

УДК.550.34

Алтынбек уулу Талант

Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ), г. Бишкек, Кыргызстан

АЛГОРИТМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ МАГНИТУДЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Аннотация. Региональные системы раннего предупреждения требуют оперативной оценки магнитуды землетрясения на основе записей первых вступлений Р-волны. Разработанная в ЦАИИЗ система раннего предупреждения СЭС столкнулась с проблемой систематического занижения оценки магнитуды при поступлении данных от удалённых станций, что ярко проявилось при обработке землетрясения 22 января 2024 года. Причина в том, что за максимальное время оценки амплитуды Р-волны, установленное в данной системе равное 10 сек., амплитуда Р-волны на записях удалённых станций не успевала достичь максимума.

По результатам обработки землетрясения 22 января 2024 года были введены эмпирические плотности вероятности значения магнитуды, полученной по измеренным по первым секундам записи амплитудам, в зависимости от истинной магнитуды события и эпицентрального расстояния. Истинная магнитуда события оценивалась методом максимального правдоподобия с использованием этих плотностей.

Данный алгоритм был реализован в системе раннего предупреждения СЭС, что позволило стабилизировать и повысить точность оценки магнитуды.

Ключевые слова: системы раннего предупреждения о землетрясениях (СРПЗ), сейсмические волны, сейсмические станции, теорема Байеса, метод максимального правдоподобия, магнитуда.

БОРБОРДУК АЗИЯДАГЫ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨР ЖӨНҮНДӨ ЭРТЕ ЭСКЕРТҮҮ СИСТЕМАСЫ ҮЧҮН МАГНИТУДАНЫ БААЛООНУН ЫКТЫМАЛДЫК АЛГОРИТМИ

Кыскача мазмуну. Региондук эрте эскертүү системалары жер титирөөнүн магнитудасын Р-толкундун алгачкы секунддарындагы жазууларынын негизинде ыкчам баалоону талап кылат. БАЖПИде иштелип чыккан СЭС эрте эскертүү системасы алыскы станциялардан маалымат түшкөндө магнитуданы баалоону системалуу түрдө төмөндөтүп көрсөтүү көйгөйүнө туш болгон. Бул 2024-жылдын 22-январындагы жер титирөөнү иштетүүдө айкын көрүндү. Бул көйгөй, Р-толкундун амплитудасын өлчөөгө бөлүнгөн 10 секунддук убакыт алыскы станцияларда толкундун максималдуу амплитудасына жетүүгө жетишсиз болгондугунан улам пайда болгон.

2024-жылдын 22-январындагы жер титирөөнү иштетүүнүн жыйынтыктарына таянып, окуянын чыныгы чоңдугуна жана эпицентралдык аралыкка жараша жаздыруунун алгачкы секунддарында өлчөнгөн амплитудалардан алынган магнитуда мааниси үчүн эмпирикалык ыктымалдуулук тыгыздыктары киргизилген. Окуянын чыныгы магнитудасы бул тыгыздыктарды колдонуу менен максималдуу ыктымалдык методу аркылуу бааланган.

Бул алгоритм СЭС эрте эскертүү системасында ишке ашырылып, бул магнитуданы баалоонун тактыгын турукташтырууга жана жогорулатууга мүмкүндүк берди.

Негизги сөздөр: жер титирөөлөр жөнүндө эрте эскертүү системалары, сейсмикалык толкундар, сейсмикалык станциялар, Байестин теоремасы, максималдуу ыктымалдык методу, магнитуда.

PROBABILISTIC MAGNITUDE ESTIMATION ALGORITHM FOR CENTRAL ASIAN EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEM

Abstract. Regional Earthquake Early Warning Systems (EEWS) require a rapid estimation of earthquake magnitude based on the recordings of the first few seconds of the P-wave. The SES early warning system, developed at the Central Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG), encountered a systematic problem of underestimating the magnitude when incorporating data from distant stations. This issue was clearly demonstrated during the processing of the January 22, 2024, earthquake. This occurred because the maximum time allocated for P-wave amplitude estimation in the system (set to 10 seconds) was insufficient for the P-wave amplitude recorded at remote stations to reach its peak.

Based on the results of processing the January 22, 2024, earthquake, empirical probability density functions for the magnitude value obtained from the amplitudes measured in the first seconds of the recording, depending on the true magnitude of the event and the epicentral distance. The true magnitude of the event was then estimated using the maximum likelihood estimation method, incorporating these density functions.

This algorithm was implemented in the SES early warning system, which allowed for the stabilization and improvement of magnitude estimation accuracy.

Keywords: earthquake early warning systems, seismic waves, seismic stations, Bayes' theorem, maximum likelihood estimation, magnitude.

Для систем раннего предупреждения, в особенности региональных, магнитуду землетрясения необходимо оценить по записям первых нескольких секунд после приходов Р-волны на станции.

Быстрые оценки магнитуды основаны на наблюдениях ряда авторов о том, что величины некоторых параметров, измеренные в первые секунды после приходов Р-волны, коррелированы с финальными магнитудами землетрясений. Впервые эту идею высказал Накамура [Nakamura, 1984, Nakamura, 1988].

Метод Накамуры заключается в использовании доминирующего периода (частоты) в течение 2-4 сек после прихода Р-волны для оценки магнитуды. Доминирующий период τ_P рассчитывается по замерам амплитуд по скорости V и ускорению A :

$$\tau_P = 2\pi \sqrt{V/A}, \quad (1)$$

где V и A измеряются либо на разных каналах (велосиметр и акселерометр) одной и той же станции, либо получаются друг из друга путём интегрирования или дифференцирования.

В работах [Wu, Zhao, 2006, Zollo, Lancieri, Nielsen, 2006] рассматривается другой параметр – P_d – пиковое смещение, рассчитанное по вертикальной компоненте в первые три секунды после прихода Р-волны. Предложено соотношение:

$$Lg(P_d) = A + B \cdot M + C \cdot Lg(R), \quad (2)$$

где M – магнитуда, R – гипоцентральное расстояние, A , B , C – эмпирические константы, которые определяются путём регрессионного анализа.

В работах [Iervolino et al., 2006, Cua et al., 2007] предложен вероятностный подход к оценке магнитуд, основанный на формуле Байеса:

$$\rho(m|d) \sim \rho(d|m) \cdot \rho(m). \quad (3)$$

Здесь m – магнитуда, d – вектор наблюдаемых параметров, $\rho(m)$ – безусловная плотность вероятности землетрясения с магнитудой m , которую можно взять из соотношений Гутенберга-Рихтера.

В 2023-2024 годах в Центральном-Азиатском институте прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ) был разработан прототип системы раннего предупреждения о землетрясениях региона. Система находится в опытной эксплуатации в ЦАИИЗ с июля 2024 г. [Алтынбек уулу и др., 2024, Асминг и др., 2024]. Она получила название СЭС (на киргизском языке Сейсмикалык Эскертуу Системасы, т.е., система сейсмического предупреждения).

При разработке системы СЭС авторы столкнулись с той же проблемой оценки магнитуд. Первоначально был использован подход, в котором измерение амплитуды Р-волны на некоторой сеймостанции начиналось, когда приход был обнаружен, и уточнялось в течение максимум 10 секунд. Уточнение прекращалось, если данный приход был использован для генерации сообщения раньше.

Получалось, что амплитуда на станциях, близких к очагу землетрясения, измерялась дольше, чем на более удалённых, и поэтому лучше приближалась к максимуму, необходимый при оценке магнитуды.

Наиболее ярко это проявилось при обработке данных сильного землетрясения 22.01.2024 на севере Китая, вблизи кыргызско-китайской границы [Виноградов Ю. А. и др., 2024]. Оценка магнитуды события при первой реакции программы на событие (по Р-фазам, пришедшим на ближайшие к эпицентру станции) составила 6.1, а по мере обнаружения фаз от более далеких станций оценка снизилась до 4.4.

На рисунке 1 показаны значения магнитуды, вычисленные для отдельных станций, в зависимости от расстояния между станцией и эпицентром. Причина данной проблемы чётко визуализирована на рисунке 2, где представлены волновые формы этого землетрясения (рисунок 2). В частности, в SES амплитуда измеряется сразу после прихода Р-волны и модифицируется ещё в течение 10 секунд. На рисунке 2 видно, что для близких станций в этот 10-секундный интервал попадает или максимальная, или близкая к максимальной амплитуда. Для более далёких станций в 10-секундный интервал попадает фрагмент, на котором амплитуда в разы меньше максимума, соответственно, и магнитуда оказывается заниженной.

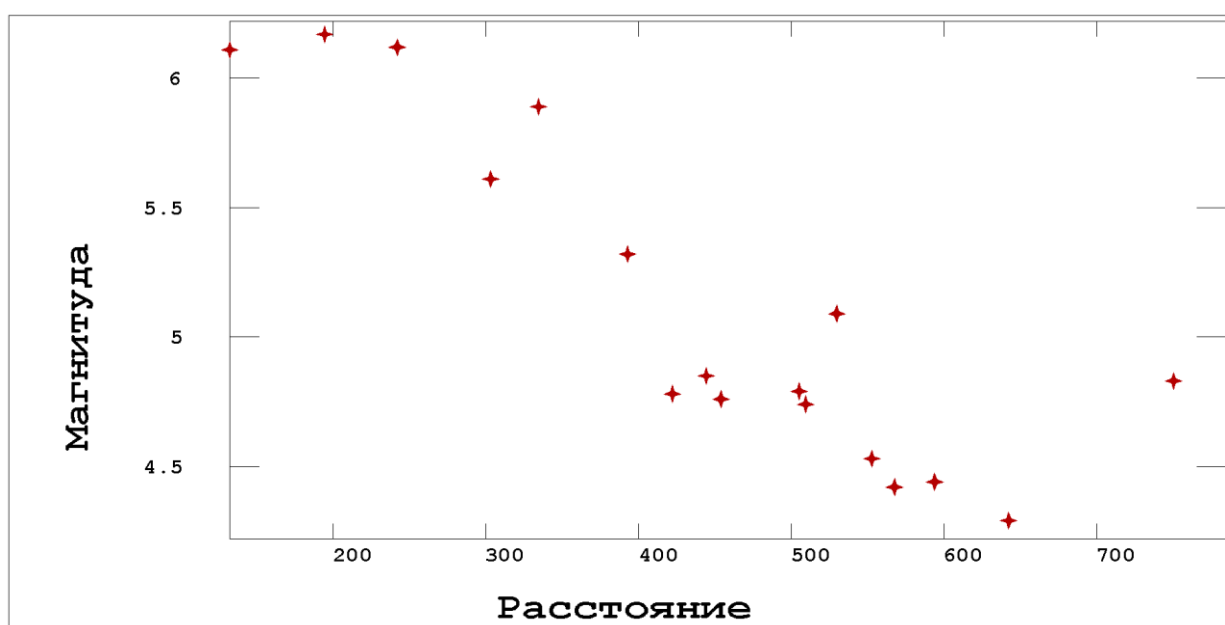


Рисунок 1. Диаграмма оценки магнитуд по отдельным станциям в зависимости от расстояния между станцией и событием.

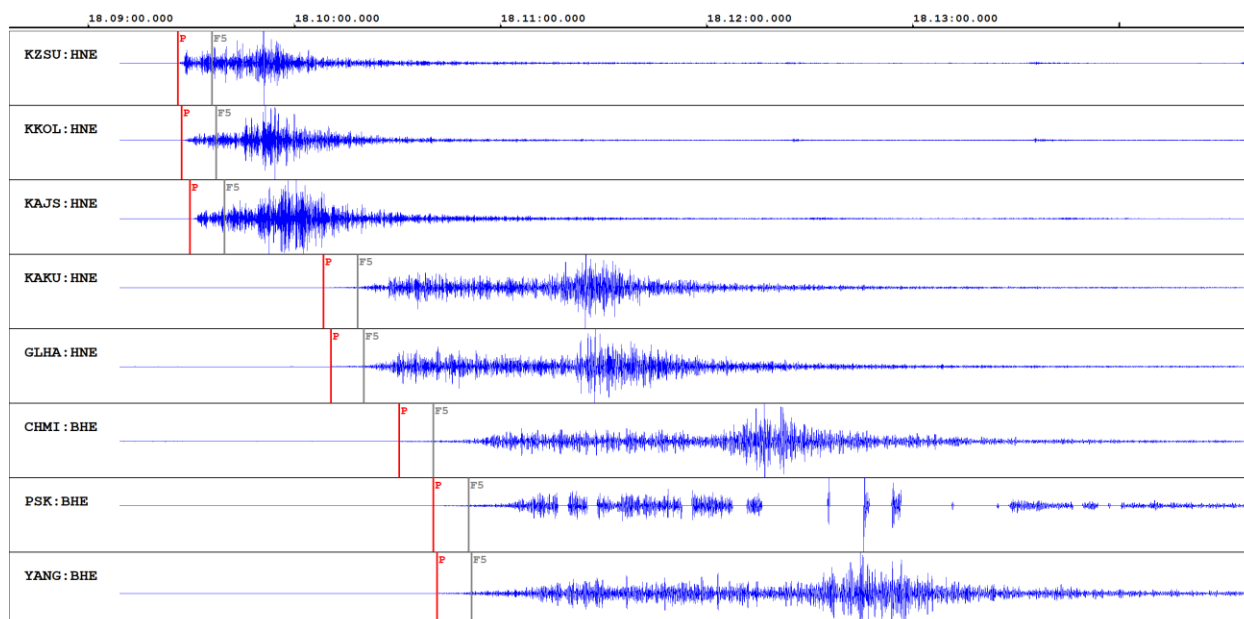


Рисунок 2. Волновые формы землетрясения 22 января 2024 года. Помечены вступления Р и 10-секундные интервалы измерения амплитуд в SES (интервалы Р- F_5).

Для самого первого, оперативного оповещения о землетрясении в данной ситуации нет ничего плохого – оценка магнитуды по приходам на самые близкие датчики близка к корректной оценке. Однако то, что в результате обработки более поздних фаз, то есть, в процессе уточнения первоначального решения, происходит снижение магнитуды, и в финальное донесение может попасть уже заниженная магнитуда, нуждается в коррекции.

Наиболее простой вариант – увеличить время измерения амплитуды с 10 секунд до максимально возможного для данной системы S-P (для 1000 км это около 120 сек). Этот вариант был протестирован, оценка магнитуды стабилизировалась, но программа стала работать на порядок дольше. Поэтому такой вариант был отвергнут.

Ф. Рингдалом был предложен статистический подход к оценке магнитуды сейсмического события по сети, он был основан на методе максимального правдоподобия при условии, что измерения магнитуды сейсмического события подчиняются нормальному распределению [Ringdal, 1976]. Этот подход был модифицирован с применением эмпирических функций плотности вероятности измерения магнитуды.

Если мы измерили магнитуду события на какой-либо станции, и она оказалась равной M , это не значит, что настоящая магнитуда события (m) тоже равна M . Будем считать, что в этом случае можно говорить о том, что с большей вероятностью она равна M . Введём эмпирическую плотность вероятности того, что, измеряя истинную магнитуду m мы получим результат M – «колпачок», как показано на рисунке 3.

Ф. Рингдал использовал в качестве такой эмпирической плотности распределение Гаусса, что не совсем реалистично, так как в таком случае в принципе реализуемыми оказываются сколь угодно большие расхождения между измеренной и истинной магнитудами.

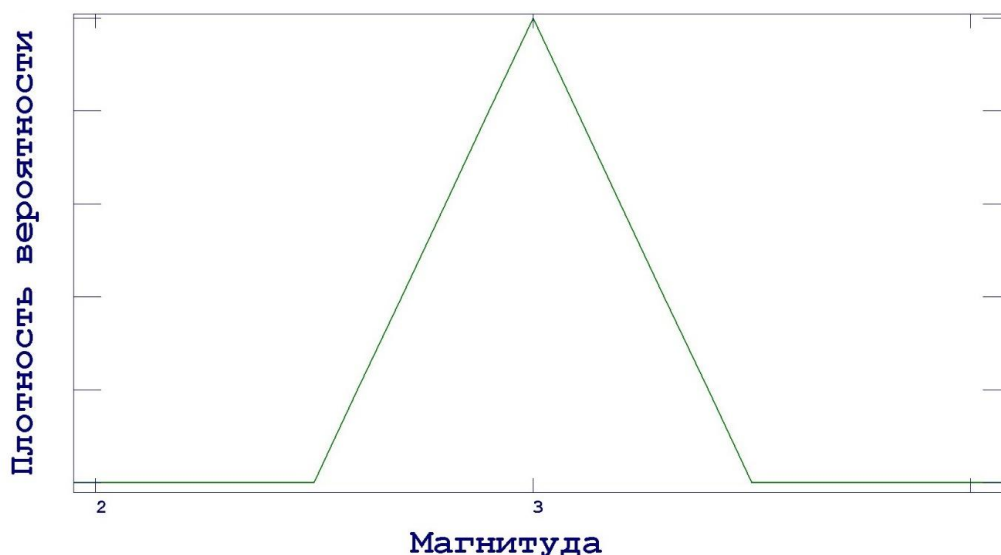


Рисунок 3. График эмпирической плотности вероятности значения измеренной магнитуды, если истинная магнитуда события равна 3 (масштаб по оси ординат условный).

Обозначим эту плотность вероятности $\rho(M|m)$, где M – измеренная магнитуда, m – истинная магнитуда события. Допустим, мы имеем несколько (n) независимых замеров одной и той же магнитуды M_i . Значения этой плотности вдали от центрального значения не равны 0 – это позволяет учесть вероятность того, что замер был полностью ложным.

Согласно теореме Байеса, плотность вероятности значений истинной магнитуды m при условии, что проведённые измерения дали результаты M_i , можно записать как:

$$\rho(m|M_1 \dots M_n) \sim \rho(m) \cdot \prod_i \rho(M_i|m) \quad (4)$$

Здесь $\rho(m)$ – безусловная плотность вероятности обнаружения события с магнитудой m . Эту плотность можно оценить из следующих соображений. Как известно, число событий на определенной территории подчиняется закону Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter 1944], который может быть записан как:

$$N = N_{tot} \cdot 10^{-b \cdot M} \quad (5)$$

Параметр b закона Гутенберга-Рихтера варьируется в диапазоне от 0.5 до 1.3 [Жалковский, 1988, Востриков 1994]. Согласно изложенному в [Абдрахматов и др., 2019], для землетрясений Кыргызстана в 2013 году $b=0.72$. Рассчитанный автором параметр b для землетрясений региона с магнитудами свыше 5.5 по данным бюллетеня ISC составил 1.1. Для оценки плотности вероятности в реализации описываемого алгоритма было взято значение $b=1$.

Однако, далеко не все сейсмические события регистрируются системой раннего предупреждения, поэтому определим $\rho(m)$ как функцию, пропорциональную произведению $10^{-b \cdot M}$ на вероятность обнаружения системой события с магнитудой m – $P_{det}(m)$. Эту вероятность зададим эмпирически. События с магнитудой меньше 1 система достоверно не обнаружит, события с магнитудой выше 3 берет с вероятностью 1. Отсюда

$$P_{det}(m) = \begin{cases} 0, m < 1 \\ \frac{m-1}{2}, 1 \leq m \leq 3 \\ 1, m > 3 \end{cases} \quad (6)$$

Окончательно,

$$\rho(m|M_1 \dots M_n) \sim P_{det}(m) \cdot 10^{-b \cdot m} \cdot \prod_i \rho(M_i|m) \quad (7)$$

Таким образом, оценить магнитуду m по замерам $M_1, \dots, M_n$ можно, рассчитав плотность вероятности $\rho(m|M_1 \dots M_n)$ согласно (7) и найдя её максимум. Пример приведён на рисунке 4.

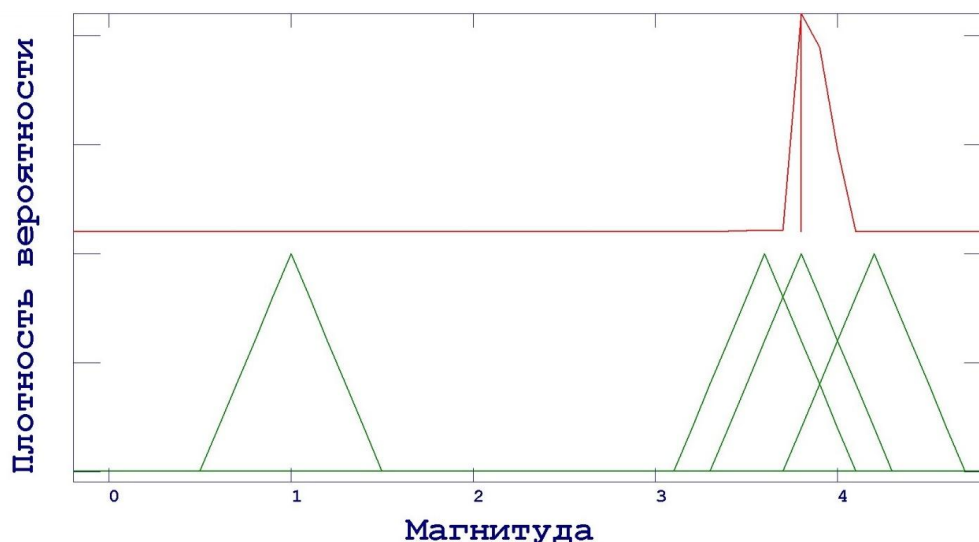


Рисунок 4. График оценки магнитуды по нескольким замерам (масштаб по оси ординат условный).

На рисунке 4 приведён пример оценки магнитуды по четырем замерам – 3.6, 3.8, 4.2 и 1 (ложное срабатывание). Красной линией показана итоговая плотность вероятности, достигающая максимума для магнитуды 3.8. Ложное срабатывание было проигнорировано.

Результаты определения методом максимального правдоподобия. По результатам обработки упомянутого выше землетрясения 22.01.2024 г. на севере Китая была введена эмпирическая функция возможной коррекции магнитуды (рисунок 5).

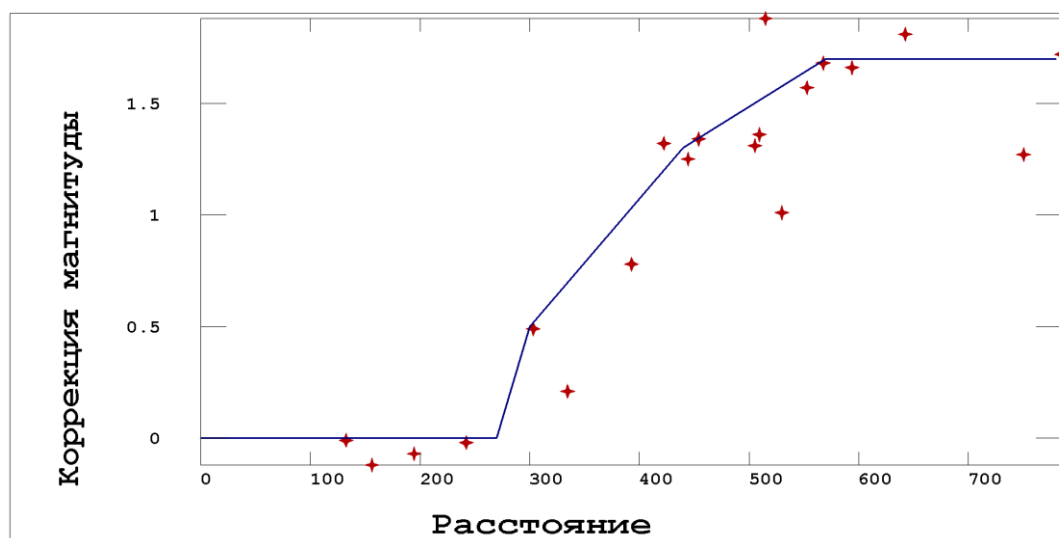


Рисунок 5. График эмпирической функции коррекции магнитуды.

Дальше постулируем следующее – если истинная магнитуда события равнялась m , то для станции на расстоянии R замер магнитуды может с равной вероятностью попасть в интервал $[m-f(R), m]$, где f – упомянутая выше эмпирическая функция. По крайней мере, на китайском землетрясении это наблюдалось, значит и для других землетрясений это возможно.

Другими словами, эмпирическая плотность распределения будет выглядеть как на рисунке 6.

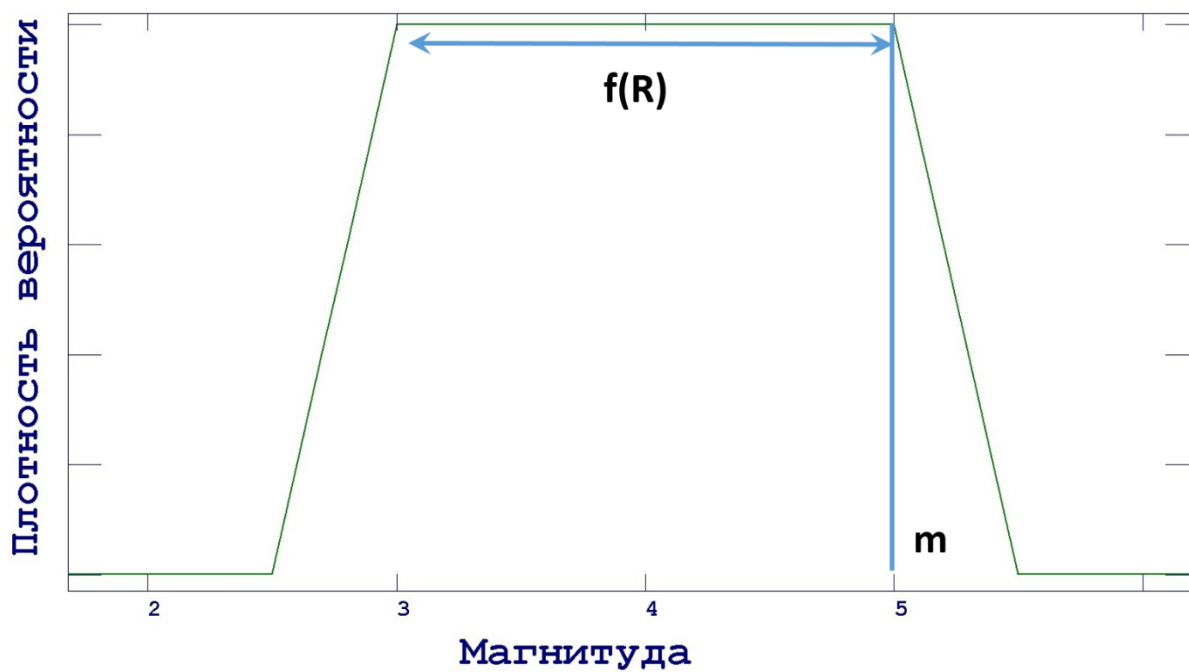
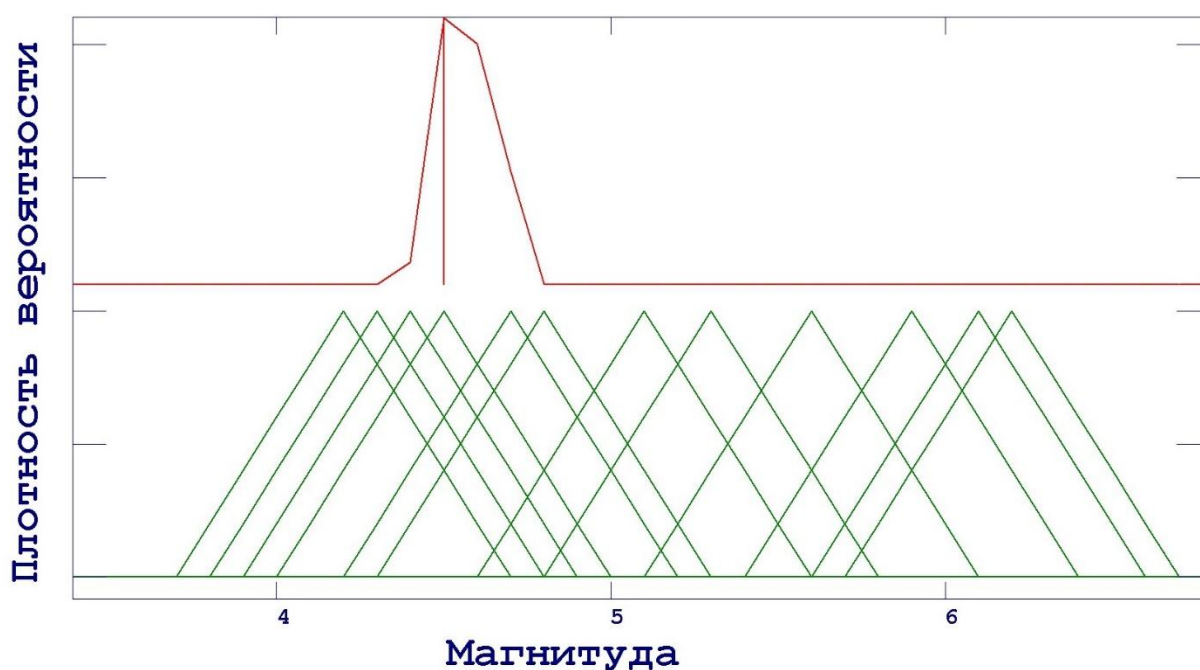
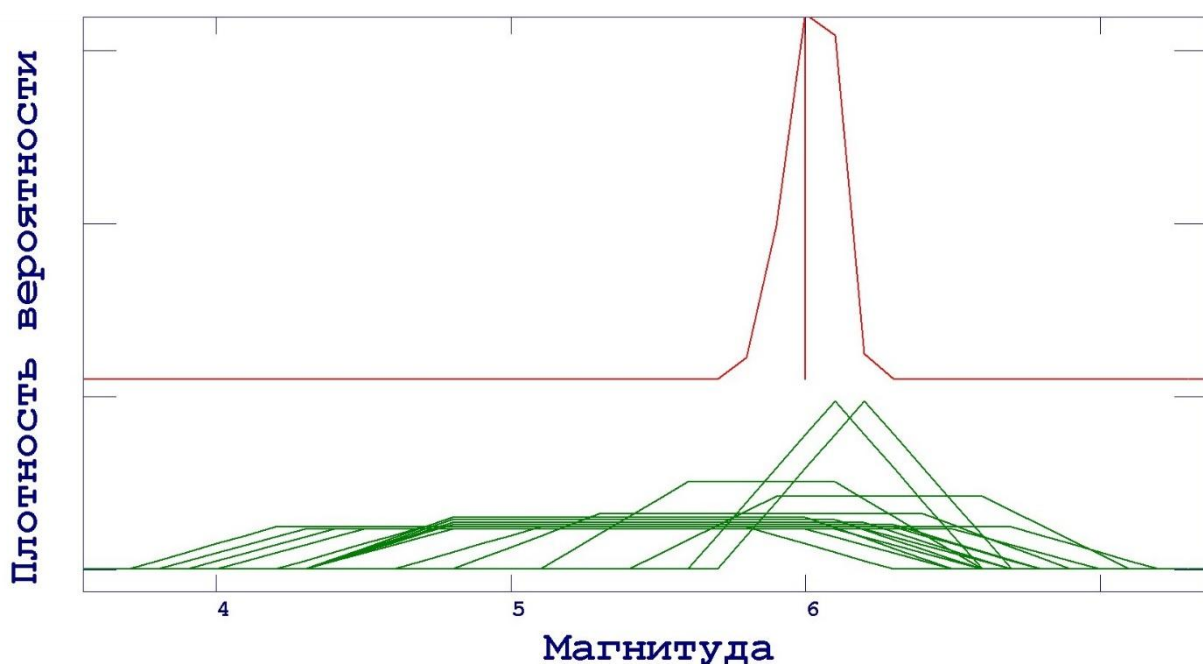


Рисунок 6. Плотность вероятности измеренной магнитуды M для реальной магнитуды m с коррекцией на расстояние (масштаб по оси ординат условный).

Ниже (рисунок 7) показаны усреднения магнитуд для китайского землетрясения без коррекции и с коррекцией.



(a)



(б)

Рисунок 7. Усреднения магнитуд для китайского землетрясения без коррекции (а) и с коррекцией (б). Масштаб по оси ординат - условный.

Алгоритм оценки магнитуды с использованием данной эмпирической функции был реализован в системе раннего предупреждения СЭС.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Особую благодарность выражаю Асмингу Владимиру Эрнестовичу, ведущему научному сотруднику, кандидату физико-математических наук, Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), за неоценимую помощь в решении сложных задач по обработке сейсмических данных и методологическое руководство в разработке системы СЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахматов К.Е., Фролова А.Г., Муралиев А.М., Берёзина А.В., Шукурова Р., Гребенникова В.В., Гессель М.О., Кучкаров К.И. Центральная Азия // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 108–119 doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.09
2. Алтынбек уулу Т., Асминг В.Э., Зубович А.В., Шаршебаев А.К. Прототип системы раннего предупреждения о сильных землетрясениях для территории Кыргызстана // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. Бишкек – 2024. – № 2(70). – С. 437–445. – DOI 10.56634/16948335.2024.2.437-445.
3. Асминг В.Э., Молдобеков Б.Д., Кучкаров К.И., Алтынбек уулу Т., Зубович А.В., Шаршебаев А.К. Создание системы раннего предупреждения о сильных землетрясениях для территории Кыргызстана и Узбекистана // Геофизические исследования. – 2025. – Т. 26, № 1. – С. 5–20. – DOI 10.21455/gr2025.1-1.

4. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Петрова Н.В., Пойгина С.Г., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара в I полугодии 2024 г. по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 7–26. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.01>.
5. Востриков Г.А. Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения /М.: ГИН РАН, 1994. — 292 с. — (Тр. ГИН; Вып. 482). - ISBN 5-201-12011-3
6. Жалковский Н.Д. Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия. Новосибирск, 1988. 29 с. (Препринт ИГиГ СО АН СССР).
7. Cua G, Heaton T. The Virtual Seismologist (VS) method: a Bayesian approach to earthquake early warning. In: Gasparini P, Manfredi G, Zschau J, editors. Earthquake early warning systems. Berlin: Springer; 2007. p. 97–132, doi:10.1007/978-3-540-72241-0_7.
8. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of Earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. 1944. Vol. 34. P. 185-188.
9. Iervolino I, Convertito V, Giorgio M, Manfredi G, Zollo A. Real-time risk analysis for hybrid earthquake early warning systems. J Earthquake Eng 2006;10(6):867–85, doi:10.1142/S1363246906002955.
10. Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). In: Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo–Kyoto, Japan, 1988.
11. Nakamura Y. Development of the earthquake early-warning system for the Shinkansen, some recent earthquake engineering research and practical in Japan. The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering 1984:224–38.
12. Ringdal F. Maximum-likelihood estimation of seismic magnitude // Bulletin of the Seismological Society of America (1976) 66 (3): 789–802
12. Wu Y. M., Zhao L. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. Geophys Res Lett 2006;33: L16312, doi:10.1029/2006GL026871.
13. Zollo A, Lancieri M, Nielsen S. Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records. Geophys Res Lett 2006;33: L23312, doi:10.1029/2006GL027795

Рецензент: д. ф.-м.н., Муралиев А.М.