5).

Выбор порога метрики для определения дублей зависит от задачи дальнейшего исследования объединенного каталога. Если важно гарантированно удалить дубли, то предпочтительным является более высокий порог Ro , если важно сохранить интегральные характеристики каталога, то предпочтительным является порог Ro , обеспечивающий равенство ошибок первого и второго рода. Мы выбираем порог $Ro=5.4$. В этом случае, кроме 652 абсолютных дублей выявляется еще 1106 дубля. Итого, в каталоге АЛТ_УАК_РРМ на территории исследования имеется 29460 уникальных событий. Эти события мы добавляем к каталогу ВЛК_РУС и получаем объединенный каталог РУС, содержащий 62545 событий.

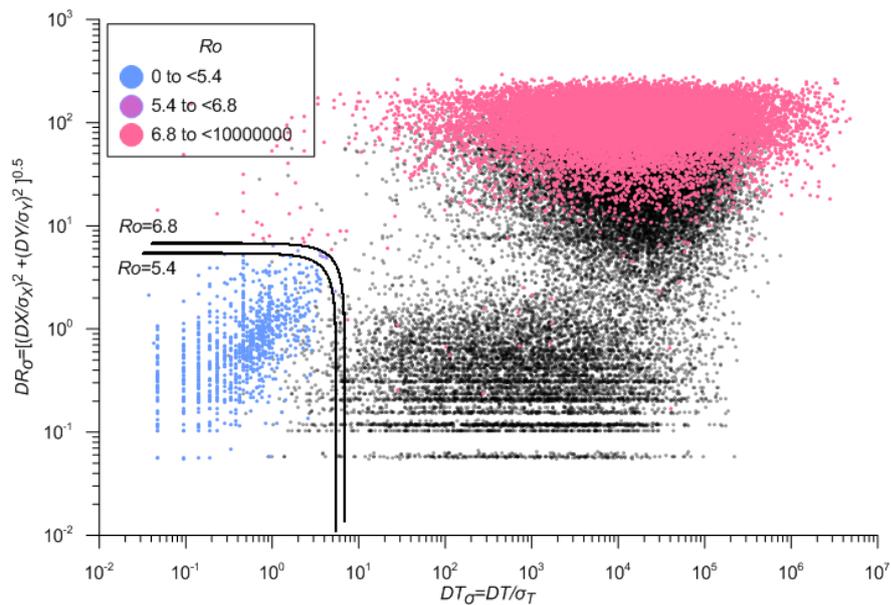


Рис. 5. Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах ВКЛ/АЛТ_УАК_РРМ (цветные точки) и землетрясений в каталоге ВЛК (черные точки). Линии уровня метрики (1) $Ro = 5.4$ и $Ro = 6.8$. Обеспечивают близкое к оптимальному разделение дублей и естественно группированных событий (нижний кластер черных точек).

Объединение российских каталогов и каталога ISC. ISC является композитным каталогом, где собраны данные множества мировых агентств, в том числе российских. Мы

считаем наиболее надежными определения событий, автором которых является GCMT и/или ISC. События ISC с магнитудами MW_GCMT и/или mb_ISC имеют высший приоритет и представляют собой ядро объединенного каталога CORE. Определения остальных событий из каталога ISC имеют более низкий приоритет, чем определения российских сетей (далее эта часть каталога называется ISC_Other).

Объединение российских данных и ISC_Other. В качестве главного каталога выбираем RUS, полученный в результате объединения данных российских агентств, в качестве дополнительного ISC_Other.

Предварительный анализ дублей выполнен с параметрами распределения, типичными для инструментальных каталогов $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км. Предварительный порог определяется по минимуму распределения метрики (1). Выявлено около 30000 дублей, большинство из них, 21063 дубля, являются абсолютными. Для определения дисперсий абсолютные дубли не используются (Рис. 6). Мы убедились, что каждый из параметров следует нормальному распределению, и что среднее мало по сравнению со стандартным отклонением для всех трех параметров DT , DX , DY . Дисперсии параметров увеличились, по сравнению с предыдущими этапами объединения российских данных. Наблюдается небольшое увеличение дисперсии после 2002г. Это может быть связано с увеличением представительности каталога. Мы также убедились, что дисперсия почти не зависит от магнитуды событий.

Окончательный анализ дублей выполнен с параметрами, полученными на предыдущем шаге $\sigma_T = 0.054$ мин, $\sigma_X = 23.4$ км, $\sigma_Y = 24.2$ км. Мы также вычисляем значения метрики между событиями каталога RUS, это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой плотности землетрясений. В каталоге RUS всего 369 землетрясений имеют расстояние до ближайшего соседа $Ro < 5.4$ (алгоритм вычисления метрики такой же как для двух разных каталогов, только исключено сравнение землетрясения с самим собой). Это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой плотности землетрясений. $P = 369/62545 = 0.0059$, верхняя оценка вероятности ложных дублей примерно 0.59%. При $Ro = 7.0$ число таких землетрясений возрастает до 468, что соответствует вероятности 0.75% (см синюю линию на рис. 4B). Предпочтительным является порог Ro , обеспечивающий равенство ошибок первого и второго рода. Мы выбираем порог $Ro = 5.4$. В этом случае, кроме 21063 абсолютных дублей выявляется еще 8871 дубль. Итого, в каталоге ISC_Other на территории исследования имеется 58203 уникальных события. Эти события мы добавляем к каталогу RUS и получаем объединенный каталог RUS_ISC, содержащий 120748 событий.

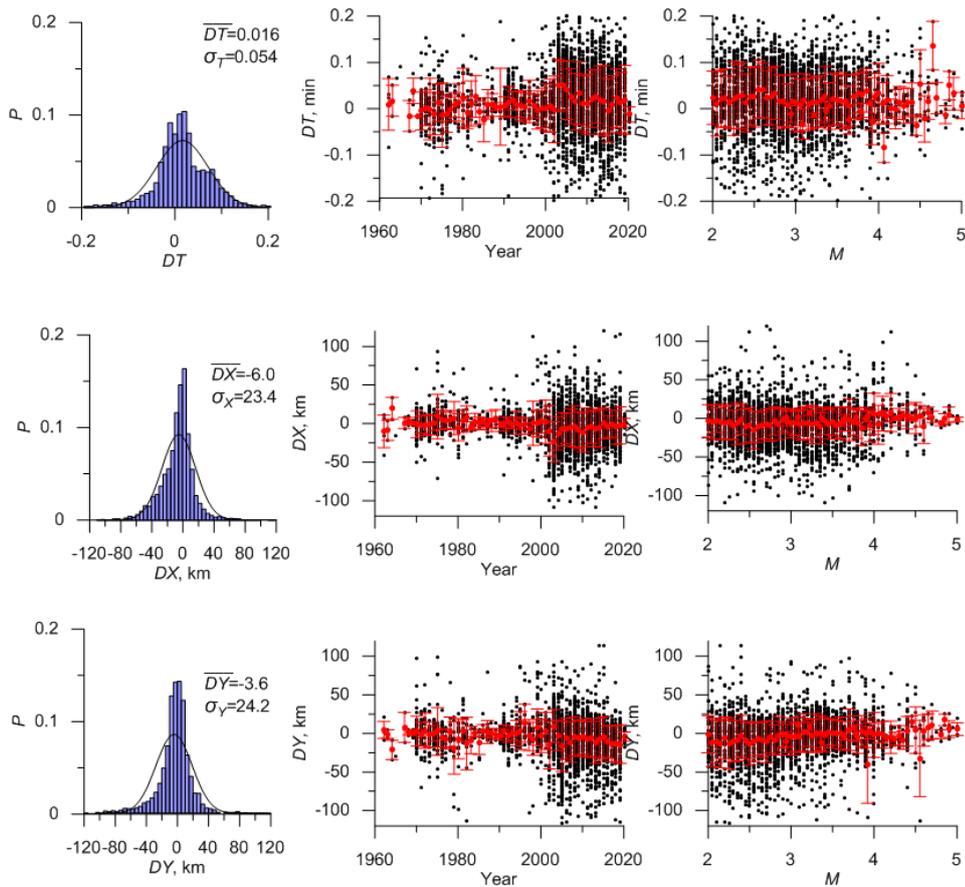


Рис. 6. Объединение данных российских агентств RUS и ISC_Other. Распределения DT , DX , DY , и зависимость дисперсии и средних значений от времени и от магнитуды событий.

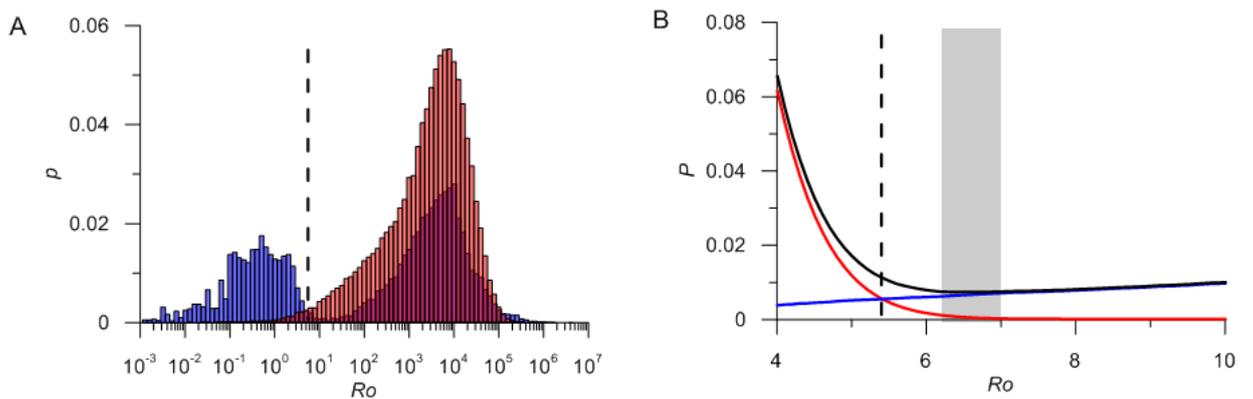


Рис. 7. А. Сравнение распределения метрики для пар RUS/ISC_Other и такой же метрики для землетрясений RUS/RUS. В. Оптимизация порога: красная линия показывает вероятность пропуска дубля в модели с метрикой (1), синяя линия – вероятность ложного дубля (см текст), черная линия суммарная вероятность ошибок первого и второго рода, пунктирная линия $Ro=5.4$ соответствует равному числу ошибок первого и второго рода (число ложных дублей равно числу пропущенных дублей), оценка суммарного числа ошибок примерно 1.1%, серая полоса показывает диапазон значений метрики $Ro=6.2\div 7.0$, минимизирующих суммарное число ошибок, примерно 0.73%.

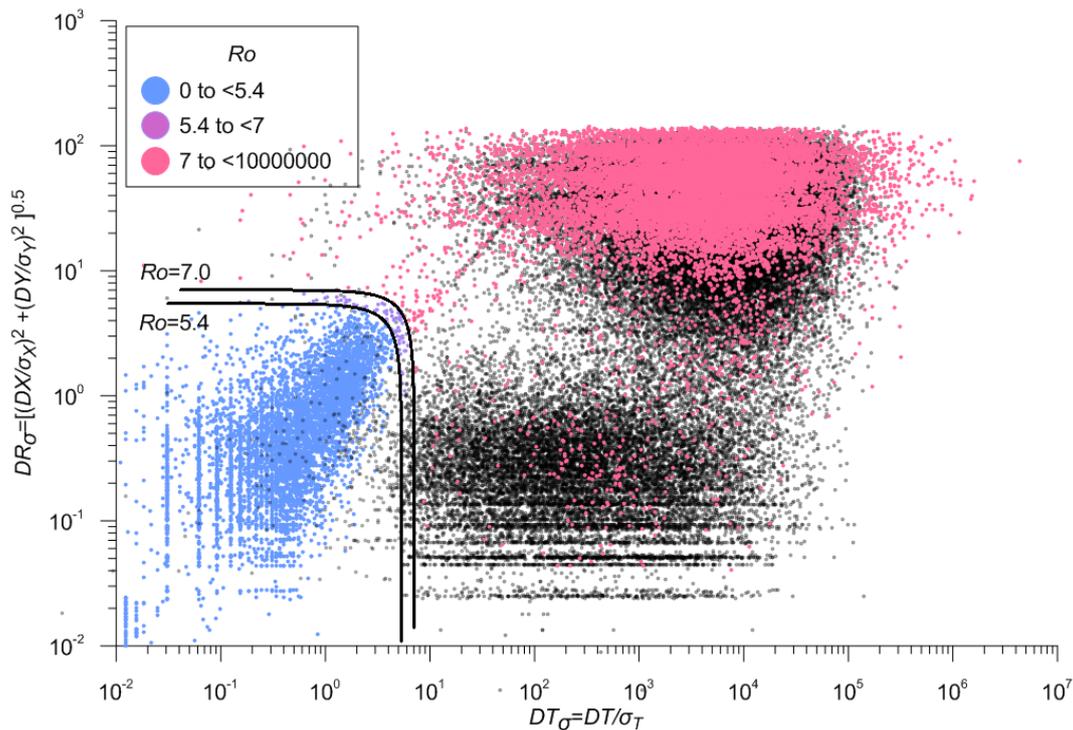


Рис. 8. Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах RUS/ISC_Other (цветные точки) и землетрясений в каталоге RUS (черные точки). Линии уровня метрики (1) $Ro = 5.4$ и $Ro = 7.0$. Обеспечивают близкое к оптимальному разделению дублей и естественно группированных событий (нижний кластер черных точек).

Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах RUS/ISC_Other и землетрясений в каталоге RUS показывает хорошее разделение дублей и естественно кластеризованных событий (афтершоки, рои и т.п.) (Рис.7, 8).

Объединение RUS_ISC_Other и CORE (финальная часть сборки). В качестве главного каталога выбираем CORE, в качестве дополнительного RUS_ISC_Other, полученный на предыдущем шаге.

Предварительный анализ дублей выполнен с параметрами распределения, типичными для инструментальных каталогов $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км. Предварительный порог определяется по минимуму распределения метрики (1). Выявлено около 2200 дублей. Мы убедились, что каждый из параметров следует нормальному распределению, и что среднее мало по сравнению со стандартным отклонением для всех трех параметров DT, DX, DY (Рис. 9). Мы также убедились, что дисперсия почти не зависит от времени и магнитуды событий.

Окончательный анализ дублей выполнен с параметрами, полученными на предыдущем

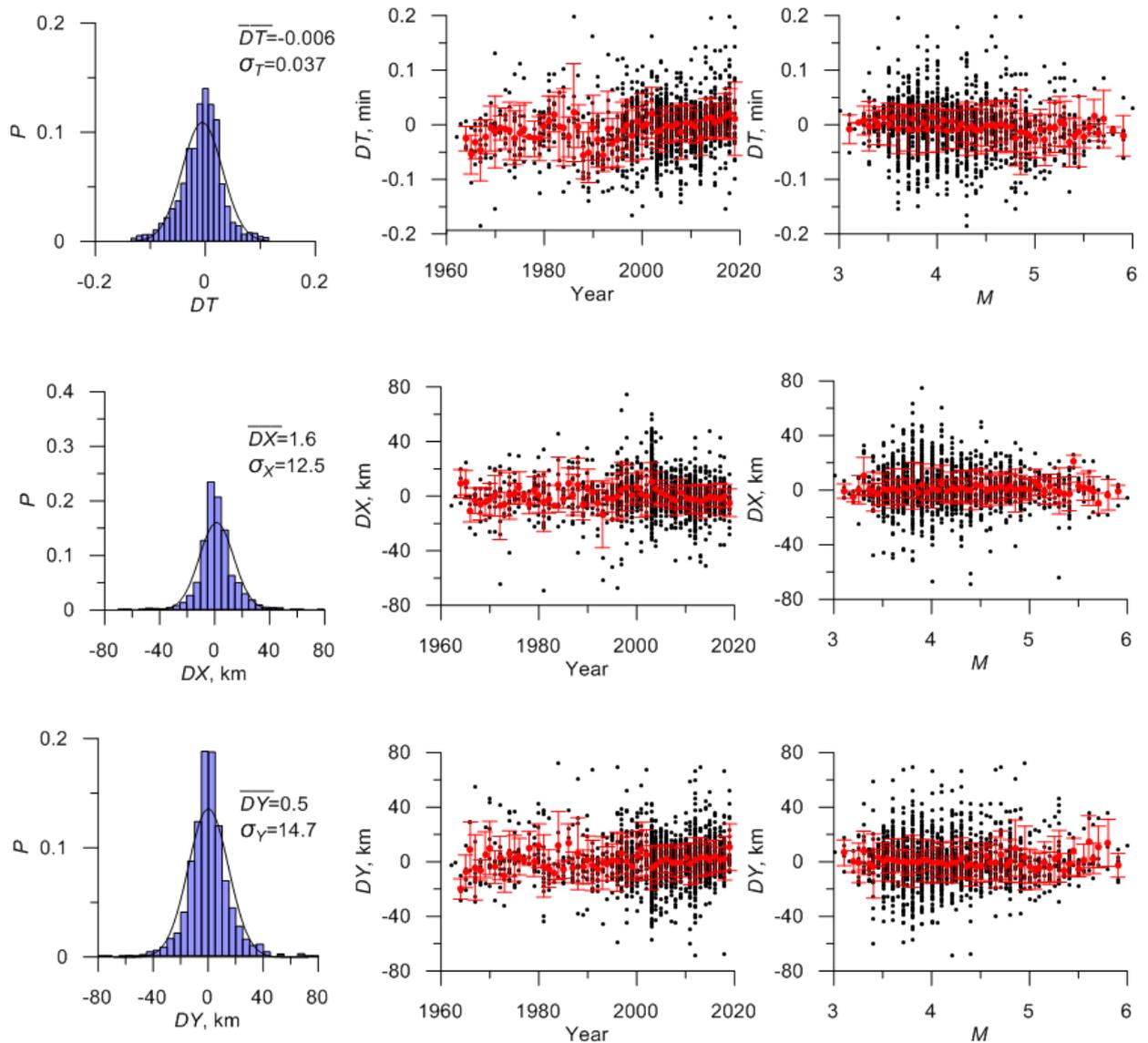


Рис. 8. Объединение RUS_ISC_Other и CORE (данные глобальных сетей из ISC). Распределения DT , DX , DY , и зависимость дисперсии и средних значений от времени и от магнитуды событий.

шаге $\sigma_T = 0.037$ мин, $\sigma_X = 12.5$ км, $\sigma_Y = 14.7$ км. Мы также вычисляем значения метрики между событиями каталога CORE, это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой плотности землетрясений. В каталоге CORE всего одно землетрясение у имеет расстояние до ближайшего соседа $R_0 < 10$ (алгоритм вычисления метрики такой же как для двух разных каталогов, только исключено сравнение землетрясения с самим собой). Это позволяет оценить вероятность того, что дубль выбран неправильно из-за высокой плотности землетрясений. $P = 1/2712 = 0.0004$, оценка вероятности ложных дублей исчезающе мала примерно 0.04% (Рис. 10). Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах CORE/RUS_ISC и землетрясений в каталоге RUS_ISC

показывает очень хорошее разделение дублей и естественно кластеризованных событий (афтершоки, рои и т.п.) (Рис. 11). В данном случае оптимальный порог метрики соответствует минимуму распределения метрики для пар CORE/RUS_ISC $Ro=10$. Вероятность ошибки примерно 0.04%. В этом случае, выявляется еще 2289 дублей. Итого, в каталоге RUS_ISC на территории исследования имеется 118459 уникальных событий. Эти события мы добавляем к каталогу CORE и получаем объединенный каталог RUS_ISC, содержащий 121171 событий.

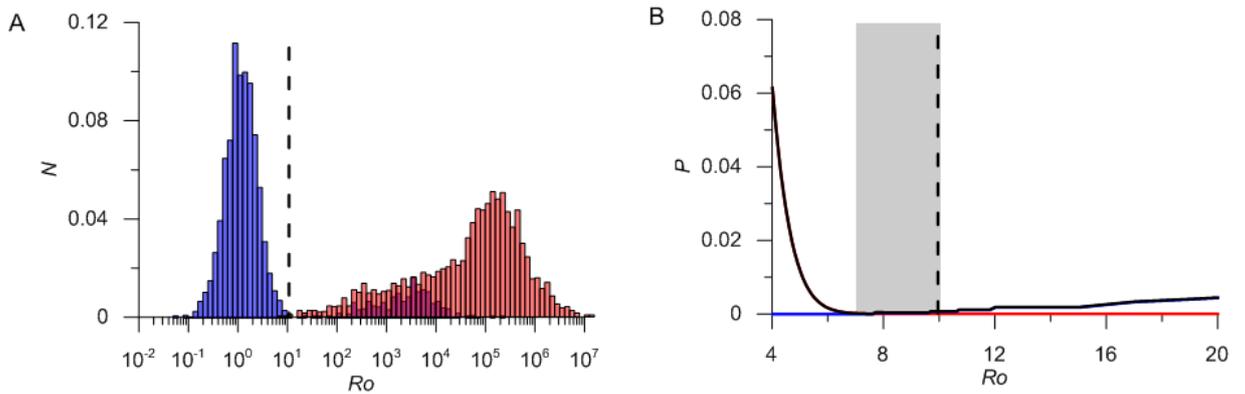


Рис. 10. А. Сравнение распределения метрики для пар CORE/RUS_ISC и такой же метрики для землетрясений CORE/CORE. В. Оптимизация порога: красная линия показывает вероятность пропуска дубля в модели с метрикой (1), синяя линия – вероятность ложного дубля (см текст), которая в данном случае оказалась исчезающе малой. Черная линия суммарная вероятность ошибок первого и второго рода. Серая полоса показывает диапазон значений метрики $Ro=7.0 \div 10.0$, минимизирующих суммарное число ошибок, примерно 0.04%. пунктирная линия $Ro=10$ соответствует равному числу ошибок первого и второго рода (один ложный дубль один пропущенный дубль).

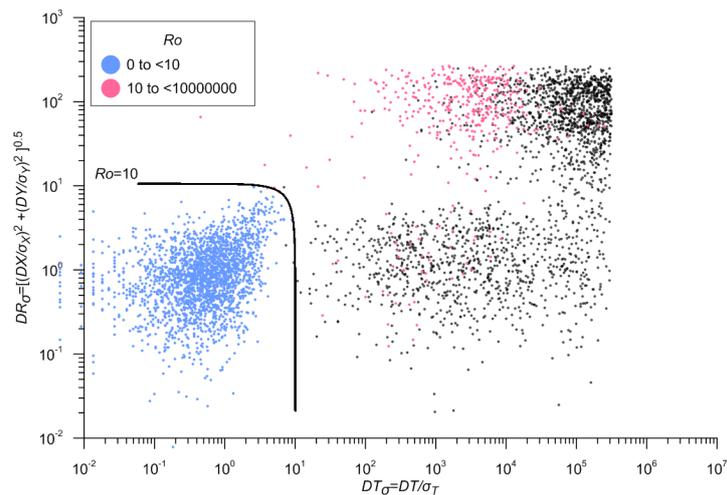


Рис. 11. Пространственно-временная структура ближайших соседей в метрике (1) в каталогах CORE/RUS_ISC (цветные точки) и землетрясений в каталоге CORE (черные точки). Линия уровня метрики (1). $Ro = 10$ обеспечивает очень хорошее разделение дублей и естественно группированных событий (нижний кластер черных точек).

7. Удаление взрывов

Предварительное удаление взрывов было сделано до начала сборки, однако необходима окончательная проверка, т.к. некоторые события могут быть отмечены как взрывы в одном исходном каталоге, но не отмечены в других каталогах.

Были последовательно проверено наличие взрывов в региональных каталогах Алтая, Байкала, Якутии и Приморья. Их число приведено в таблице 1.

Таблица 1. Каталоги взрывов

Каталог		Период	Число взрывов $M \geq 2$
Сборники «Землетрясения в СССР», «Землетрясения северной Евразии», Алтай Байкал Якутия* Приморье*	EXP_ALT EXP_BKL EXP_YAK EXP_PRM	1962-2014	40 93 196 150
Каталог международного сейсмологического центра ISC*.	EXP_ISC	1962-2021	11432

* Каталоги Якутии и Приморья и ISC используются в границах региона.

В качестве главного каталога мы последовательно выбираем каталоги взрывов, перечисленные в Таб. 1. В качестве дополнительного каталога – RUS_ISC, полученный в результате объединения российских данных и данных Международного сейсмологического центра. Используются стандартные параметры метрики $\sigma_T = 0.05$ мин, $\sigma_X = \sigma_Y = 15$ км и значение порога $Ro=10$. На каждом этапе выявленные дубли удаляются. Всего обнаружен 591 дубль.

Итоговый каталог RUS_ISC_NoEXP содержит 120580 событий. Итоговая схема сборки и параметры алгоритма автоматической идентификации дублей приведены в таблице 2. Объединенный каталог Алтай-Саянского и Байкальского регионов содержит 59702 события из российских каталогов и 60878 событий из ISC. Данные ISC и региональных сетей значительно дополняют друг друга (Рис. 12).

Таблица 2. Схема и параметры сборки объединенного каталога.

Этап	Главный каталог	Дополнительный каталог	Параметры метрики	Пороговое значение метрики	Оценка числа ошибок	Число дублей	Объединенный каталог
			$\sigma_{TMIN}, \sigma_{HKM}$				
1.1	Каталог Байкала «Землетрясения северной Евразии» + «Землетрясения России» BKL_RUS0, 30949 событий	Каталог землетрясений Байкальского филиала геофизической службы РАН BKL_GS8870 событий	0.05; 15; 15	6.0	-	6735	BKL_RUS 33084 события
1.2	Каталог Якутии «Землетрясения северной Евразии» + «Землетрясения России» YAK_RUS6166 событий	Каталог Приморья «Землетрясения северной Евразии» + «Землетрясения России» PRM_RUS1117 событий	0.05; 15; 15	8.0	-	80	YAK_PR M_RUS 7203 события
1.3	Объединение данных российских агентств в регионе Алтай и Якутия-Приморье YAK_PRM_RUS 7203 события ALT_RUS24015 событий		Регионы не пересекаются		0	0	ALT_YAK_PR M_RUS 31218 событий
1.4	Объединенный каталог российских агентств в регионе Байкал BKL_RUS33084 событий	Объединенный каталог российских агентств в регионах Алтай, Якутия, Приморье ALT_YAK_PR M_RUS 31218 события	0.035; 10.7; 10.8	5.4	1.1%	1757	RUS 62545 событий
2.1	Объединенный каталог российских агентств в регионе Байкал, Алтай, Якутия, Приморье RUS 62545 событий	ISC_Other88137 событий	0.053; 23.4; 24.2	5.4	1.1%	29934	RUS_ISC_Other 120748 событий
2.2	ISC, Данные глобальных сетей CORE2712 событий	RUS_ISC_Other 120748 событий	0.037; 12.5; 14.7	10	0.04%	2289	RUS_ISC 121171 событие
3	Удаление взрывов Каталоги взрывов из Таб.2	RUS_ISC121171 события	0.05; 15; 15	10	-	591	RUS_ISC_NoEXP 120580 событий

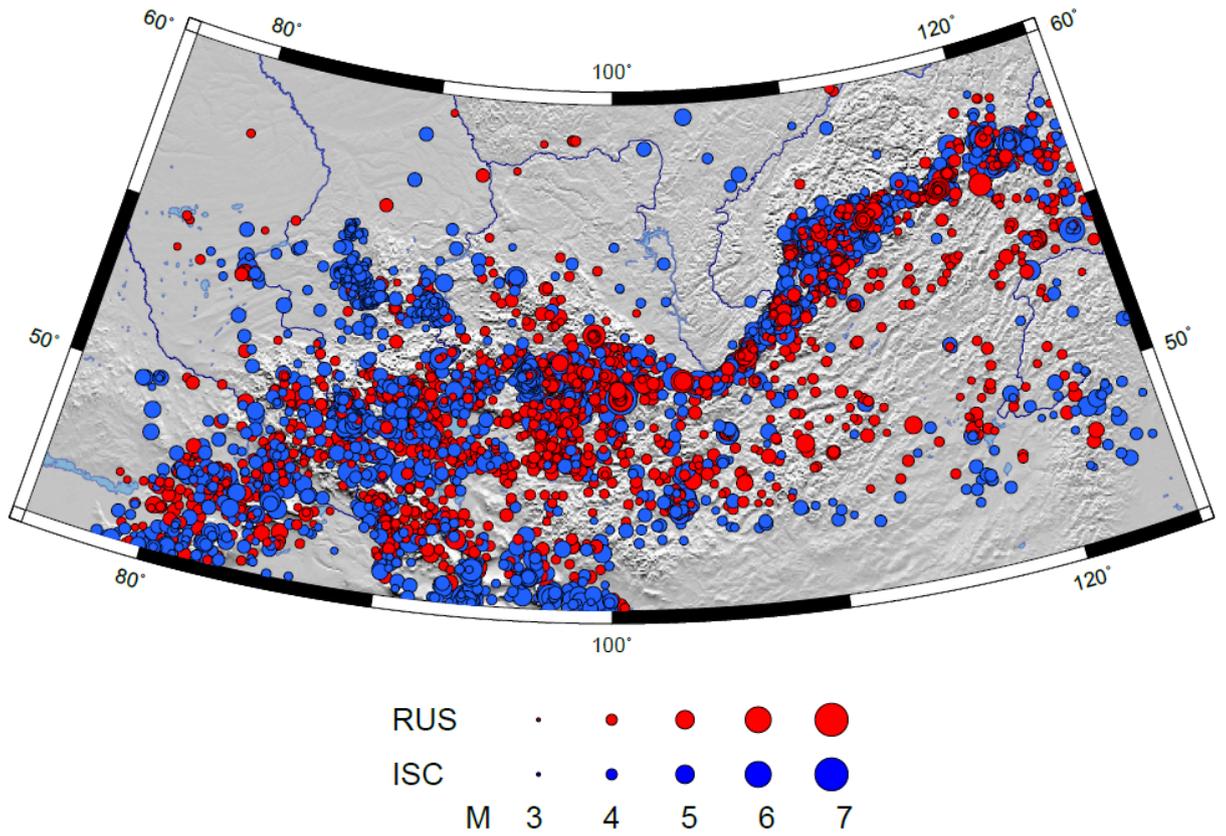


Рис. 12. Карта эпицентров $M \geq 3.5$ объединенного каталога Алтай-Саянского и Байкальского регионов.

8. Унификация магнитуды в объединенном каталоге – построение калиброванного каталога.

Объединение данных о землетрясениях от различных агентств требует исследования совместности магнитудных шкал.

В российских каталогах большинство землетрясений имеет энергетический класс: все землетрясения Байкала Якутии и Приморья, землетрясения Алтая до 2011 года. После 2011 Алтайская сеть не дает энергетический класс, но дает локальную магнитуду ML . В каталоге ISCu многих землетрясений также известен энергетический класс, информация содержится в бюллетенях.

Сегодня считается, что магнитуда по сейсмическому моменту Mw лучше всего отражает силу землетрясения в достаточно широком диапазоне магнитуды. Однако, Mw систематически определена только для сильных землетрясений $M \geq 5$. В среднем диапазоне магнитуд до $M \approx 4.0$ обычно используется магнитуда mb . В глобальном каталоге ISC магнитудные шкалы Mw и mb хорошо сшиты, так что в диапазоне магнитуды 4-6 они примерно равны друг другу (Рис. 13); для наиболее сильных землетрясений магнитуда mb насыщается, и Mw становится больше. Магнитуда MS , которая раньше использовалась как главная магнитуда для сильных землетрясений, плохо соответствует моментной магнитуде для землетрясений с магнитудой меньше 5.5, она оказывается сильно меньше, чем Mw (Рис. 13б) и чем mb (рис. 13в), таким образом, кажется, что MS не отражает реальной силы землетрясений в среднем диапазоне магнитуды. Это естественный факт: небольшие и средние землетрясения почти не излучают длиннопериодную поверхностную волну, таким образом сила землетрясения оказывается недооцененной.

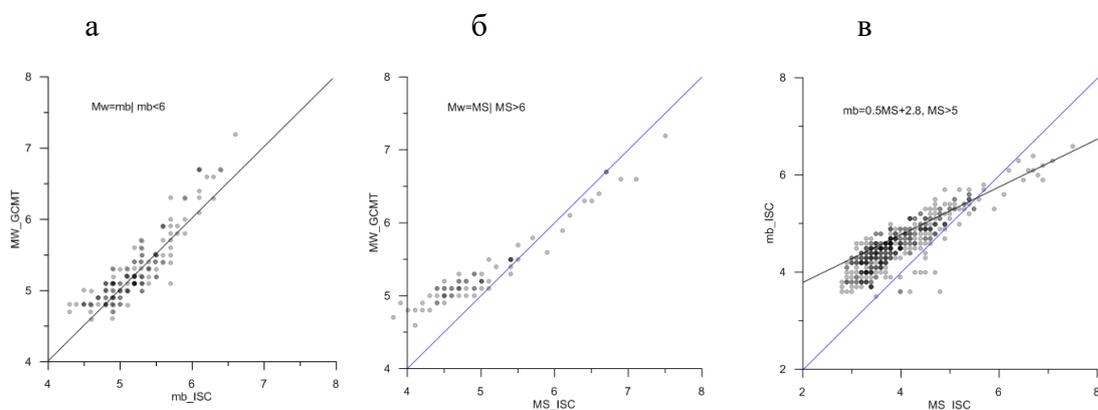


Рис. 13. Регрессионные соотношения магнитуд глобальных сетей. а) $Mw_GCMТ$ и mb_ISC ; б) MS_ISC и $Mw_GCMТ$; в) MS_ISC и mb_ISC . Синяя линия на б, в – линия равенства магнитуд.

Исходя из сравнительного анализа различных типов магнитуды был установлен следующий приоритет магнитуд для выбора одного значения:

1. M_w GCMТ, для сильных землетрясений до 1976г. Используется MS_ISC.
2. M_b ISC
3. Магнитуда по энергетическому классу
4. ML Алтай
5. Другие магнитуды.

Надежная идентификация дублей позволяет построить регрессионные соотношения для различных типов магнитуды. Энергетические классы и локальная магнитуда из Российских каталогов были преобразованы по регрессионным соотношениям с магнитудой mb ISC, т.к. число землетрясений с магнитудой M_w GCMТ невелико (Рис. 14). Корреляции естественным образом отличаются от регрессионного соотношения Раутиан, которое было построено для соотношения класса и магнитуды по поверхностным волнам. Важно отметить, что соотношения получились разными для разных региональных сетей. Байкал и Якутия показывают одинаковое соотношение: $mb=kr/2-1.6$ (Рис. 14б). Алтай отличается, здесь $mb=kr/2-1.2$. Приморье также отличается $mb=kr/2-2.0$ (Рис. 14в). Приморских землетрясений в регионе мало, корреляция ненадежная, на рис. 2С показан 95% доверительный интервал, соотношение для Байкала в него не попадает. Такие же соотношения были использованы для событий из каталога ISC, для которых известен энергетический класс. Формула выбиралась напрямую по агентству (ASRS, BYKL, YARS, SKLH), или по территории: западнее 98°E использована формула для Алтая, восточнее – формула для Байкала-Якутии.

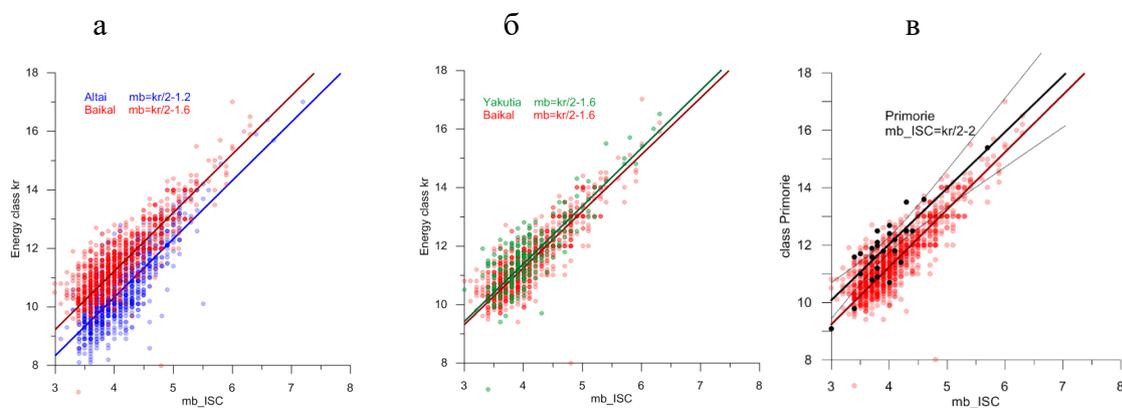


Рис. 14. Регрессионные соотношения энергетического класса с магнитудой mb ISC. а)Алтай (синий) и Байкал (красный), б)Байкал (красный) и Якутия(зеленый),в)

Байкал (красный) и Приморье(черный), тонкими линиями показан 95% доверительный интервал.

Регрессионные соотношения $ML_{\text{Алтай}}$ и mb_{ISC} показаны на Рис. 15а. Соотношение выглядит не очень надежным, оно было проверено корреляций магнитуды, пересчитанной из класса и ML (Рис. 15б). Число землетрясений, для которых приведен класс и ML , значительно больше, чем число землетрясений с известными ML и mb_{ISC} . Корреляции получились одинаковыми.

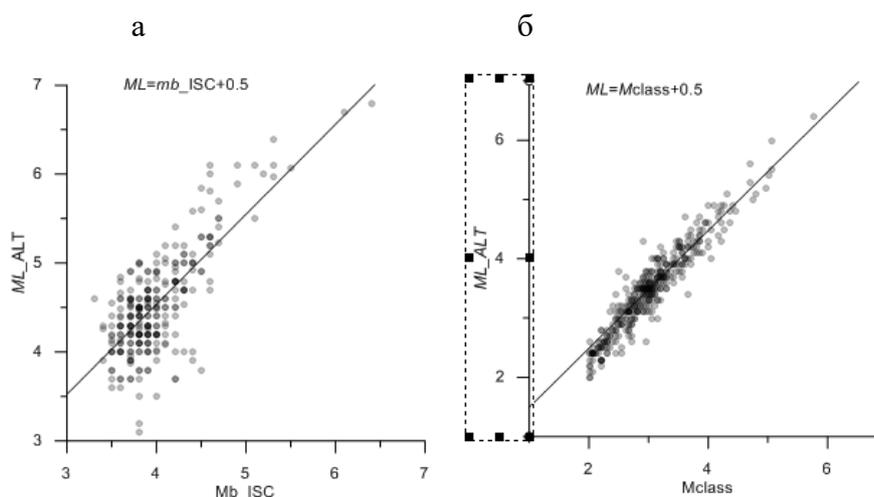


Рис. 15. Регрессионные соотношения $ML_{\text{АЛТ}}$ с магнитудой mb_{ISC} . а) $ML_{\text{АЛТ}}$ и mb_{ISC} . б) Проверочное соотношение ML и M_{class}

Другие типы магнитуды имеют около 15% событий, все эти события из каталога ISC. Разнообразие типов и агентств очень велико (Таблица 3). Для построения регрессионных соотношений с mb_{ISC} были использованы все события из ISC. Многие соотношения получились ненадежными, поэтому почти для всех типов магнитуд было выбрано преобразование типа сдвиг $M = mb_{\text{ISC}} + \text{constanta}$, если явно неочевидно другое соотношение. Формулы приведены в таблице 2, список агентств – в таблице 3.

Большое число событий имеет магнитуды ML_{IDC} , M_{ASRS} , M_{KRAR} . Событий с другими типами магнитуд немного. Соотношение ML_{IDC} и mb_{ISC} показано на рис. 15а. Для магнитуд M_{ASRS} и M_{KRAR} нет регрессионного соотношения с mb_{ISC} (нет событий у которых есть обе магнитуды). Для них использованы не прямые корреляции с ML_{IDC} и энергетическим классом Алтая (Рис. 16б, 15б, в). Корреляции остальных магнитуд показаны на Рис. 17-24.

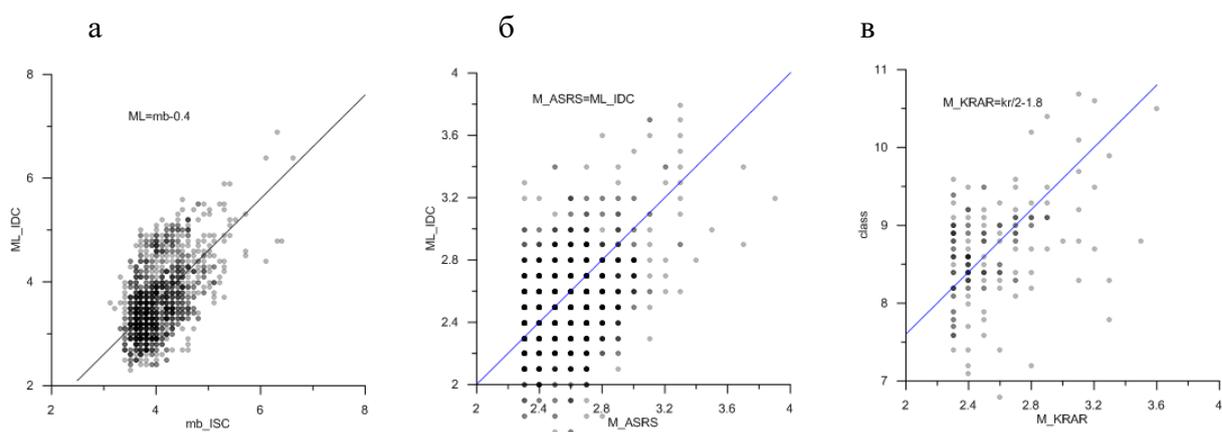


Рис. 3.16. Регрессионные соотношения магнитуд а) ML_IDC с магнитудой mb_ISC ; б) M_ASRS и ML_IDC ; в) M_KRAR и энергетический класс Алтая. Соотношения ненадежные.

Таблица 3. Статистики объединенного каталога по типам магнитуды.

№	Число событий	Тип_Агентство	Формула пересчета	Примечание
1	142	MW_GCMT	$M = MW_GCMT$	Рис. 13а
2	2560	mb_ISC	$M = mb_ICS$	Рис. 13а
3	10	MS_ISC	$M = MS_ISC$	Используется до 1976 для сильных землетрясений с $mb \geq 5.5$, или если нет других магнитуд (Рис. 13б)
4	15774(RUS) +9378(ISC)= 25152	KrALT, ASRS Другие агентства из ISC	$M = kr/2 - 1.2$	Рис. 14а
5	5904	ML_ALT	$M = ML_ALT - 0.5$	Рис. 15
6	59789(RUS)+ 53(ISC)= 59842	Kr_BKL, BYKL	$M = kr/2 - 1.6$	Рис. 14а
7	6722(RUS) +843(ISC)= 7565	Kr_YAK, YARS Другие агентства из ISC	$M = kr/2 - 1.6$	Рис. 14б
8	1018(RUS)	Kr_PRM,	$M = kr/2 - 2.0$	Мало событий, формула проверена по

				всем землетрясениям Приморья (Рис. 14в)
9	7186	M_ASRS	$M = M_ASRS + 0.4$	Непрямое соотношение с ML_IDC, в основном маленькие землетрясения Mmax 4.1, 65 событий M3.5+ (Рис. 16б)
10	12	MLh_ASRS	$M = MLh_ASRS - 0.5$	Рис. 17а
11	1	MLv_ASRS	$M = MLv_ASRS - 0.5$	Рис. 17б
12	3	MU_ASRS	$M = MU_ASRS + 0.4$	Рис. 17в
13	1	BGR_mb	$M = BGR_mb$	Рис. 23б
14	1	mb_BJI	$M = mb_BJI + 0.2$	Рис. 21а
15	172	ML_BJI	$M = ML_BJI - 0.3$	Рис. 21б
16	25	M_BYKL	$M = M_BYKL$	Рис. 23а
17	31	mb_EDIC	$M = 2mb_EDIC - 3.6$	Рис. 18а
18	3	ML_EDIC	$M = ML_EDIC + 0.2$	Рис. 18б
19	25	mb, mbtmp_IDC	$M = 1.4 mbtmp_IDC - 1.4$	Рис. 18в
20	8325	ML_IDC	$M = ML_IDC + 0.4$	Много событий, Mmax=5.1. Корреля- ция ненадежная (Рис. 16а)
21	1711	M_KRAR	$M = M_KRAR + 0.6$	Непрямое соотношение с классом Алтая, в основном маленькие события, Mmax3.9, 53 события M3.5+ (Рис. 16в)
22	1	M_LAO	$M = M_LAO$	Рис. 24а
23	13	M_MOS	$M = M_MOS$	Рис. 19а
24	29	mb_MOS	$M = mb_MOS - 0.2$	Рис. 19б
25	1	MS_MOS	$M = 0.6MS_MOS + 2$	Рис. 19в
26	8	mb_NEIC	$M = mb_NEIC$	Рис. 24б
27	383	mpv_NNC	$M = mpv_NNC - 0.2$	Рис. 23в
28	181	ML_OBM	$M = ML_OBM + 0.2$	Рис. 20а
29	6	MS_PEK	$M = MS_PEK + 0.2$	Рис. 20б
30	1	M_SKLH	$M = M_SKLH$	-
31	3	mb_USCGS	$M = mb_USCGS$	Рис. 20в
32	78	M_YARS	$M = M_YARS + 0.6$	Рис. 22а
33	89	ML_YARS	$M = ML_YARS + 0.6$	Рис. 22б
34	98	MSV_YARS	$M = MSV_YARS + 0.2$	Рис. 22в

Примечание: желтым выделены ненадежные корреляции, красным – крайне ненадежные, практически неустановленные (110 событий)

Таблица 4. Список российских агентств и агентств из ISC

	АГЕНТСТВА РОССИИ		
ALT	Землетрясения в СССР, Алтай-Саяны Землетрясения Северной Евразии, ГС РАН, Алтай-Саяны Землетрясения России, ГС РАН, Алтай-Саяны		Россия
BKL	Землетрясения в СССР, Байкал Землетрясения Северной Евразии, ГС РАН, Байкал Землетрясения России, ГС РАН Байкальский филиал ГС РАН		Россия
PRM	Землетрясения в СССР, Приморье Землетрясения Северной Евразии, ГС РАН, Приморье Землетрясения России, ГС РАН		Россия
YAK	Землетрясения в СССР, Якутия Землетрясения Северной Евразии ГС РАН, Якутия Землетрясения России ГС РАН		Россия
	АГЕНТСТВА ИЗ ISC		
AASRS	Altai-Sayan Seismological Centre, GS SB RAS		Russia
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe		Germany
BYKL	Baykal Regional Seismological Centre, GS SB RAS		Russia
BJI	China Earthquake Networks Center		China
EIDC	Experimental (GSETT3) International Data Center		U.S.A.
GCMT	The Global CMT Project		U.S.A.
IDC	International Data Centre, CTBTO		Austria
ISC	International Seismological Centre		United Kingdom
KRAR	Krasnoyarsk Scientific Research Inst. of Geology and Mineral Resources, Russia		Russia
LAO	Large Aperture Seismic Array		U.S.A.
MOS	Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences		Russia
NEIC	National Earthquake Information Center		U.S.A.
OBM	Research Centre of Astronomy and Geophysics		Mongolia
PEK	Peking	BJI	China
SKHL	Sakhalin Experimental and Methodological Seismological Expedition, GS RAS		Russia
USCGS	United States Coast and Geodetic Survey	NEIC	U.S.A.
WMO	Wichita Mountains Observatory	NEIS	U.S.A.
YARS	Yakutiya Regional Seismological Center, GS SB RAS		Russia

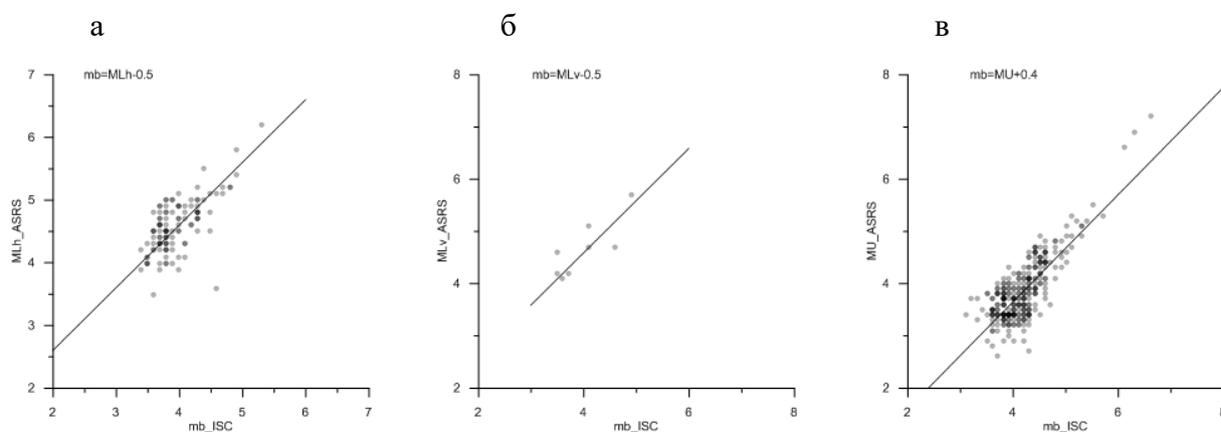


Рис. 17. Регрессионные соотношения магнитуд ASRS а)MLh, б)MLv, в)MU

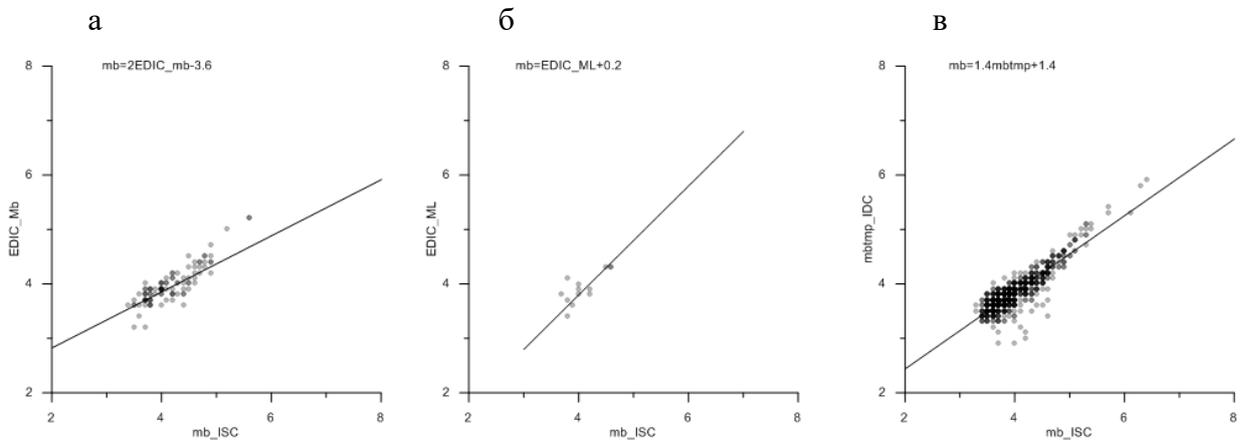


Рис. 18. Регрессионные соотношения магнитуд IDC, EDIC а)Mb_EDIC, б)ML_EDIC, в)mbtmp_IDC

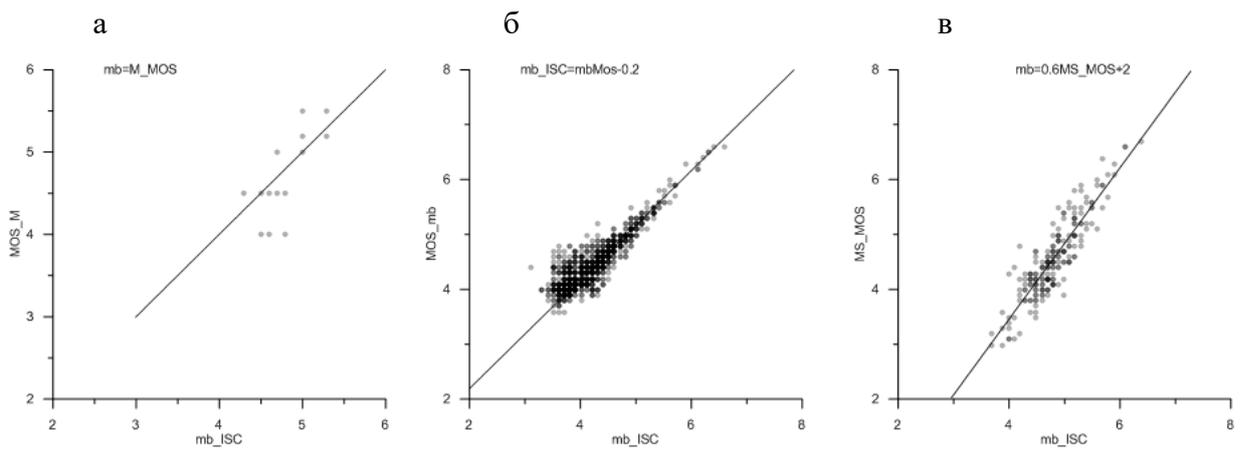


Рис.19. Регрессионные соотношения магнитуд MOS а)M_MOS, б)mb_MOS, в)MS_MOS

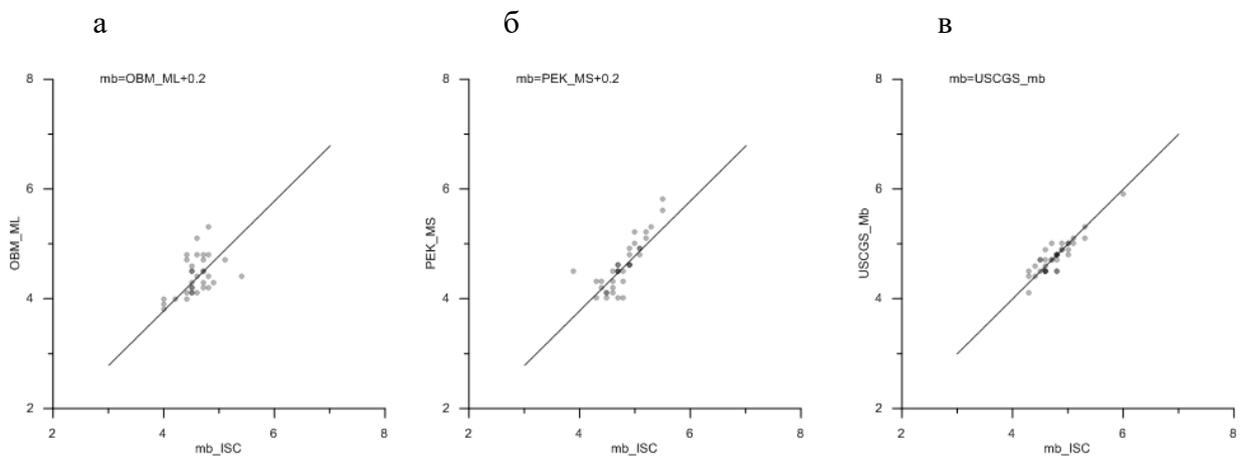


Рис. 20. Регрессионные соотношения магнитуд а)ML_OBM, б)MS_PEK, в)mb_USCGS

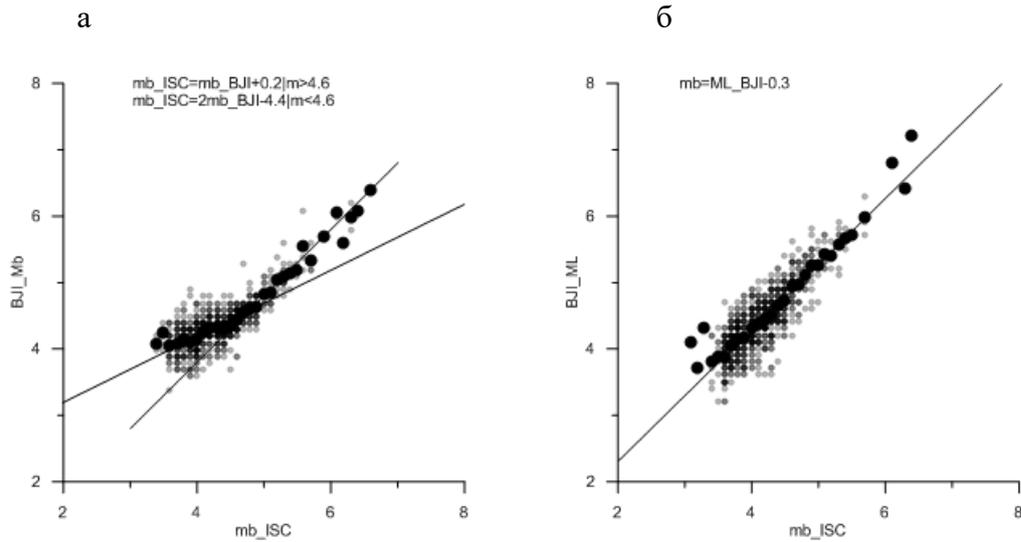


Рис. 21. Регрессионные соотношения магнитуд ВJI. а) $mb_ВJI$, б) $ML_ВJI$

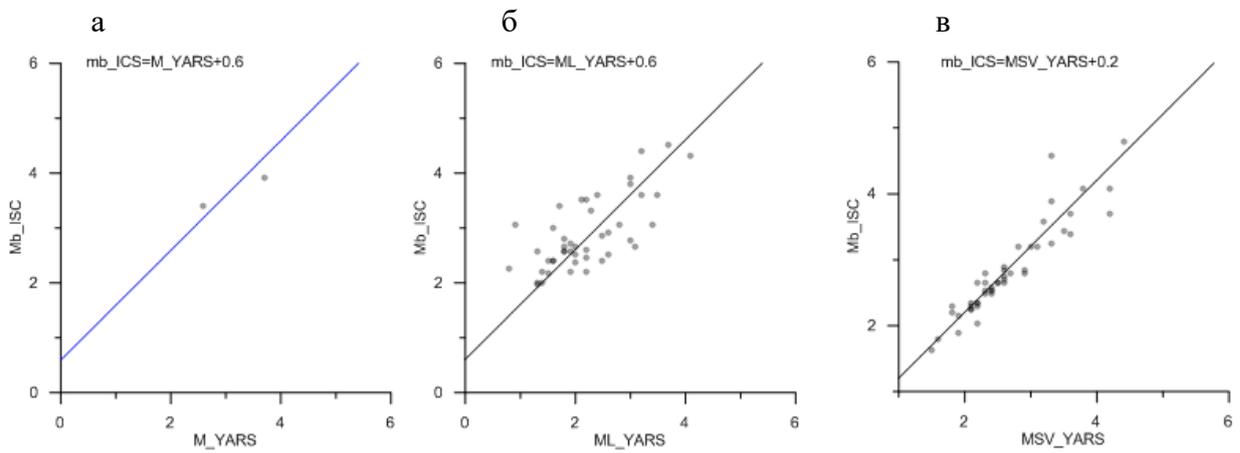


Рис. 22. Регрессионные соотношения магнитуд YARS. а) M_YARS , б) ML_YARS , в) MSV_YARS

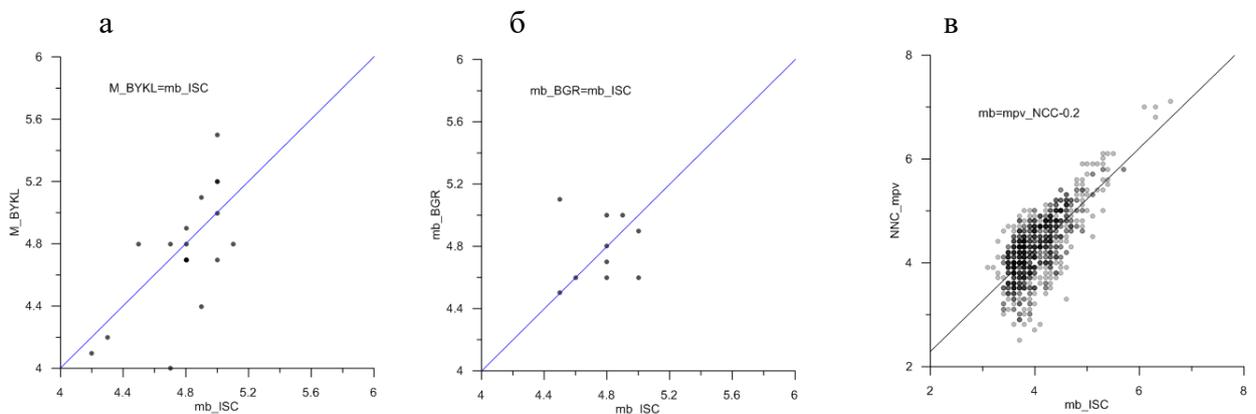


Рис. 23. Регрессионные соотношения магнитуд. а) M_BYKL , б) mb_BGR , в) mpv_NNC

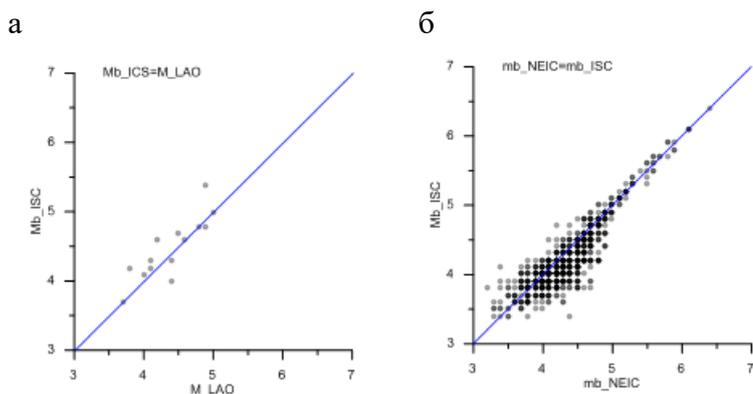


Рис. 24. Регрессионные соотношения магнитуд. а) M_{LAO} , в) mb_{NEIC} .

В качестве окончательного значения магнитуды в каталоге принято значение с наиболее высоким приоритетом, пересчитанное по соответствующему регрессионному соотношению к единой шкале (Таблица 3.2). Каталог, в котором исключены дубли и магнитуды приведены к единой шкале, далее называется *калиброванный каталог землетрясений*. Каталог в виде текстового файла находится в Приложении В. Значения параметров разделены знаками табуляции. Формат каталога: 1) Год, 2) месяц, 3) день, 4) час, 5) минута, 6) секунда (дата и время возникновения землетрясения), 7) широта, град., 8) долгота, град. (координаты эпицентра землетрясения в системе WGS84), 9) глубина очага, км, 10) магнитуда, 11) время землетрясения в дробных годах, 12-17) дополнительная информация (не используется для целей данной НИР).

Литература

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.