

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ
МАГНИТУД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АЗЕРБАЙДЖАНА**

Г.Д. Етирмишли, Р.Р. Абдуллаева, З.Г. Аллахвердиева, Т.Б. Асадов

*Республиканский центр сейсмологической службы Национальной
академии наук Азербайджана, science@azeurotel.com*

В настоящее время имеется большое разнообразие магнитуд, которые используются при обработке землетрясений. Существование различных магнитудных шкал связано с использованием разных типов волн и приборов, влияющих на оценку величины землетрясения. Со временем вопрос о единой классификации слабых и сильных землетрясений будет решен путем перехода к массовым определениям сейсмических моментов на спектральной основе. Однако необходимость использования сейсмологического материала за длительный период инструментальных наблюдений будет по-прежнему требовать использования магнитудных шкал.

Самой распространенной оценкой величины землетрясений на территории бывшего СССР является шкала Т.Г. Раутиан [1] для определения энергетического класса K_p . Она реализует корректное определение величины землетрясений в диапазоне $K_p=3-14$. Для классификации более сильных землетрясений используются магнитудные шкалы, среди которых самой распространенной в СССР считалась магнитуда MLH , определяемая по горизонтальным составляющим поверхностных волн на записях длиннопериодными приборами. Соотношение между магнитудами по объемным и поверхностным волнам было получено Гуттенбергом в [2] в виде линейной зависимости:

$$m_b = 2.52 + 0.63 M_s. \quad (1)$$

В сейсмологической практике в СССР, а после его распада в странах СНГ, для многочисленных слабых землетрясений, для которых отсутствовало прямое определение M , она рассчитывалась по единому соотношению из [3]:

$$K_p = 4 + 1.8 M. \quad (2)$$

С 1981 г. для определения магнитуды по близким ($\Delta < 300$ км) землетрясениям региона Кавказ (Cau), и территории Азербайджана в частности, была введена магнитуда $MPVA_{Cau}$ [4], определяемая по вертикальной составляющей объемных прямых P -волн на записях короткопериодными приборами СКМ-3, СМ-3 и др. Однако для статистических исследований и сейсмического районирования предпочтение отдавалось магнитудам MLH по поверхностным волнам.

С начала 90-х гг. в сейсмологических бюллетенях ГС РАН [5] и в сборниках «Землетрясения Северной Евразии» [6] вместо магнитуд по горизонтальным составляющим поверхностных волн MLH_{MOS} начали публиковаться магнитуды MS_{MOS} по вертикальной составляющей волн Релея. В каталогах землетрясений Азербайджана [7], публикуемых в сборниках «Землетрясения Северной Евразии» с 1992 г., приводятся магнитуды $MPSP_{MOS}$ из сейсмологических бюллетеней геофизической службы РАН [5], определяемые по волне PV на записях короткопериодной аппаратурой в дальней ($\Delta > 2000$ км) зоне, и магнитуды MS_{MOS} по волне Релея на записях средне- и длиннопериодной аппаратурой СК, СКД. С 1996 г. в этих сборниках приводятся также магнитуды m_b_{ISC} и MS_{ISC} по вертикальным компонентам объемных и поверхностных волн соответственно, взятые из бюллетеней [8] Международного сейсмологического центра.

В Азербайджане оценками величины землетрясений до 2003 г. являлись энергетический класс K_p и региональная магнитуда $MPVA_{Cau}$ [4], определяемая по вертикальной составляющей колебаний в P -волне на записях короткопериодными приборами в ближней ($\Delta \leq 300$ км) зоне.

В 2003 г. в сети наблюдений Азербайджана произошло примечательное событие: в дополнение к аналоговым сейсмическим станциям введена в действие телеметрическая сейсмическая сеть, состоящая из 14 станций с центром сбора информации в г. Баку [9], оснащенных однотипной американской аппаратурой типа Quanterra Q330 с широкополосными сейсмометрами STS-2 и акселерометрами EpiSensor ES-T. При этом координаты одноименных 14 аналоговых и 14 телеметрических станций отличаются на $0.01\text{--}0.11^\circ$. Подключение всех 14 станций было одновременным – 15.02.2003 г. Чувствительность цифровой аппаратуры одинакова для всех станций и равна по скорости $6.3 \cdot 10^9$ отсчет/с, по ускорению – $4.3 \cdot 10^{11}$ отсчет/с² [9].

В связи с переходом на цифровые способы регистрации землетрясений в Азербайджане наряду с K_p и $MPVA$ в рутинной обработке появился новый тип магнитуды – локальная магнитуда $M_{L\text{Azp}}$ [10], эквивалентная магнитуде M_L Рихтера [11]. Напомним (*ред.*) определение Ч.Ф. Рихтера для этой магнитуды: «магнитуда толчка M_L равна логарифму максимальной вычисленной амплитуды записи, выраженной в $\mu\text{к}$, которую стандартный короткопериодный крутильный сейсмограф Вуда–Андерсона ($T_0=0.8$ с, $V=2800$, $\sigma=0.8$) зарегистрировал на расстоянии 100 км от эпицентра» [11, с. 43]. Следовательно, для определения магнитуды Рихтера записи сейсмометра STS-2 по необходимости программно симулируются к частотной характеристике крутильного сейсмографа Вуда–Андерсона в записи по этому сейсмографу.

Заметим (*ред.*), однако, что в присланных в редакцию каталогах землетрясений Азербайджана [7] за 2003 и 2004 гг. магнитуда $M_{L\text{Azp}}$ отсутствует вовсе (есть только классы K_p и магнитуды $MPVA$), а в каталогах за 2005–2008 гг. она есть, но не для всех землетрясений. Так, в каталоге за 2005 г. общее число землетрясений равно $N_\Sigma=848$ и, соответственно, 848 значений класса K_p , но всего 227 значений $M_{L\text{Azp}}$; аналогично в 2006 г. – 539/209, в 2007 г. – 614/276 и в 2008 г. – 535/205.

При многих геофизических исследованиях необходимо знать среднестатистические соотношения между магнитудами, определяемыми по различным типам волн, а также между магнитудами, определенными по данным аппаратуры аналогового типа и телеметрических цифровых станций. В связи с этим возникла необходимость поиска корреляционных связей между различными оценками величины землетрясений. Параллельная работа аналоговых и цифровых станций в 2004–2012 гг. позволила вывести соотношения между различными магнитудами. Соотношения искались в виде линейных зависимостей, коэффициенты которых определялись методом ортогональной регрессии:

$$Y = K_0 + K_1 X, \text{ где } K_0, K_1 \text{ – коэффициенты,}$$

$$K_0 = \bar{Y} - K_1 \bar{X},$$

$$K_1 = \frac{1}{2\rho_{xy}} \left\{ \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sigma_x \sigma_y} \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sigma_x \sigma_y} \right)^2 + 4\rho_{xy}^2} \right\},$$

σ_x – среднеквадратичное отклонение величин X ;

σ_y – среднеквадратичное отклонение величин Y ;

ρ_{xy} – коэффициент корреляции между X и Y .

Для установления переходных соотношений были использованы следующие магнитуды:

- локальная магнитуда $M_{L\text{Azp}}$ из каталогов землетрясений республики [10] за 2004–2012 гг.;
- магнитуда MLH_{Azp} по поверхностным волнам по данным обработки сейсмограмм и станционных бюллетеней Азербайджана за 2004–2012 гг.;
- региональная магнитуда $MPVA_{\text{Cau}}$ из каталогов землетрясений республики [10] за 2004–2012 гг.;
- магнитуды $MPSP_{\text{MOS}}$ и MS_{MOS} из сборников «Землетрясения Северной Евразии» за 2004–2007 гг. [7] и Сейсмологического бюллетеня за 2004–2012 гг. [5];
- магнитуды m_b_{ISC} и M_{ISC} из бюллетеней ISC за 2004–2012 гг. [8].

Был составлен сводный каталог землетрясений Азербайджана и прилегающих территорий Дагестана, Грузии, Армении, Ирана, Турции за 2004–2012 гг. со всеми имеющимися значениями магнитуд. Всего таких землетрясений набралось 478, карта их эпицентров дана на рис. 1.

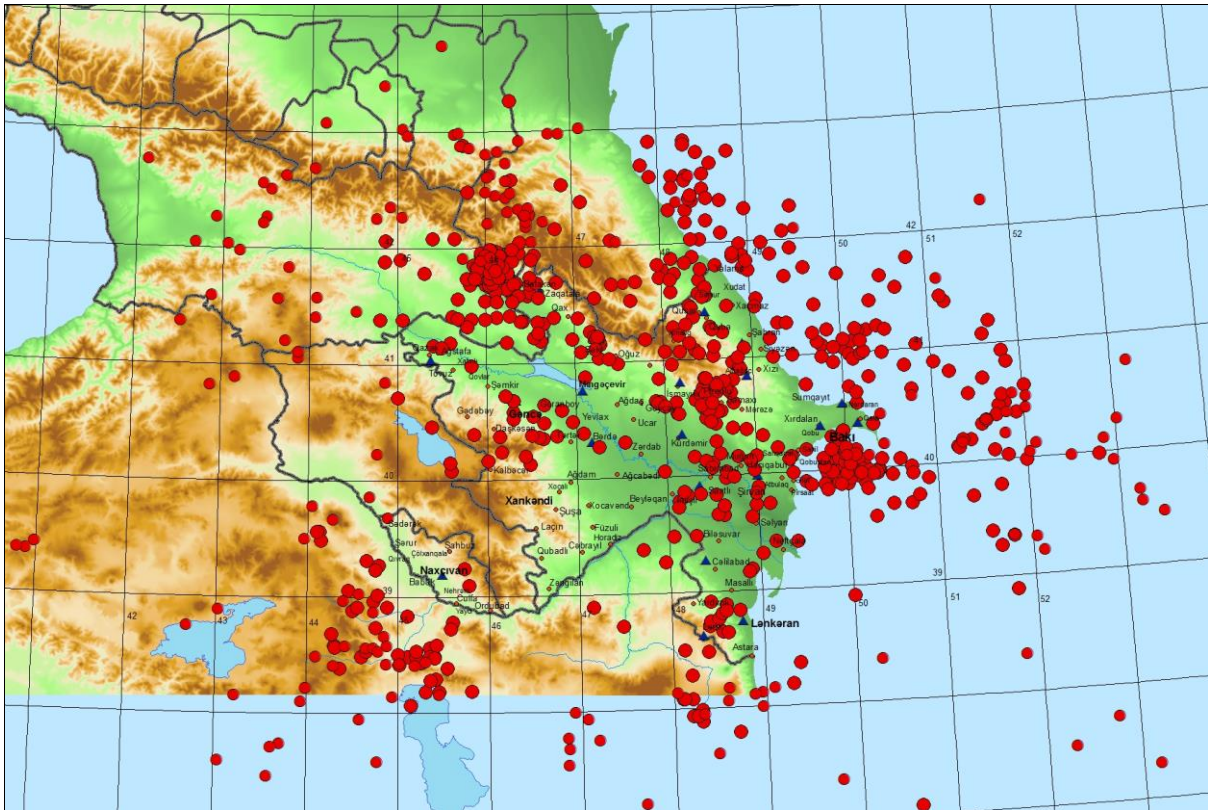


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Азербайджана и сопредельных территорий за 2004–2012 гг. с магнитудами $M_{L\text{Азр}} \geq 3.0$

Рассмотрим сначала магнитуды по объемным P -волнам: магнитуду $m_b\text{ISC}$ из бюллетеней ISC [8], магнитуду $MPSP_{\text{MOS}}$ из Сейсмологического бюллетеня [5] и региональную для Кавказа магнитуду $MPVA_{\text{Сав}}$ из каталогов Азербайджана.

1. Для исследования функции типа $M_{L\text{Азр}} = f(m_b\text{ISC})$ собрана 61 пара этих параметров. Корреляционное поле исходных данных и осредняющая прямая изображены на рис. 2.

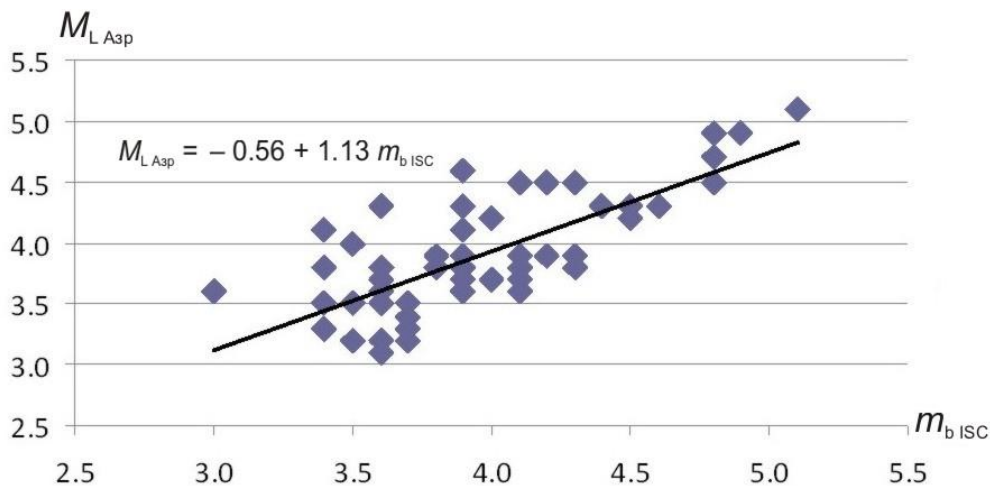


Рис. 2. Соотношение между магнитудами $M_{L\text{Азр}}$ и $m_b\text{ISC}$

Полученное соотношение имеет вид:

$$M_{L\text{Азр}} = -0.56 + 1.13 m_b\text{ISC} \text{ при } r=0.7452 \text{ и } n=61. \quad (3)$$

2. Для исследования функции типа $M_{L\text{Азр}} = f(MPSP_{\text{MOS}})$ собрано 295 пар этих параметров. График этой зависимости изображен на рис. 3.

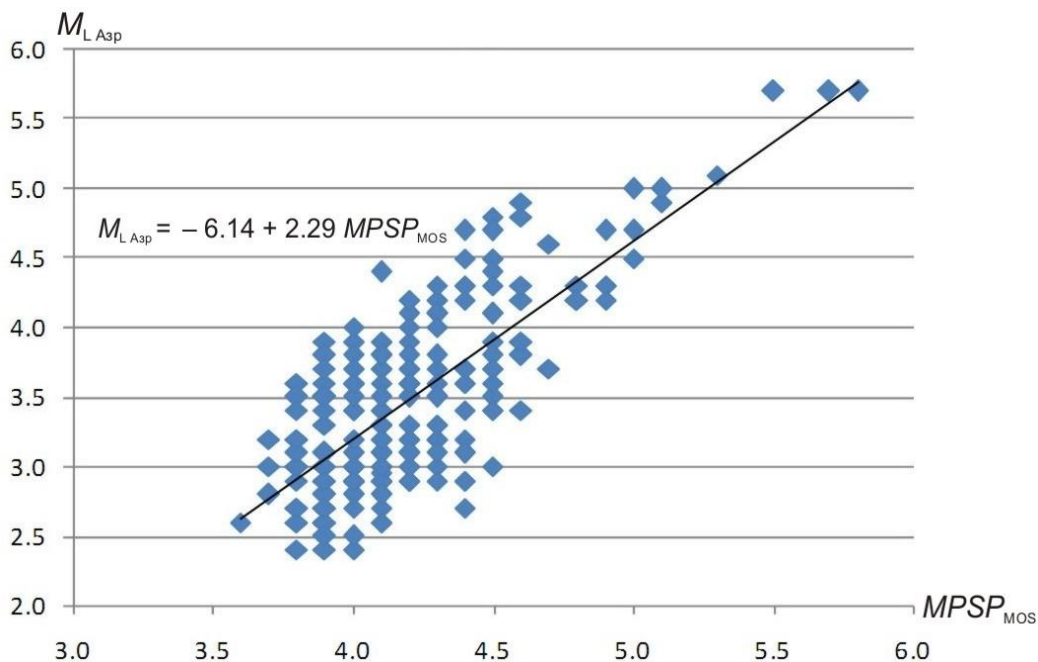


Рис. 3. Соотношение между магнитудами $M_{L\text{Azp}}$ и $MPSP_{\text{MOS}}$

Полученное соотношение имеет вид:

$$M_{L\text{Azp}} = -6.14 + 2.29 MPSP_{\text{MOS}}, r=0.7474, n=295. \quad (4)$$

Хотя объем исходных данных на рис. 3 значительно больше, чем на рис. 2, коэффициент корреляции почти не изменился, что объясняется большим разбросом точек поля на рис. 3.

3. Для исследования функции типа $M_{L\text{Azp}} = f(MPVA_{\text{Cau}})$ собрано 147 пар этих параметров. График этой зависимости изображен на рис. 4.

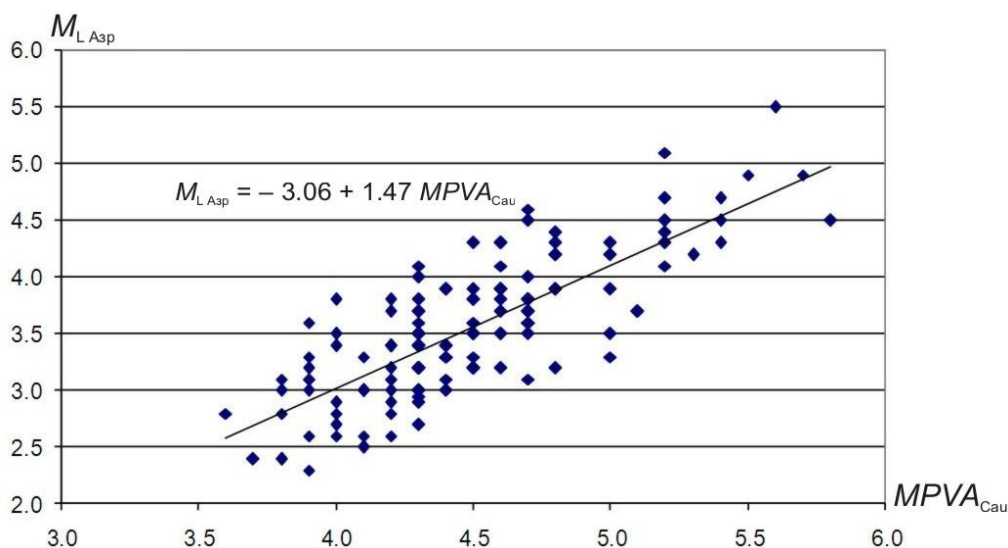


Рис. 4. Соотношение между магнитудами $M_{L\text{Azp}}$ и $MPVA_{\text{Cau}}$

Полученное соотношение имеет вид:

$$M_{L\text{Azp}} = -3.06 + 1.47 MPVA_{\text{Cau}}, r=0.7979, n=147. \quad (5)$$

Из всей массы землетрясений лишь немногие имеют значения магнитуд M , определенных по поверхностным волнам.

4. Для исследования функции типа $M_{L\text{Azp}} = f(M_{S\text{ISC}})$ собрано лишь 33 пары этих параметров. Корреляционное поле зависимости $M_{L\text{Azp}}$ и $M_{S\text{ISC}}$ из бюллетеней ISC приведено на рис. 5.

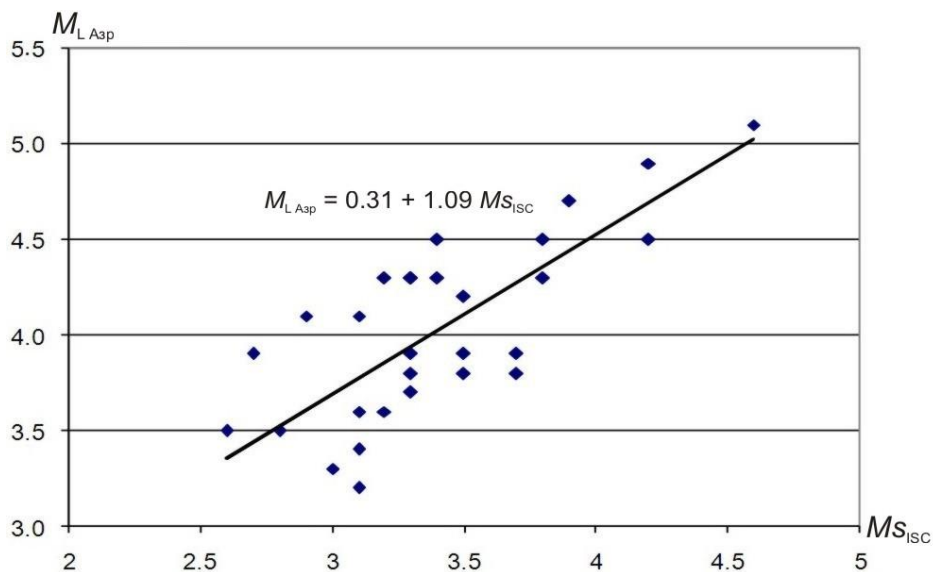


Рис. 5. Соотношение между магнитудами $M_{L\text{Azp}}$ и $M_{S\text{ISC}}$

Полученное соотношение имеет вид:

$$M_{L\text{Azp}} = 0.31 + 1.09 M_{S\text{ISC}}, r=0.7796, n=33. \quad (6)$$

Для поиска связей между локальной магнитудой $M_{L\text{Azp}}$, определенной по объемным поперечным волнам, с магнитудой MLH_{Azp} , определенной по горизонтальным компонентам поверхностных волн, были использованы 156 землетрясений из ближнего зарубежья (рис. 6), т.е. землетрясения Дагестана, Каспийского моря, Грузии, Армении, Ирана и Турции. Значения MLH_{Azp} были определены из сейсмограмм с записями этих событий на станциях Азербайджана, а также из сейсмологических бюллетеней аналоговых сейсмических станций Азербайджана.



Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений ближнего зарубежья за 2004–2012 гг.

5. Для исследования функции типа $M_{L\text{Azp}} = f(MLH_{\text{Azp}})$ было собрано 80 пар параллельных определений этих параметров, корреляционное поле которых показано на рис. 7.

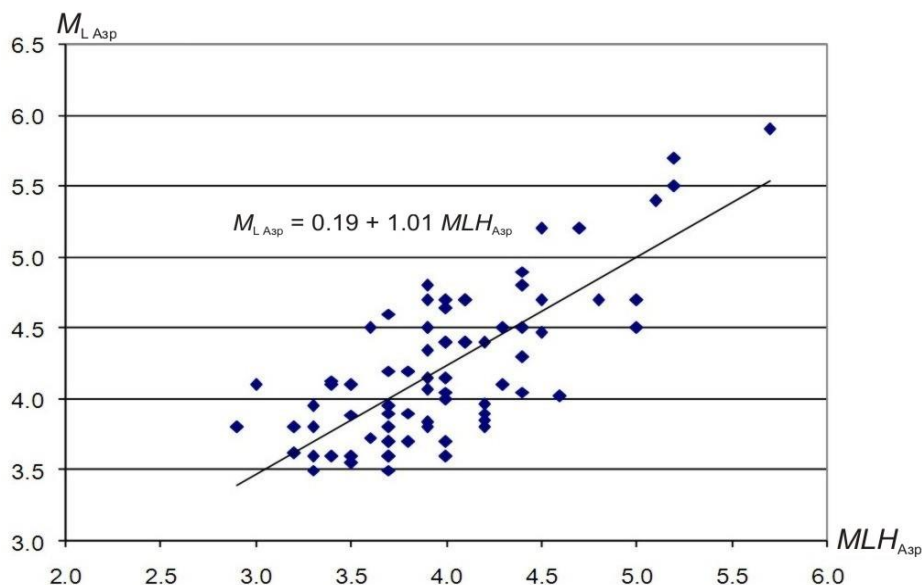


Рис. 7. Соотношение между магнитудой $M_{L\text{Azp}}$ и MLH_{Azp} для землетрясений ближнего зарубежья за 2004–2012 гг.

Полученное корреляционное соотношение имеет вид:

$$M_{L\text{Azp}} = 0.19 + 1.01 MLH_{\text{Azp}}, \quad r=0.7631, \quad n=80. \quad (7)$$

Сравнение полученной зависимости (7) с выведенной ранее зависимостью (6) показывает, что

$$0.31 + 1.09 M_{S_{\text{ISC}}} = 0.19 + 1.01 MLH_{\text{Azp}}, \quad \text{откуда} \quad M_{S_{\text{ISC}}} = 0.92 MLH_{\text{Azp}} - 0.11. \quad (8)$$

Следовательно, магнитуда $M_{S_{\text{ISC}}}$, определенная по вертикальной составляющей поверхностной волны, меньше магнитуды MLH_{Azp} , определенной по горизонтальным составляющим.

6. Для перехода от магнитуды MLH_{Azp} , по поверхностной волне определенной, к магнитуде $MPVA_{\text{Cau}}$, определенной по объемной P -волне, было получено следующее соотношение:

$$MPVA_{\text{Cau}} = 2.35 + 0.60 MLH_{\text{Azp}}, \quad r=0.6873, \quad n=43. \quad (9)$$

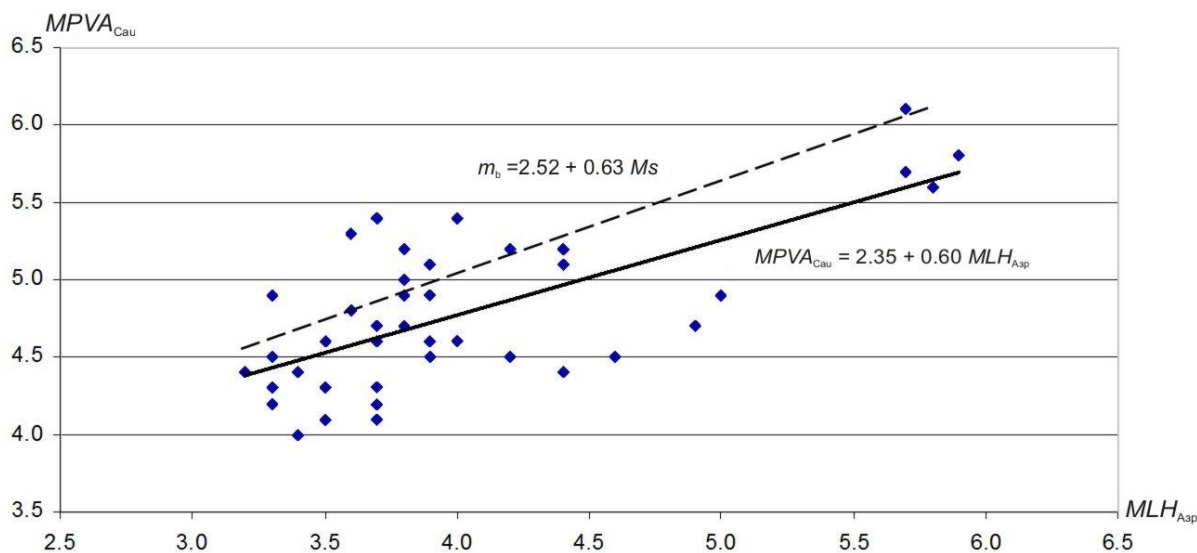


Рис. 8. Соотношение между магнитудой $MPVA_{\text{Cau}}$ и MLH_{Azp} для землетрясений ближнего зарубежья за 2004–2012 гг.

На рис. 8 пунктиром нанесена рекомендованная в [12] формула связи (1) Гуттенберга и Рихтера между магнитудами по объемным и поверхностным волнам из [2], приведенная в

начале статьи. Как видно из графика, магнитуды m_b в дальней (>2000 км) зоне (по Гуттенбергу) превышают региональные магнитуды $MPVA_{\text{Сauc}}$ в ближней (<300 км) зоне на 0.2–0.4 единицы магнитуды.

Больше всего (1149) параллельных пар имеется для энергетических классов K_p и локальной магнитуды $M_{L\text{Азр}}$ (рис. 9).

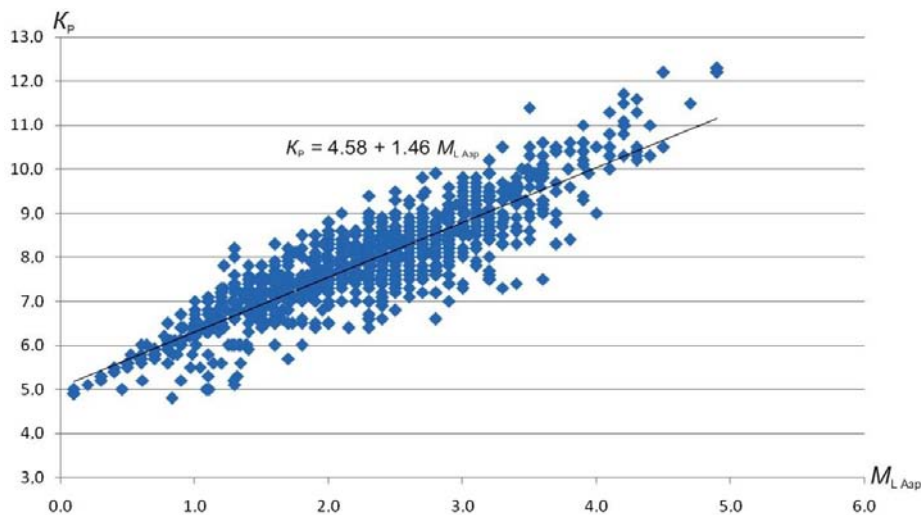


Рис. 9. Соотношение между энергетическим классом K_p и локальной магнитудой $M_{L\text{Азр}}$ для землетрясений Азербайджана за 2007–2009 гг.

Для них установлено соотношение с самым высоким ($r=0.8871$) коэффициентом корреляции, по сравнению с приведенными выше зависимостями, которое имеет вид:

$$K_p = 4.58 + 1.46 M_{L\text{Азр}}, \quad r=0.8871, \quad n=1149 \quad \text{при } M_{L\text{Азр}} = 0.2-5.0. \quad (10 \text{ а})$$

Для более сильных ($M_{L\text{Азр}} > 4.0$) землетрясений набралось совсем мало ($n=25$) пар. Для них было получено соотношение с очень низким коэффициентом корреляции $r=0.5872$, поэтому оно не заслуживает особого доверия. Вид уравнения следующий:

$$K_p = 2.91 + 1.82 M_{L\text{Азр}}, \quad \text{при } M_{L\text{Азр}} = 4.0-5.0. \quad (10 \text{ б})$$

Ранее в [9] для слабых ($M_{L\text{Азр}} = 0.2-4.0$) землетрясений методом наименьших квадратов было установлено соотношение лишь за два года наблюдений – 2003 и 2004 гг. Его параметры имеют вид:

$$K_p = 4.86 + 1.38 M_{L\text{Азр}}. \quad (10 \text{ в})$$

Как видим, по методу наименьших квадратов коэффициент при $M_{L\text{Азр}}$ получается меньшим – 1.38 вместо 1.46.

Подводя итоги, можем констатировать, что для территории Азербайджана были получены корреляционные соотношения между различными магнитудными шкалами, а именно между локальной магнитудой $M_{L\text{Азр}}$ с $MLH_{\text{Азр}}$ и с региональной магнитудой $MPVA_{\text{Сauc}}$, а также с мировыми магнитудами $m_{b\text{ISC}}$, $MPSP_{\text{MOS}}$, $M_{S\text{ISC}}$. Отдельно исследовалось в разных магнитудных диапазонах соотношение между локальной магнитудой $M_{L\text{Азр}}$ и энергетическим классом землетрясений K_p . Полученные результаты представляют практический интерес как для изучения землетрясений Азербайджана, так и всего Кавказа. Они могут быть использованы для решения различных сейсмостатистических задач.

Л и т е р а т у р а

1. Раутман Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
2. Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and energy of earthquakes // Ann. Geofisica. –1956. – 9. – N 1. – P. 1–15.

3. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
4. Соловьёва О.Н., Агаларова Э.Б., Алимамедова В.П., Гасанов А.Г., Геодакян Э.Г., Гюль Э.К., Дарахвелидзе Л.К., Петросян М.Д., Фабрициус З.Э., Хромецкая Е.А. Калибровочные функции для определения магнитуды Кавказских землетрясений по короткопериодной волне *P* на малых эпицентральных расстояниях // Интерпретация сейсмических наблюдений. – М.: МГК АН СССР, 1983. – С. 65–72.
5. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2004–2012 гг. – Обнинск: ГС РАН, 2005–2013 гг.
6. Землетрясения Северной Евразии, в 1992–2007 гг. – Обнинск: ГС РАН, 1997, 1999–2013 гг.
7. Каталоги землетрясений Азербайджана за 2004–2007 гг. в сборниках ЗСЕ // Землетрясения Северной Евразии в 2004–2007 гг. – Обнинск: ГС РАН, 2010–2011. – (На CD).
8. Bulletin of the International Seismological Centre for 2004–2012. – URL: <http://www.isc.ac.uk>.
9. Каталоги землетрясений Азербайджана за 2004–2012 гг. // Отчеты РЦСС НАНА за 2004–2012 гг. – Баку: РЦСС, 2005–2013 гг.
10. Гасанов А.Г., Абдуллаева Р.Р. Азербайджан // Землетрясения Северной Евразии, 2003 год. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 58–66.
11. Рихтер Ч.Ф. Инструментальная шкала для магнитуд землетрясений // Слабые землетрясения. – М.: ИЛ, 1961. – С. 13–44.
12. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1982. – 272 с.