

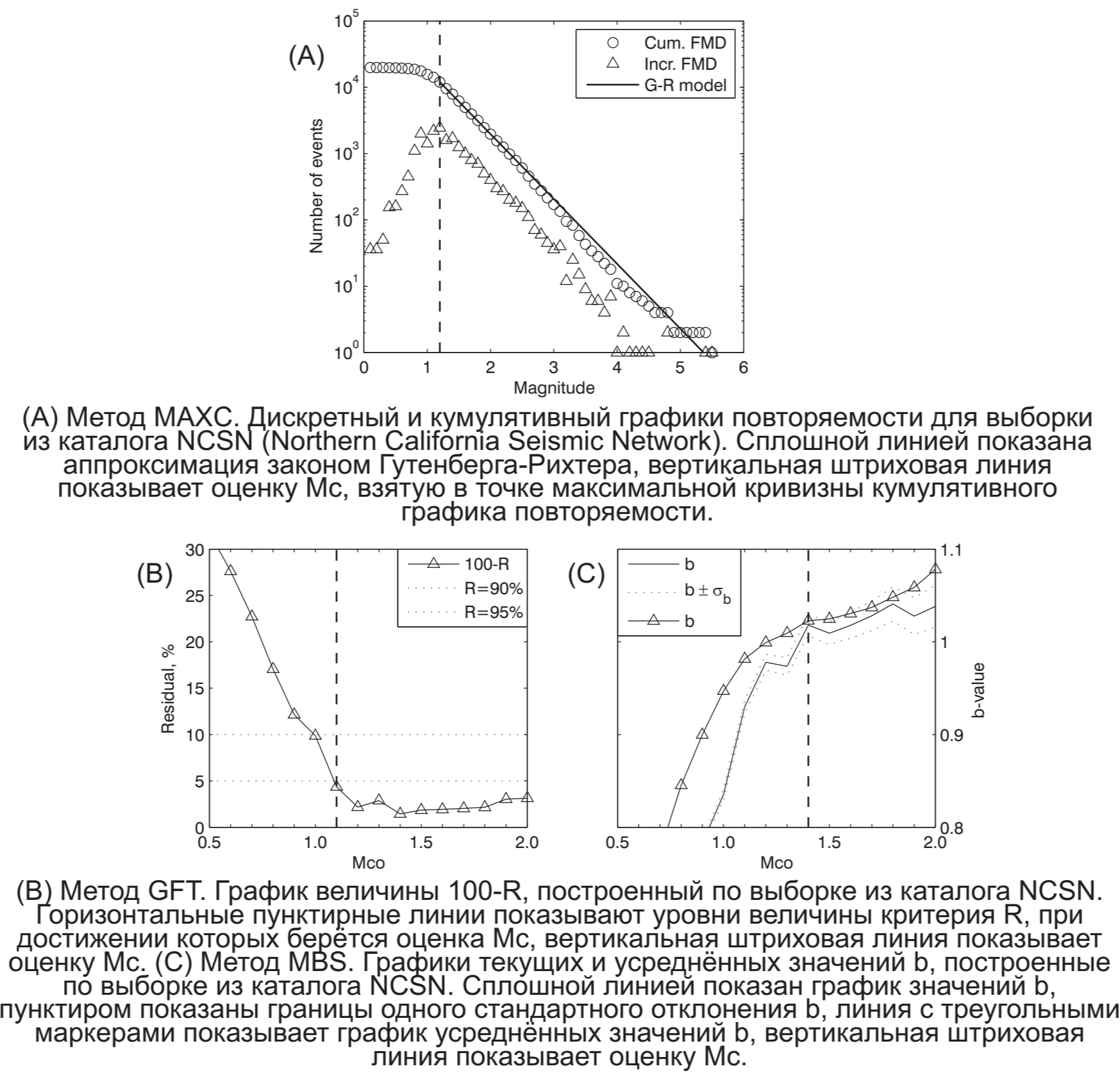
Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений

В. А. Павленко, А. Д. Завьялов
pavlenko.vasily@gmail.com, zavyalov@ifz.ru
Институт физки Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Аннотация

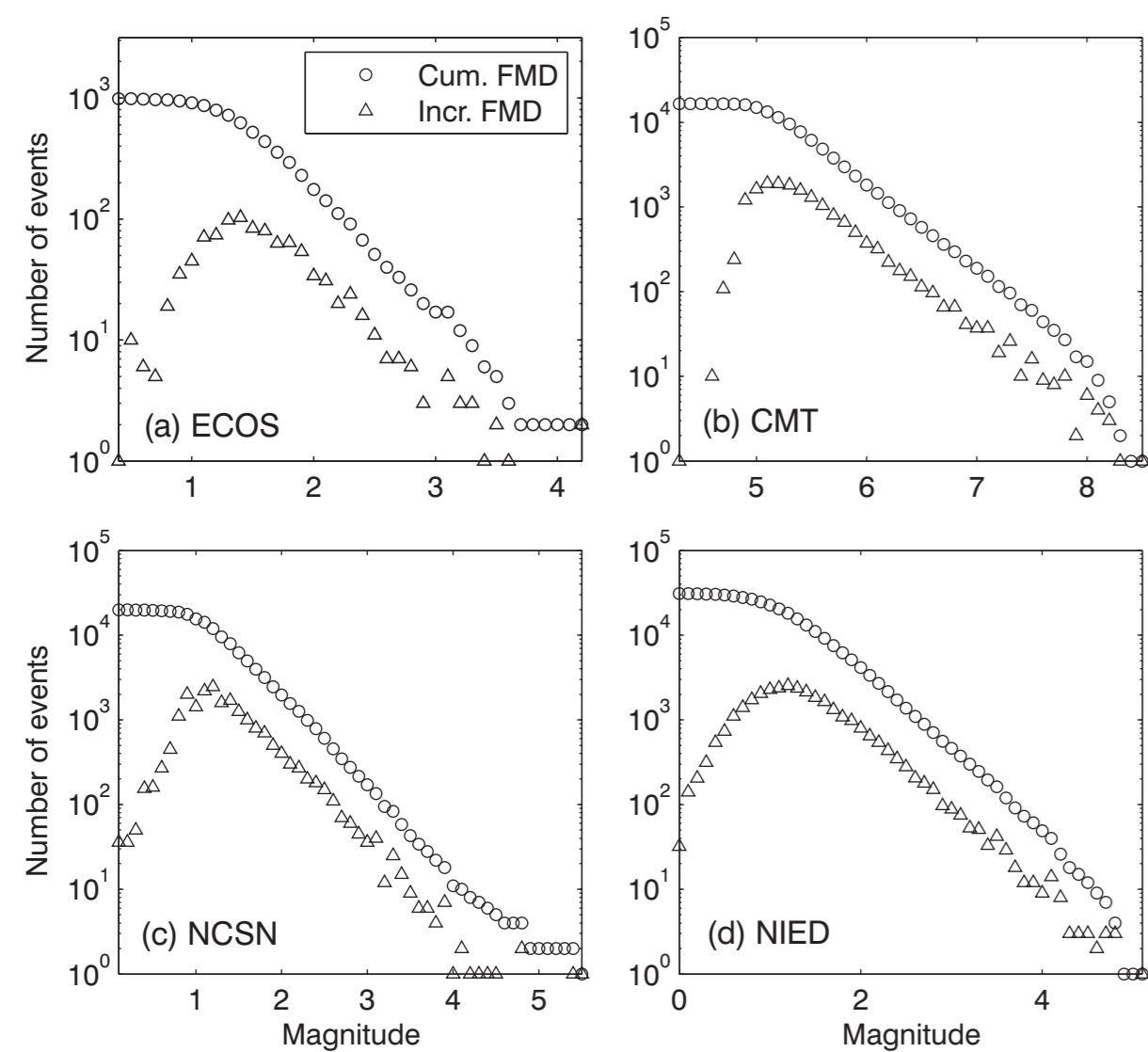
Магнитуда представительной регистрации M_c - это минимальная магнитуда, для которой землетрясения в заданной пространственно-временной области регистрируются в полном объёме. Значение M_c соответствует началу линейной части графика повторяемости землетрясений, поэтому надёжная оценка M_c критически важна для получения корректных оценок параметров Гутенберга-Рихтера. Некорректная оценка величины M_c приводит к получению неадекватных значений параметров сейсмичности и ошибочной интерпретации данных. Значение M_c изменяется в пространстве и во времени, эти вариации необходимо учитывать при работе с каталогами землетрясений для оценки различных параметров сейсмического режима. В работе сравниваются шесть современных методов оценки M_c : два непараметрических метода MAXC (Wyss et al., 1999), MBASS (Amorese, 2007) и четыре параметрических: GFT (Wiemer and Wyss, 2000), MBS (Cao and Gao, 2002), EMR (Woessner and Wiemer, 2005), LLS (Писаренко, 1989). Для сравнения методов использованы выборки из реальных инструментальных каталогов землетрясений, а также синтетические каталоги, сгенерированные на основе трёх моделей распределения магнитуды, встречающихся при анализе реальных инструментальных каталогов: модель неоднородной выборки (Woessner and Wiemer, 2005), модель однородной выборки (Mignan, 2012), модель выборки, из которой удалены слабые землетрясения (Garcia-Hernandez et al., 2019). Для анализа вариаций оценок M_c использован метод бутстрап (Chernick, 1999). Проанализированы зависимости двух первых моментов распределений оценок M_c от формы распределения магнитуды и объёма выборки. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации. Метод MAXC следует использовать для анализа представительности малых выборок, объёмом до нескольких десятков событий. Для более объёмных выборок этот метод занижает M_c и не рекомендуется к использованию. Методы GFT и MBS применимы для анализа выборок среднего размера, содержащих от нескольких сотен до нескольких тысяч событий. Применять эти методы к более объёмным выборкам можно, но с большой осторожностью. Метод LLS недооценивает M_c на малых выборках, но даёт замечательные результаты для выборок среднего и большого объёма. Методы MBASS и EMR признаются неудачными и не рекомендуются к использованию. Картирование M_c в областях с высокими вариациями уровня регистрации должно опираться на анализ локальных выборочных распределений магнитуды.

Методы оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений M_c



(A) Метод MAXC. Дискретный и кумулятивный графики повторяемости для выборки из каталога NCSN (Northern California Seismic Network). Сплошной линией показана аппроксимация законом Гутенберга-Рихтера, вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c , взятую в точке максимальной кривизны кумулятивного графика повторяемости. (B) Метод GFT. График величины 100-R, построенный по выборке из каталога NCSN. Горизонтальные пунктирные линии показывают уровни величины критерия R, при достижении которых берётся оценка M_c , вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c . (C) Метод MBS. Графики текущих и усреднённых значений b , построенные по выборке из каталога NCSN. Сплошной линией показан график значений b , пунктиром показаны границы одного стандартного отклонения b , линия с треугольными маркерами показывает график усреднённых значений b , вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c . (D) Метод MBASS. Стрелками показаны типичные точки излома графика повторяемости. Точка 2 соответствует магнитуде M_c . На правой панели показаны бутстрап-распределения основной точки излома (точка 2, верхний график) и второстепенной точки излома (точки 1 и 3, нижний график). (E) Метод EMR. Серыми кружками показана аппроксимация моделью WW, вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c . На правой панели показан график зависимости логарифма функции правдоподобия, взятого с минусом, от величины M_c , вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c , взятую в максимум функции правдоподобия.

Анализ представительности выборок из инструментальных каталогов землетрясений

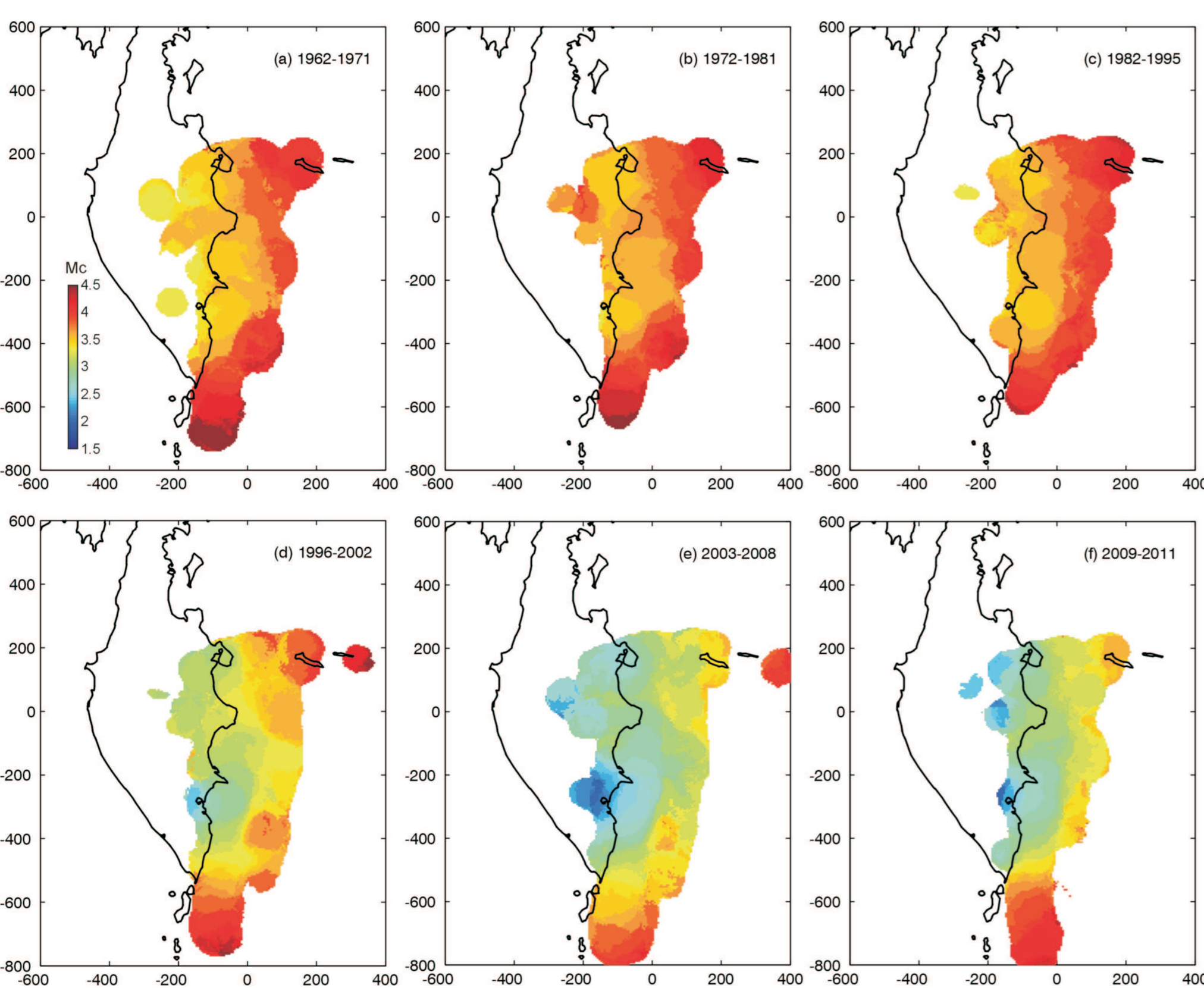


Графики повторяемости, построенные по выборкам из каталогов: (a) The Earthquake Catalog of Switzerland (ECOS) за 1992-2002 гг. (b) The Global Centroid Moment Tensor Catalog (CMT) за 1983-2002 гг. (c) The Northern California Seismic Network (NCSN) за 1998-2000 гг. (d) The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention Earthquake Catalog (NIED) за 1992-2002 гг.

Полученные оценки M_c :

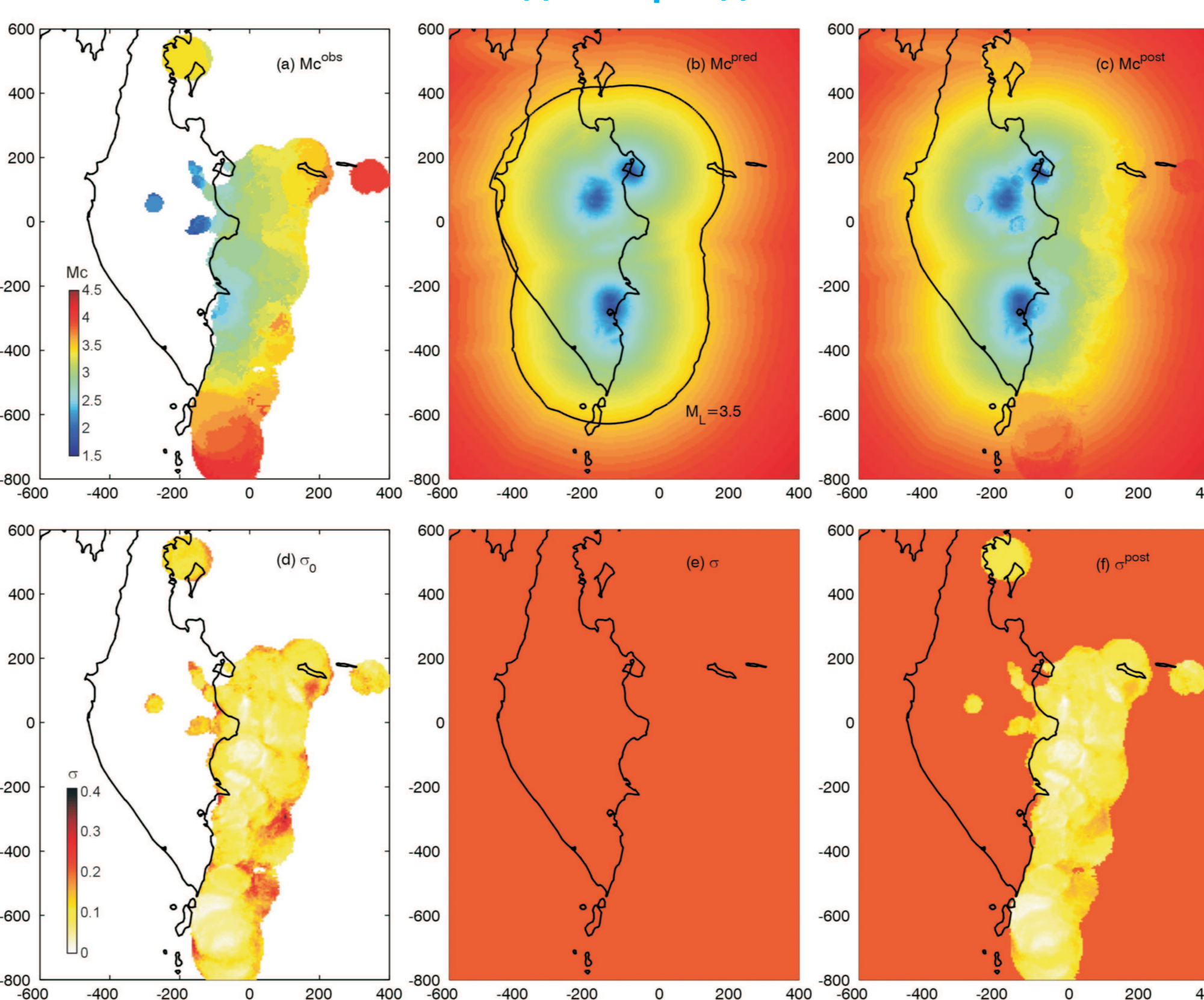
	ECOS	CMT	NCSN	NIED
M_c (MAXC)	1.37±0.06	5.15±0.06	1.20±0.00	1.20±0.01
M_c (GFT)	1.54±0.16	5.20±0.01	1.11±0.03	1.35±0.06
M_c (MBS)	1.66±0.13	5.42±0.06	1.46±0.16	1.98±0.10
M_c (MBASS)	1.39±0.27	5.39±0.07	1.20±0.00	1.39±0.10
M_c (EMR)	1.55±0.14	5.31±0.07	1.20±0.03	1.27±0.05
M_c (LLS)	1.55±0.15	5.44±0.05	1.20±0.01	1.84±0.15

Применение полученных результатов анализа для картирования M_c на Камчатке



Пространственные распределения M_c для периодов: (a) 1962-1971 гг. (b) 1971-1981 гг. (c) 1982-1995 гг. (d) 1996-2002 гг. (e) 2003-2008 гг. (f) 2009-2011 гг.

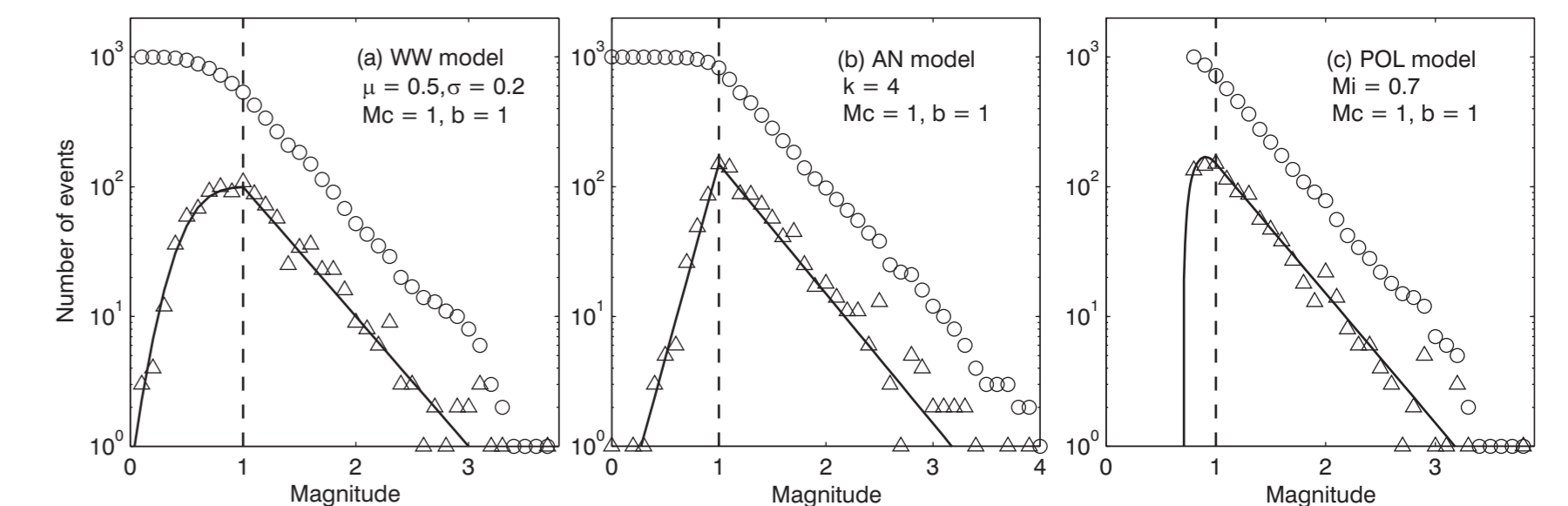
Построение Байесовского пространственного распределения M_c на Камчатке для периода 2012-2014 гг.



Верхний ряд графиков - пространственное распределение M_c : (a) наблюдаемое (b) априорное (c) апостериорное; Нижний ряд - распределение стандартной ошибки определения M_c : (d) наблюдаемое (e) априорное (f) апостериорное

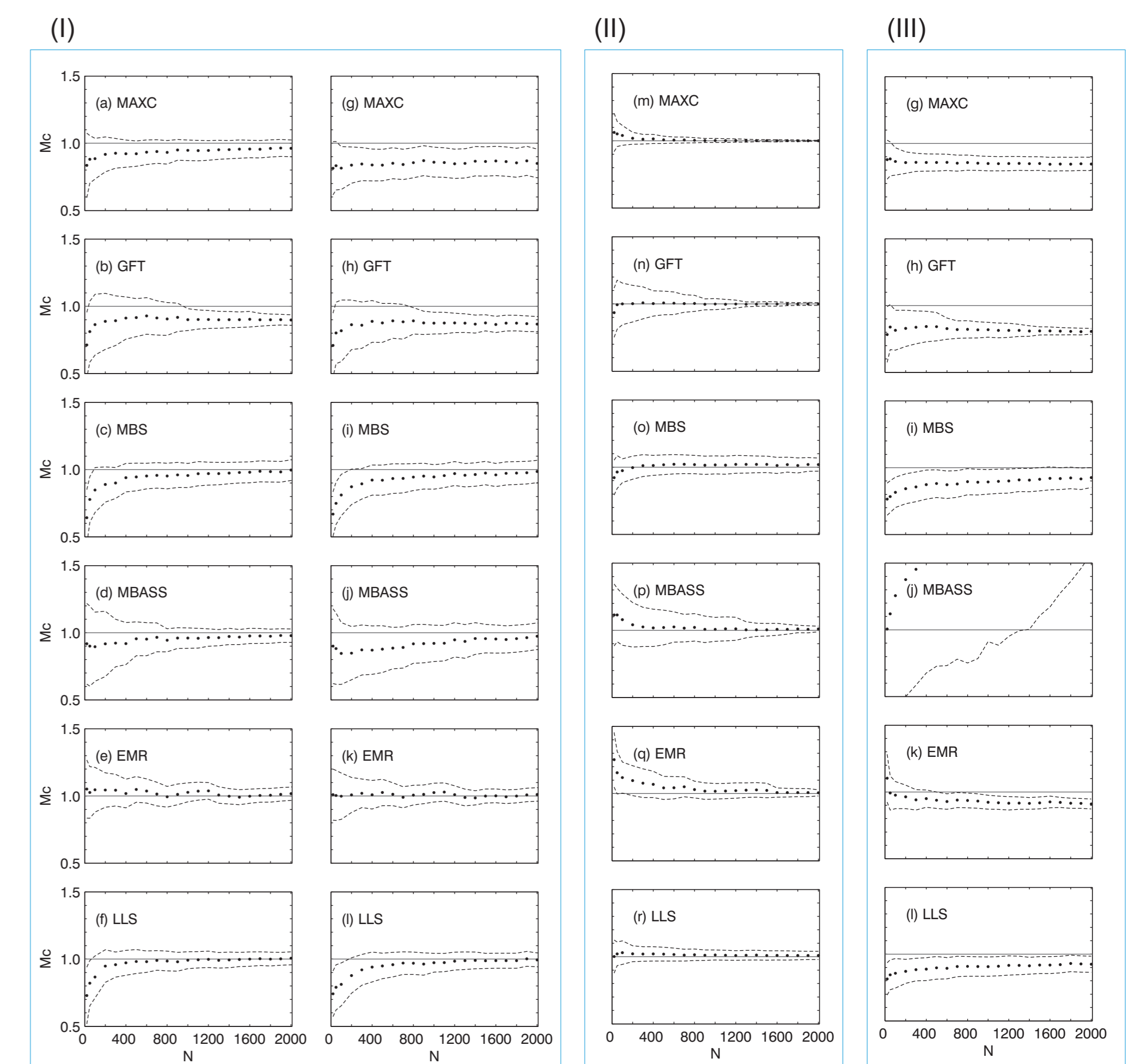
Тестирование методов оценки M_c на синтетических каталогах землетрясений

Для создания синтетических каталогов были использованы три модели распределения магнитуды, наиболее часто встречающиеся при анализе инструментальных каталогов землетрясений (Garcia-Hernandez et al., 2019): (a) модель WW (Woessner and Wiemer, 2005), в которой непредставительная часть выборки задаётся кумулятивной функцией нормального распределения (модель описывает неоднородную выборку значений магнитуды); (b) модель AN (Mignan, 2012), задающаяся асимметричным распределением Лапласа (модель описывает выборку значений магнитуды, в которой неоднородности M_c сведены к минимуму); (c) модель POL (Garcia-Hernandez et al., 2019), в которой непредставительная часть задаётся полиномом второй степени (модель описывает выборку, из которой были удалены слабые события)



Примеры случайных выборок объёмом по 1000 событий из синтетических каталогов, демонстрирующие разницу форм графиков повторяемости, получаемых при использовании трёх моделей распределения магнитуды.

Для каждой модели и для каждой комбинации значений параметров был сгенерирован синтетический каталог объёмом 10000 событий. Далее по синтетическим каталогам с помощью метода бутстрап оценивались зависимости двух первых моментов распределений оценок M_c от объёма выборки N .



Результаты тестирования методов оценки M_c на синтетических каталогах землетрясений: (I) - результаты для модели WW, (II) - результаты для модели AN, (III) - результаты для модели POL. На графиках горизонтальной чертой показано истинное значение M_c , точками показаны средние значения оценок M_c , пунктирными линиями обозначены границы одного стандартного отклонения от среднего.

(F) Метод LLS. Треугольниками показаны уровни значимости статистики $2Q_0$, кружками показаны уровни значимости величины L , вертикальная штриховая линия показывает оценку M_c . При $M_c < 1.4$ гипотеза H_1 отвергается с высоким уровнем значимости. При $M_c < 1.2$ гипотеза H_2 также отвергается, но при $M_c = 1.2$ уже нет достаточных оснований считать, что регистрация событий непредставительная, это значение принимается в качестве оценки M_c .

ЛИТЕРАТУРА

- Wyss M., A. Hasegawa, S. Wiemer, and N. Umino. Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, M 7.1 off-Sanriku earthquake, Japan. // Ann. Geophys. 1999. 42. 5. pp. 851-869. doi: 10.4401/ag-3765.
- Amorese D. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. 97. 5. pp. 1742-1749. doi: 10.1785/0120060181.
- Wiemer S. and M. Wyss. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2000. 90. 4. pp. 859-869. doi: 10.1785/0119990114.
- Cao A. M. and S. S. Gao. Temporal variation of seismic b-values beneath northeastern Japan island arc. // Geophys. Res. Lett. 2002. 29. 9. pp. 481-483. doi: 10.1029/2001GL013775.
- Woessner J. and S. Wiemer. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2005. 95. 2. pp. 684-698. doi: 10.1785/0120040007.
- Писаренко В. Ф. Дискретные свойства геофизической среды. О законе повторяемости землетрясений. / М.: Наука. 1989. с. 47-60.
- Mignan A. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude. // J. Geophys. Res. 2012. 117. B08302. doi: 10.1029/2012JB009347.
- Garcia-Hernandez R., L. D'Auria, J. Barrancos, and G. D. Padilla. On the functional expression of frequency-magnitude distributions: a comprehensive statistical examination. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2019. 109. 1. pp. 482-486. doi: 10.1785/0120180197.
- Chernick M. R. Bootstrap methods: a practitioner's guide. Wiley and Sons. 1999. 288 pp.
- Mignan A., M. J. Werner, S. Wiemer, C.-C. Chen, and Y.-M. Wu. Bayesian estimation of the spatially varying completeness magnitude of earthquake catalogs. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2011. 101. 3. pp. 1371-1385. doi: 10.1785/0120100223.