

УДК 550.344

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТУД В РАБОТАХ ПО СЕЙСМИЧЕСКОМУ ЗОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан

Приводится описание разработанной методики перехода от различных типов магнитуд и энергетического класса сейсмических событий к единой магнитуде, коррелированной с моментной магнитудой M_w . На этой основе рассчитана магнитуда M_{wnew} , а также MLH_{new} для всех сейсмических событий, включенных в каталог землетрясений территории Республики Казахстан и прилегающих регионов с древнейших времен по 2009 г. Это позволяет анализировать совместно данные каталогов за различные периоды времени при изучении сейсмичности и сейсмической опасности территории Казахстана.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос создания новой карты сейсмического зонирования территорий Казахстана очень актуален. Действующая карта (ОСР 2003 г.) устарела и не отвечает новым данным и современным требованиям. Сейсмологической основой составления карты является каталог землетрясений за длительный период времени.

Созданный каталог землетрясений с древнейших времен по 2009 г. характеризуется большой неоднородностью данных с точки зрения оценки «размера» землетрясений. За почти столетний инструментальный период наблюдений менялись методические подходы к параметризации силы землетрясений, разрабатывались и применялись различные шкалы. В первую очередь это относится к магнитудным шкалам, позволяющим ранжировать землетрясения с помощью безразмерной величины – магнитуды. Понятие магнитуды было введено Ч. Рихтером в 1935 г. [1]. За разные годы в практике рутинных сейсмических наблюдений применялись разные магнитудные шкалы по типу используемых сейсмических волн (по объемным и поверхностным волнам), по типу аппаратуры (по короткопериодным и среднепериодным приборам), по типу используемых калибровочных кривых. В последние годы в мировой практике применяется моментная магнитуда, рассчитываемая через сейсмический момент.

Кроме магнитудных шкал, широко использовалась шкала энергетических классов. Энергетический класс был введен в практику наблюдений Т.Г. Раутиан [56] и получил распространение на всей территории СССР. Энергетический класс имеет прямое отношение к высвобожденной в очаге сейсмической энергии.

Для одного события в каталоге можно найти одно или несколько различных параметров, характеризующих его величину. Но как использовать совместно данные каталога за разные периоды для построения различных карт, расчетов сейсмической опасности, если у разных событий имеются разные характеристики энергии? Встает задача приведения различных типов магнитуд и энергетического класса к

одной наиболее удобной характеристике. Именно этой задаче посвящена данная работа.

АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ МАГНИТУДНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАТАЛОГЕ ЗА РАЗНЫЕ ПЕРИОДЫ ВРЕМЕНИ

В каталоге ISC-GEM, в каталоге Центральной Азии, как и в каталоге Казахстана можно увидеть целый набор энергетических и магнитудных характеристик землетрясений, для определения которых используются различные шкалы. Чаще всего на разных этапах определялись значения для следующих различных типов магнитуд – M_L , mB , mb , $MPVA$, MLH , MLV , M_s , M_w и энергетического класса K . Для землетрясений доинструментального периода имелись также магнитуды, полученные расчетным путем из анализа макросейсмических данных, которые определяются по картам изосейст [3]. Эти макросейсмические магнитуды были откалиброваны по значениям магнитуды по поверхностным волнам. Такое большое количество вариантов магнитуд связано с использованием различных шкал, типов волн, аппаратурными особенностями мировых и региональных сетей, использованием той или иной стандартной калибровочной кривой.

M_L – локальная магнитуда, введенная Рихтером [1]. Определяется по короткопериодным приборам на основе измерения амплитуд смещений объемных волн. В практике Казахстана практически не используется, но широко используется в других национальных и мировых центрах данных.

mB – объемная магнитуда по Р-волне, зарегистрированной широкополосными приборами [1]. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью калибровочной кривой для расстояний более 20 градусов. В практике Казахстана использовалась редко, ее значения имеются в бюллетенях ГС РАН и мировых центров.

mb – объемная магнитуда, определяемая по Р-волне, зарегистрированной короткопериодными приборами. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью калибровочной кривой Вейта-Клауссона [4] для всего диапазона рас-

стояний. Используется в практике работ Центра данных ИГИ НЯЦ РК и других центров.

MPVA – региональная магнитуда по объемным волнам, определяемая по *P*-волне, зарегистрированной короткопериодными приборами. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью региональной калибровочной кривой для Северного Тянь-Шаня [5] для расстояний до 1000 км. Используется в практике работ СОМЭ МОН РК и Центра данных ИГИ.

MLH и *MLV* – магнитуда по поверхностным волнам, определяемая по амплитудам и периодам в максимальной фазе поверхностных волн (фаза Эйри), зарегистрированных широкополосными приборами. Различие между ними состоит только в том, на какой компоненте записи производятся измерения: по модулю полного горизонтального вектора и периоду (*MLH*) или по амплитуде и периоду на вертикальной компоненте (*MLV*) [6]. Используются в практике работ СОМЭ и Центра данных ИГИ для эпицентральных расстояний $2^\circ < \Delta < 160^\circ$ и глубины источника $h < 50$ км.

Ms – магнитуда по поверхностным волнам, определяемая по амплитудам и периодам поверхностных волн для эпицентральных расстояний $2^\circ < \Delta < 160^\circ$ и глубины источника $h < 50$ -км по формуле:

$$Ms = \log(A/T)_{max} + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (1)$$

Mw – моментная магнитуда, рассчитываемая через значения сейсмического момента. Введена в 1977 г. Т. Ханксом и Х. Канамори [7]. Сейчас определяется в Международных центрах, данных практически для всех землетрясений с магнитудой $M > 4,5$.

K – энергетический класс, введенный Т.Г. Раутиан в 1964 г. [2], связан с высвобожденной сейсмической энергией формулой

$$K = \lg E \text{ (Дж)}. \quad (2)$$

Энергетический класс определяется по сумме амплитуд объемных *P*- и *S*-волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой. Определяется практически для всех региональных событий в СОМЭ и Центре данных ИГИ.

ВЫБОР И РАСЧЕТ ОДНОРОДНОЙ МАГНИТУДЫ ДЛЯ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАЗАХСТАНА

Итак, необходимо было решить два вопроса: 1) какой тип магнитуд следует выбрать в качестве опорного, чтобы его значения были рассчитаны для всех абсолютно событий каталога, т.е. для получения каталога однородного по магнитуде, 2) как получить эти значения? Для решения этих вопросов проведен анализ литературных данных по соотношениям различных типов магнитуд в мире. В работе [7] представлен следующий график (рисунок 1).

Как видно, магнитуды, определяемые на основе измерения амплитуд сейсмических волн, имеют свойство насыщения при высоких значениях магни-

туд, т.е. при самых сильных землетрясениях они не отражают их истинную величину. Только магнитуда *Mw* не испытывает насыщения. Эта магнитуда в отличие от других типов связана с сейсмическим моментом, который имеет четкий физический смысл. Сейчас все больше наблюдается тенденция описания землетрясений именно с помощью магнитуды *Mw*. Отметим, что на большом диапазоне магнитуд (практически до магнитуды 8) к магнитуде *Mw* близка магнитуда по поверхностным волнам *Ms*, которая в свою очередь близка по значениям с магнитудами *MLH* и *MLV*. Поэтому с разных точек зрения резонно было выбрать в качестве однородной характеристики магнитуду *Mw*. Но, соблюдая преемственность в работах по сейсмическому режиму и опасности, где многие характеристики так или иначе связаны и вычислялись по магнитуде *MLH*, решено вычислить для всех событий и магнитуду *MLH*.

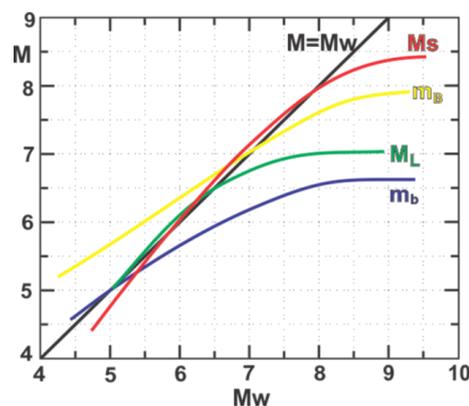
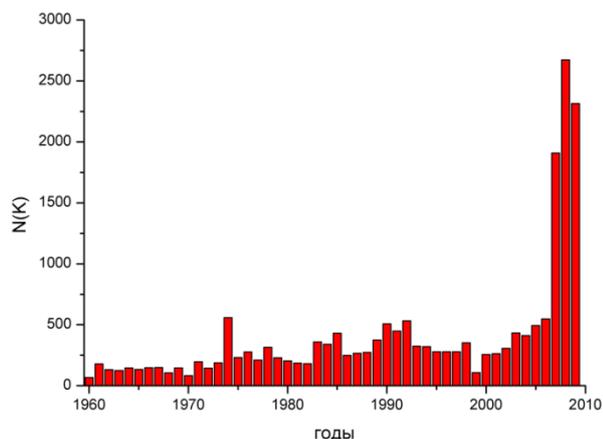


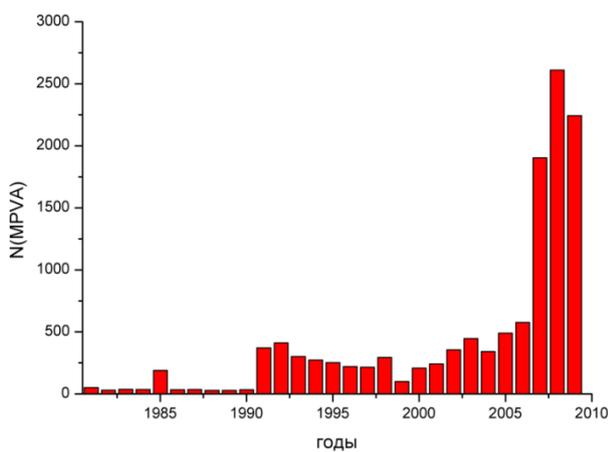
Рисунок 1. Соотношение различных типов магнитуд в диапазоне от 4 до 10

Для ответа на второй вопрос – как получить магнитуду *Mw* для всех событий – был проведен детальный анализ имеющихся в каталоге Казахстана и прилегающих территорий значений магнитуд. Для каждого события каталога имеется хотя бы одно значение магнитуды или класса, большая часть значений магнитуд получена по инструментальным данным. Для первой части каталога до 1990 года можно увидеть, что имелись значения расчетной магнитуды *Mr* (*Y-K*), она взята из специализированного каталога [8], представленного нам из ИФЗ РАН, который являлся основой при создании карт сейсмического районирования территории России и Северной Евразии [9]. Магнитуда *Mr* – это полученная расчетным путем магнитуда, скоррелированная с *MLH* из других магнитуд с помощью корреляционных соотношений. Она рассчитывалась для тех событий, у которых *MLH* отсутствовала. Имеющиеся инструментально определенные значения *MLH* оставлены и перешли в *M* (*Y-K*). На рисунке 2 показаны гистограммы по годам и количеству событий, у которых имеется значение той или иной рассматриваемой магнитуды или энергетического класса. Как видно из рисунка 2а, большинст-

во событий имеют значения энергетического класса K (после 1960 г.) и $MPVA$ (после 1980 г.). Из магнитудных характеристик самой представительной является магнитуда $MPVA$ (рисунок 2б). Безусловно, количество значений магнитуд или классов связано с общим количеством событий. Но не для всех событий в данный год на всей территории Центральной Азии имелся тот или иной параметр.



а



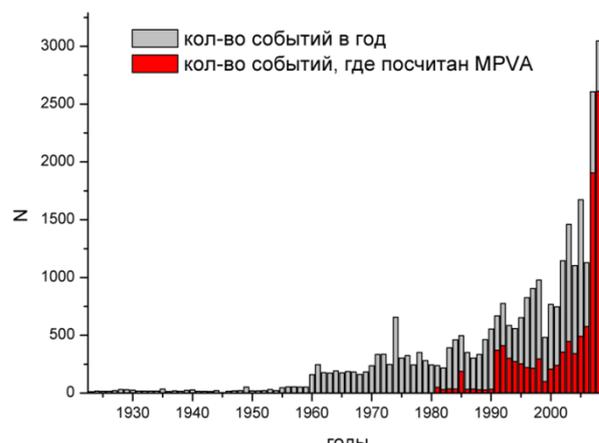
б

Рисунок 2. Гистограммы распределения энергетических характеристик по годам: а – для K , б – для $MPVA$

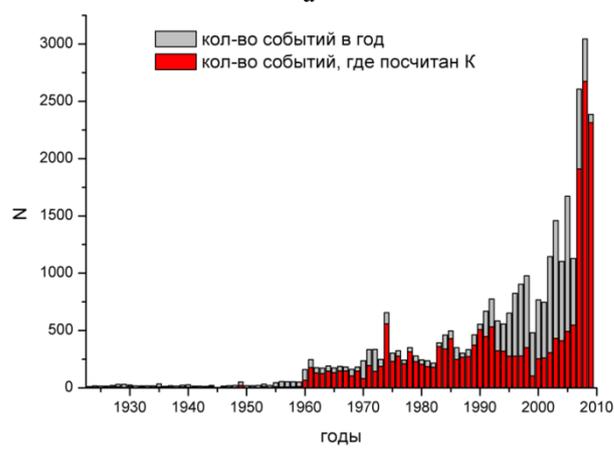
На рисунке 3 показаны гистограммы количества событий в каталоге по годам и количество событий, у которых имеется значение энергетического класса K (рисунок 3а) и магнитуды $MPVA$ (рисунок 3б). Не во всех национальных центрах обработки определялись одинаковые параметры, в ряде случаев события или их магнитуды были взяты из мировых каталогов.

При составлении унифицированного каталога данные по магнитудам брались из разных мировых каталогов, таких как ISC (International Seismological Centre), Гарвардский каталог [10], NEIC (National Earthquake Information Centre в США) и MOS (Опытно-методической экспедиции ИФЗ РАН в Обнинске) [11], каталог GFZ [12] и другие. Каждый из

мировых каталогов дает определения магнитуд по объемным и поверхностным волнам, т.е. mb или mB , MLH или M_s , а также значения моментной магнитуды M_w . Определяемая в отечественной практике магнитуда по поверхностным волнам на горизонтальной составляющей MLH – третья по количеству значений в нашем каталоге, важно, что ей соответствует магнитуда M_s .



а



б

Рисунок 3. Гистограммы распределения по годам общего количества событий в каталоге и количества наиболее представительных энергетических характеристик: а – для K , б – для $MPVA$

В результате анализа имеющихся в каталоге измеренных на основе инструментальных данных характеристик, была выбрана схема перехода к однородной магнитуде, соответствующей M_w , для всего каталога:

1. Значения M_w из каталога ISC-GEM для всех наиболее сильных землетрясений Центральной Азии были перенесены в каталог Центральной Азии в качестве однородной магнитуды.

2. Значения M_w для других событий Центральной Азии, которых не было в каталоге ISC-GEM, но вошедших в Гарвардский каталог, либо имеющихся в каталоге ISC или GFZ, были внесены в каталог

Центральной Азии в качестве однородной магнитуды.

3. Имеющиеся инструментальные определения магнитуды по поверхностным волнам M_s , MLH , MLV для тех землетрясений, у которых нет M_w , были пересчитаны в M_w по зависимостям, полученным в Международном центре данных.

4. Для оставшейся части землетрясений, у которых не было определений M_w , M_s , MLH , MLV , необходимо было получить надежные соотношения для расчета однородной магнитуды из значений по объемным волнам K и $MPVA$ или mb .

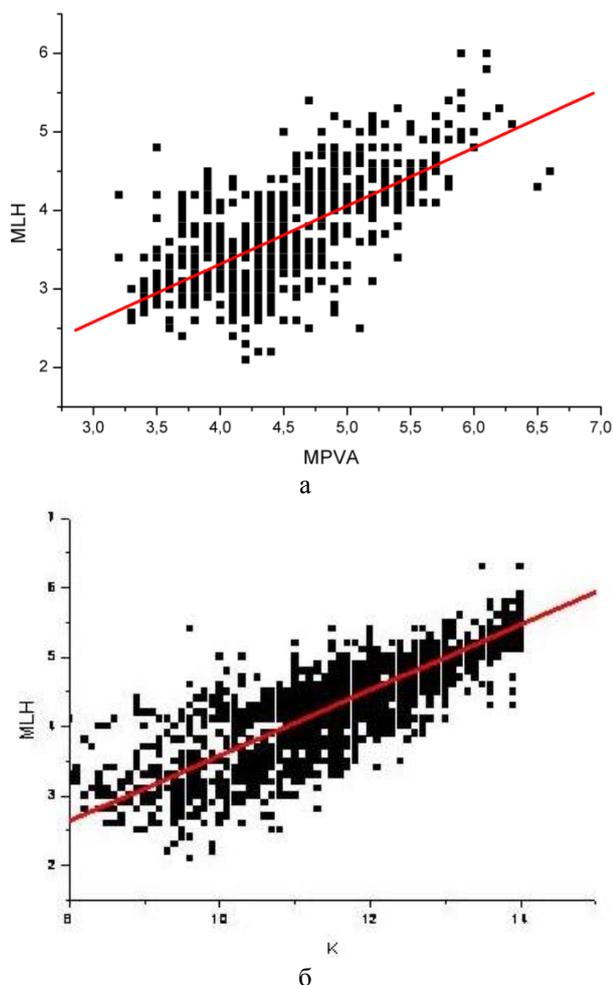


Рисунок 4. Графики зависимостей между магнитудой MLH и $MPVA$ и MLH и K , полученные методом линейной регрессии

Для решения поставленной задачи были рассчитаны уравнения линейной и ортогональной регрессии между значениями магнитуды MLH и другими магнитудами и энергетическим классом. В процессе оценки магнитуды при помощи различных шкал неизбежно возникают ошибки измерений. Использование стандартной линейной регрессии (ЛР) предполагает, что независимая переменная определяется без-

ошибочно, либо имеет совсем незначительную погрешность по сравнению с ошибками измерения зависимой переменной. Использование ЛР не должно полностью удовлетворять преобразованию магнитуд, так как обе оценки магнитуд, между которыми рассчитывается уравнение регрессии, содержат ошибки. При применении общей ортогональной регрессии (ОР) принимаются во внимание ошибки по обоим типам магнитуд [13]. ОР получается при помощи минимизации квадратов ортогональных расстояний к линии максимального линейного соответствия, в то время как ЛР выводится путем минимизации квадратов вертикальных смещений. На рисунке 4 представлены результаты расчетов линейной регрессии между MLH – $MPVA$, MLH – K .

Кроме того, исследованы соотношения между различными определениями поверхностных магнитуд. В таблице 1 приведены уравнения линейной регрессии, рассчитанные коэффициенты корреляции и среднеквадратичные отклонения.

Таблица 1. Уравнения линейной регрессии, коэффициенты корреляции и среднеквадратичные отклонения

Зависимость	R	SD
$MLH = 0,36 + 0,74 \cdot MPVA$	0,68	0,51
$MLH = 0,34 + 0,79 \cdot mb$	0,68	0,45
$MLH = -0,82 + 0,45 \cdot K$	0,86	0,36
$MLH = -1,99 + 1,31 \cdot Mw$	0,95	0,27
$MLH = 0,83 + 0,84 \cdot Ms$	0,75	0,24

Как видно из таблицы 1, коэффициенты корреляции для всех вариантов расчетов достаточно высокие. Затем были рассчитаны уравнения ортогональной регрессии. Графики ортогональной регрессии приведены на рисунке 5. В таблице 2 представлены уравнения ортогональной регрессии.

Таблица 2. Уравнения ортогональной регрессии между MLH и другими типами магнитуд и энергетическим классом

Зависимость
$MLH = 0,47 K - 1,15$
$MLH = 1,34 \cdot mb - 1,89$
$MLH = 1,14 \cdot MPVA - 1,45$
$MLH = 0,9972 \cdot Ms - 0,0057$
$MLH = 1,37 \cdot Mw - 2,28$

Для магнитуды MLH и M_s мы получили уравнение ортогональной регрессии $MLH = 0,997 \cdot M_s - 0,005$, из которого видно, что достаточно обоснованно можно считать $MLH \approx M_s$.

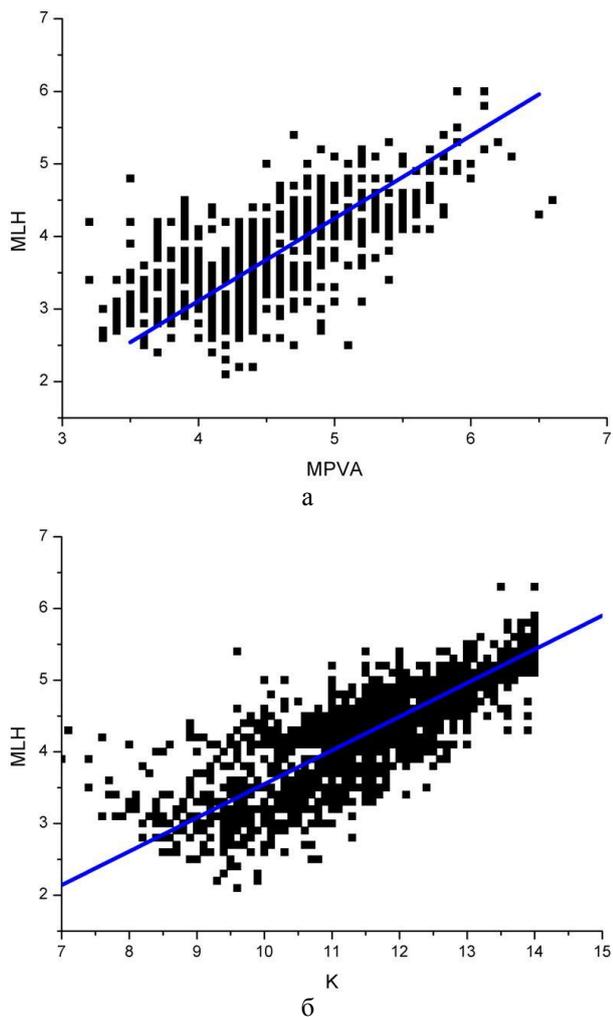


Рисунок 5. Графики зависимостей между магнитудой MLH и $MPVA$ и энергетическим классом, полученные методом ортогональной регрессии

На рисунке 6 приведены примеры сравнения корреляционных зависимостей $MPVA$, K и MLH , полученных разными способами.

Для того, чтобы выяснить, какая из полученных формул более оптимальна и должна быть приоритетной для пересчета магнитуд, были выбраны такие события из каталога, у которых имеются инструментально определенные для каждого события значения MLH и K , и MLH и $MPVA$, т.к. эти выборки наиболее представительные. Для всех событий, где есть MLH и K , из значений K рассчитывалась магнитуда MLH_{11} – по формуле линейной регрессии и MLH_{12} – по формуле ортогональной регрессии. Для всех выбранных событий, где есть MLH и $MPVA$, из значений $MPVA$ рассчитывались MLH_{21} – по формуле линейной регрессии и MLH_{22} – по формуле ортогональной регрессии. Затем анализировались значения невязок δM , которые были получены путем вычитания из полученных значений MLH_{11} , MLH_{12} , MLH_{21} , MLH_{22} истинного значения MLH для данного события. На рисунке 7а показано кумулятивное распре-

деление этих невязок. Аналогичные процедуры проделаны с невязками магнитуд, рассчитанных через энергетический класс. На рисунке 7б показано кумулятивное распределение этих невязок. Из рисунков 7а и 7б видно, что разброс значений для невязок δM_{12} , а также δM_{22} , рассчитанных по формуле ортогональной регрессии, хоть и незначительно, но меньше, чем у рассчитанных по линейной регрессии значений δM_{11} и δM_{21} . Далее расчет однородной магнитуды производился по формулам ортогональной регрессии.

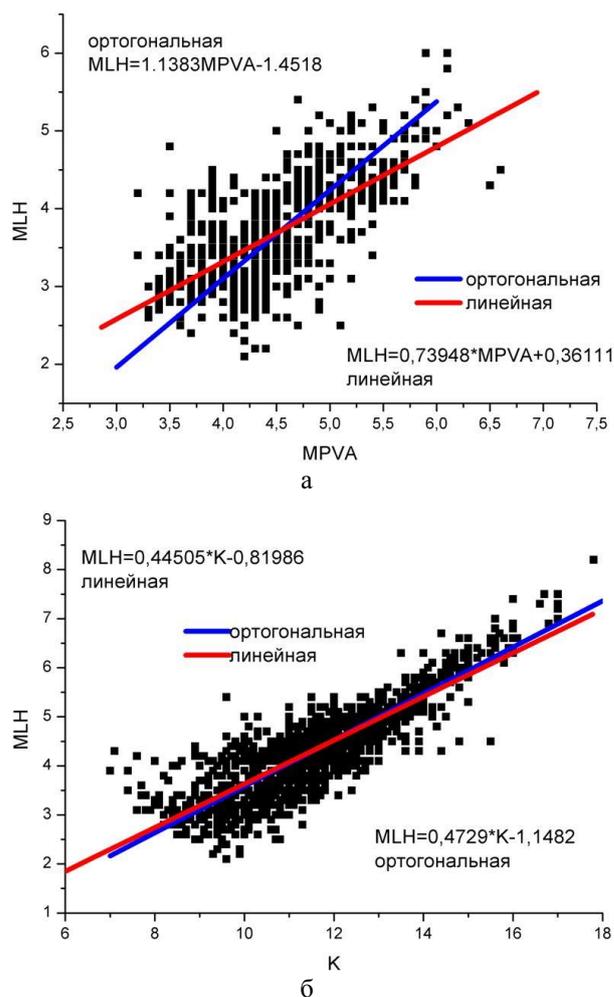


Рисунок 6. Корреляционная зависимость между MLH и $MPVA$ – а, MLH и K – б

Необходимо было решить вопрос, каким путем идти к MLH , если имеются для данного события и значение $MPVA$, и K ? Была создана выборка таких событий и оценены параметры распределения отклонений δM_{12} и δM_{22} , рассчитанных способом ортогональной регрессии (рисунок 8). Из рисунка 8 видно, что распределение, полученное по энергетическим классам, характеризуется меньшим разбросом, чем рассчитанное по объемным магнитудам. Был сделан вывод, что при наличии нескольких характеристик – магнитуд по объемным волнам и K – расчет следует проводить от K .

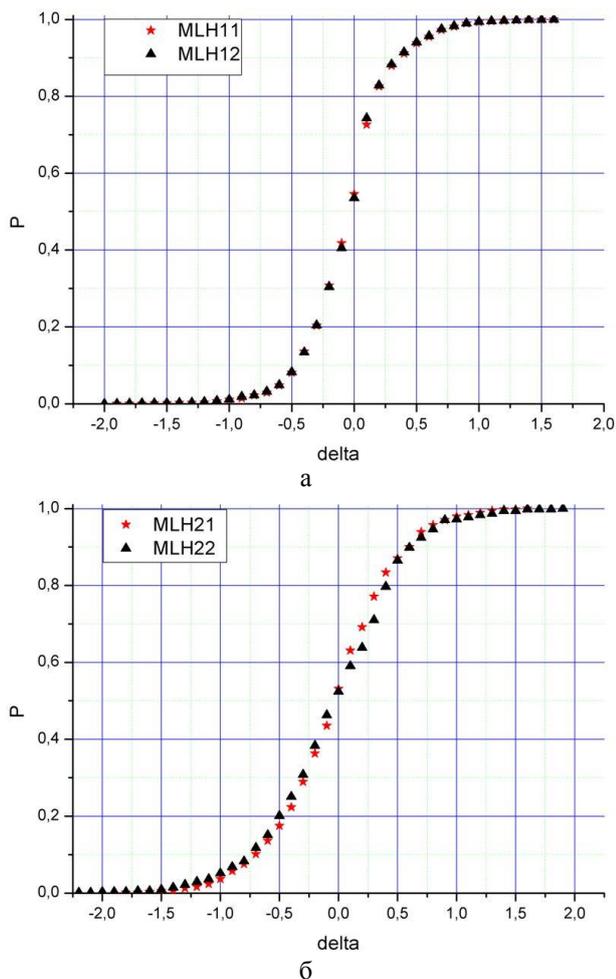


Рисунок 7. Кумулятивные распределения значений
а) δM_{11} и δM_{12} , б) δM_{21} и δM_{22}

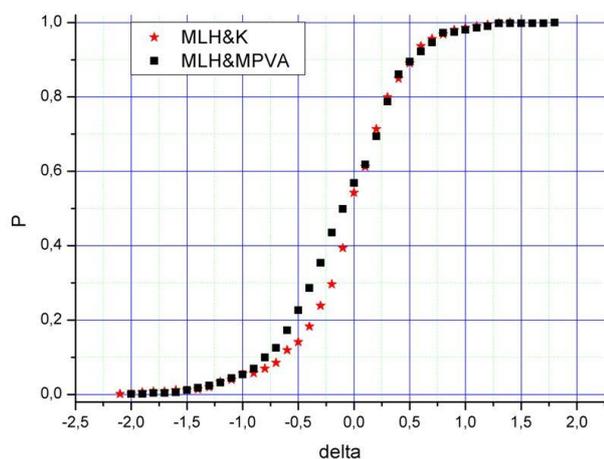


Рисунок 8. Кумулятивные распределения значений
 δMLH_{12} и δMLH_{22}

Для перехода от MLH и M_s к величине M_w было решено использовать соотношение, полученное на представительном материале в Международном центре данных при составлении каталога ISC-GEM. Это соотношение показано на рисунке 9.

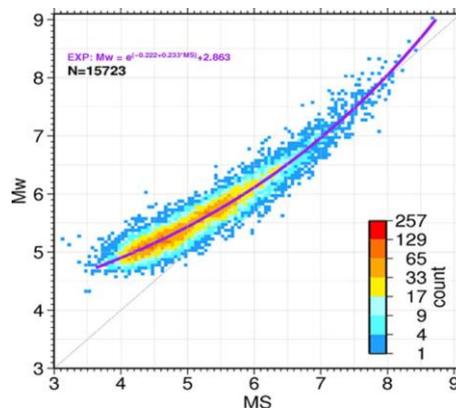


Рисунок 9. Соотношение значений магнитуды по поверхностным волнам M_s с моментной магнитудой M_w [14]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований для всех событий каталога территории Казахстана и прилегающих регионов рассчитана магнитуда $M_{w_{new}}$ (таблица 3), которая стандартна для всего периода времени и скоррелирована с M_w , а также MLH_{new} , что позволяет анализировать совместно все данные каталога и проводить различные научные исследования при построении карты сейсмического зонирования территории Казахстана и прилегающих территорий, а также при изучении и картировании сейсмической опасности.

Таблица 3. Формулы для расчета однородной магнитуды

$MLH = 0,47 \cdot K - 1,15 \quad (K < 14)$
$MLH = 1,34 \cdot mb - 1,89$
$MLH = 1,14 \cdot MPVA - 1,45$
$MLH = Mp \cdot (U - K)$
$MLH = M_s$
$M_w = e^{(-0,222+0,223 \cdot M_s)} + 2,863$

ЛИТЕРАТУРА

1. Bormann, Ed. P. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). / Ed. P. Bormann // 2002. Vol.1. P.16-57: GeoForschungsZentrum, Potsdam.
2. Раутиан, Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км. / Т.Г. Раутиан // Труды ИФЗ АН СССР, 1964 – №32 (199). – С. 72-98.
3. Уразаев, Б.М. Сейсмическое районирование Казахстана / Б.М. Уразаев {и др} // Алма-Ата: Наука, 1979 – 119 с.
4. Veith, K.F. Magnitude from short-period P-wavedata / K.F. Veith, G.E. Clawson // Bull. Seism. Soc. Am., 1972. – Vol 62. – P. 435 – 452.
5. Михайлова, Н.Н. Калибровочная функция $s(d)$ для определения MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, Н.П. Неверова // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Наука, 1986. – С. 41 – 47.
6. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР / Отв. сост.: Н.В. Кондорская, З.И. Аранович и др. М.: Наука, 1981. – С. 110-159.
7. Kanamori, H. Magnitude scale and quantification of earthquakes. In: S.J. Duda and K. Aki (Editors), Quantification of Earthquakes. // Tectonophysics, 1993. – С. 185-199.
8. Кондорская Н.В. Специализированный каталог землетрясений для сейсмического районирования Северной Евразии / Н.В. Кондорская, В.И. Уломов // Основные достижения Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта за 1992-1996 гг. Т. 1. – М.ОИФЗ. – 1996. – С. 108-109.
9. Уломов, В.И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина // Карта на 4-х листах. М.: ОИФЗ, 1999-2000. 57 с. М.: ОИФЗ-РОСКАРТОГРАФИЯ, 2000.
10. Бюллетень Международного сейсмологического центра (ISC) [Электронный ресурс] <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>
11. Бюллетень опытно-методической экспедиции ИФЗ РАН в Обнинске [Электронный ресурс] <http://www.ceme.gsras.ru/about.htm>
12. Каталог GFZ [Электронный ресурс] <http://geofon.gfz-potsdam.de/>
13. Overview of the ISC-GEM Catalogue [Электронный ресурс] <http://www.isc.ac.uk/iscgem/overview.php>
14. Ranjit, D. General Orthogonal Regression Relations between Body Wave and Moment Magnitudes / D. Ranjit, H.R. Wason, M.L. Sharma // Seismological Research Letters, 2013. – Vol.84 (2). – P. 219–224.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ АУМАҒЫН СЕЙСМИКАЛЫҚ ЗОНАЛАУ БОЙЫНША ЖҰМЫСТАРДА МАГНИТУДАЛАРДЫҢ БІРТЕКТІ ЕМЕСТІГІ ПРОБЛЕМАЛАРЫН ШЕШУ

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты

Сейсмикалық оқиғалардың магнитудалары мен энергетикалық класстарының әр түрлерінен M_w мезетті магнитудалармен корреляцияланған бірыңғай магнитудаға ауысудың әзірленген әдістемесін сипаттауы келтіріледі. Осы негізінде Қазақстан аумағы мен жанасқан аймақтарындағы ежелгі заманнан 2009 ж. дейінгі жерсілкінулердің каталогына енгізілген барлық сейсмикалық оқиғалардың M_{wnew} магнитудасы, сондай-ақ MLH_{new} есептелген. Бұл Қазақстан аумағының сейсмикалығын және сейсмикалық қауіптілігін зерделеуде уақыттың әр кезеңдері үшін каталогтардың деректерін бірлестіріп талдауына мүмкіншілік береді.

SOLUTION TO A PROBLEM OF HETEROGENEITY OF MAGNITUDES IN THE WORKS ON SEISMIC ZONING ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

A.S. Mukambayev, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The paper describes a developed methodology of transfer from various types of magnitude and energy class of seismic events to a single magnitude that is correlated with a M_w moment magnitude. On this basis the M_{wnew} as well as MLH_{new} magnitudes were calculated for all seismic events included into the catalog of earthquakes on the territory of the Republic of Kazakhstan and its adjacent regions from ancient times until 2009. This allows to jointly analyze the catalog data for various periods of time when studying the seismicity and seismic hazard on the territory of Kazakhstan.