

УДК 550.34.042.43

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МОМЕНТНОЙ МАГНИТУДОЙ M_W И МАГНИТУДОЙ ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ M_S ДЛЯ КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2016 г. А.И. Лутиков^{1,2}, И.П. Габсатарова²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия*

С использованием каталогов *СМТ*, *NEIC* и данных по определению спектральных и очаговых параметров землетрясений Северного Кавказа, публикуемых Геофизической службой РАН, получены корреляционные соотношения, связывающие магнитуды M_S и M_W в Кавказском регионе в интервале магнитуд M_S от 2.2 до 7.3. Показано, что при $M_S \leq 5.1$ в названном регионе и на сопредельных территориях использование данных каталога *СМТ* при построении корреляционного соотношения $M_W(M_S)$ некорректно.

Основной вывод заключается в том, что магнитуды M_W и M_S в весьма широком интервале – от событий с $M_S \approx 2.0$ –2.5 вплоть до верхней границы насыщения шкалы M_S – связаны единым соотношением. В силу ограниченности имеющейся информационной базы по слабым и умеренным землетрясениям ($M_S \leq 5.1$) этот вывод является предварительным и нуждается в подтверждении и уточнении по мере накопления новых данных.

Ключевые слова: каталоги землетрясений, корреляционные соотношения, моментная магнитуда, магнитуда по поверхностным волнам, скалярный сейсмический момент.

Введение

Построение корреляционных соотношений между магнитудами разного типа, в частности, между моментной магнитудой M_W и магнитудой по поверхностным волнам M_S , помимо важного прикладного значения, имеет и определенный познавательный смысл, поскольку позволяет выявить границы чувствительности разных магнитудных шкал к объективной величине землетрясения. При этом под объективной величиной землетрясения, вероятно, целесообразно понимать высвобождающуюся в результате реализации события полную тектоническую энергию, в качестве верхней оценки которой выступает скалярный сейсмический момент M_0 [Лутиков, Родина, 2013]. Поэтому моментная магнитуда M_W , однозначным образом связанная с M_0 , является на сегодня возможно наилучшей энергетической характеристикой землетрясения во всем диапазоне сейсмических явлений.

Магнитуда по поверхностной волне M_S занимает особое место среди всего многообразия используемых в сейсмологической практике магнитуд как в силу своей высокой устойчивости, так и потому, что является базовой в работах по оценке сейсмической опасности, выполняемой в баллах макросейсмической шкалы. В связи с этим весьма актуальным представляется нахождение соотношения между шкалами M_W и M_S . Известен ряд работ (см., например, [Ризниченко, Джибладзе, Болквадзе, 1976; Гусев, Мельникова, 1990; Utsu, 2002; Bungum, Lindholm, Dahle, 2003] и др.), которые содержат результаты анализа взаимосвязи названных магнитуд как для всего земного шара, так и для отдельных его регионов.

Настоящая работа посвящена выявлению и анализу связи между магнитудами M_W и M_S в возможно более широком интервале магнитуд для Кавказского сейсмоактивного региона.

Исходные данные и результаты исследования

Для решения поставленной задачи рассматривалась несколько более широкая, чем собственно Кавказский сейсмоактивный регион, область с границами, определяемыми координатами $37.5^\circ \leq \varphi \leq 45.0^\circ$, $37.0^\circ \leq \lambda \leq 50.0^\circ$.

Использовались данные двух каталогов – каталога *CMT* за 1976–2014 гг. [<http://www.globalcmt.org/>] для моментных магнитуд и каталога *NEIC (USGS)* [<http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>] для магнитуд по поверхностным волнам. Анализировались 124 пары значений M_S и M_W в интервалах $3.8 \leq M_S \leq 7.3$ и $4.8 \leq M_W \leq 7.1$. Результаты анализа для полных интервалов магнитуд представлены на рис. 1, а. Можно видеть, что близкая к линейной связь между M_S и M_W наблюдается только в интервале $5.2 \leq M_S \leq 7.3$. При более низких магнитудах $3.8 \leq M_S \leq 5.1$ какой-либо значимой связи между M_W и M_S не прослеживается, что наглядно иллюстрирует представленный в более крупном графическом масштабе рис. 1, б.

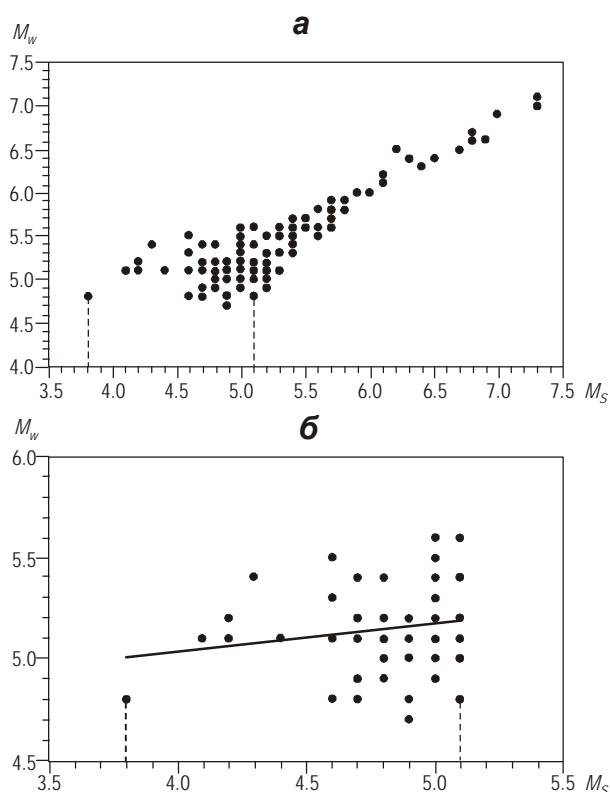


Рис. 1. Связь между M_W и M_S по данным каталогов *CMT* и *NEIC* в полных интервалах рассматриваемых магнитуд (а) и в интервале $3.8 \leq M_S \leq 5.1$ (б). Штриховые вертикальные линии – границы интервала M_S , представленного в более крупном масштабе

Формальное корреляционное соотношение $M_W(M_S)$, полученное по выборке из 58 пар значений магнитуд в интервале $3.8 \leq M_S \leq 5.1$, имеет вид

$$M_W = 0.145M_S + 0.8245, R_C \approx 0.18,$$

что указывает на отсутствие какой-либо значимой корреляции между M_W и M_S . Это, однако, не означает, что в интервале относительно невысоких магнитуд её нет в действительности.

При $5.2 \leq M_S \leq 7.3$ (см. рис. 1, *a*) наблюдается уже достаточно тесная корреляционная связь между рассматриваемыми магнитудами. Корреляционное соотношение между ними, полученное методом линейной ортогональной регрессии по выборке из 66 пар значений, для этого интервала имеет вид

$$M_W = (0.888 \pm 0.036)M_S + 0.682 \pm 0.246, \quad R_C = 0.956. \quad (1)$$

Рассмотрим распределение магнитуд M_W при фиксированных значениях магнитуды M_S . В качестве примера на рис. 2 представлены результаты такого анализа для землетрясений Кавказа, Северо-восточной Анатолии и Северо-западного Ирана при двух разных значениях M_S – 4.6 (*a*) и 5.6 (*б*).

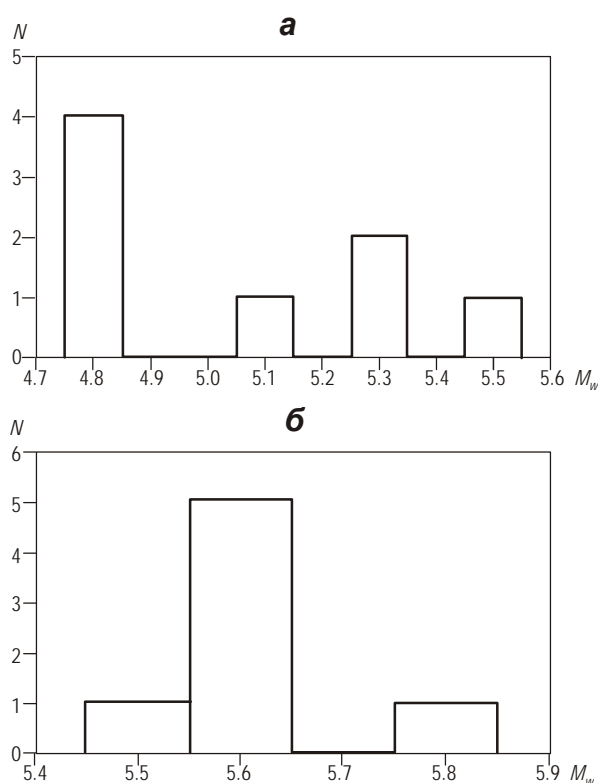


Рис. 2. Распределение магнитуд M_W для землетрясений Кавказа, Северо-восточной Анатолии и Северо-западного Ирана при разных значениях M_S : *a* – $M_S=4.6$; *б* – $M_S=5.6$

Если предположить, что при достаточно большом числе событий N распределение M_W стремится к распределению Гаусса, то на рис. 2, *a* можно увидеть только его правую ветвь. Левая ветвь отсутствует в связи с тем, что по данным телесейсмических сетей могут быть определены только относительно высокие моментные магнитуды; так, в каталоге *СМТ* для $M_W \leq 4.6$ решений нет вообще. Наблюдаемое выполаживание зависимости $M_W(M_S)$ в интервале $M_S \leq 5.1$ (см. рис. 1) является следствием наличия только правой ветви распределения M_W при фиксированных M_S (см. рис. 2, *a*).

Следует отметить, что экстраполяция зависимостей типа (1) на области значений магнитуд M_W и M_S , лежащих вне интервалов, в которых они получены, без дополнительных исследований, вообще говоря, не вполне корректна, поскольку может привести к неоправданно большим ошибкам. В частности, использование в работе [Лутиков, 2006]

корреляционной зависимости $\lg M_0 = f(M_S)$, полученной без учета выполаживания зависимости $M_W(M_S)$ при $M_S \leq 5.1$, привело к заметно завышенным оценкам $\lg M_0$ в области малых магнитуд.

В связи с вышесказанным одна из первоочередных задач состоит в создании условий для массового определения скалярных сейсмических моментов землетрясений с $M_S \leq 5.0$. Отметим, что в этом направлении уже имеются некоторые результаты, и сошлемся прежде всего на давнюю работу [Ризниченко, Джибладзе, Бодквдзе, 1976], в которой по результатам анализа спектров 54 слабых и умеренных землетрясений Кавказа соотношение между энергетическим классом K_P ($4 < K_P < 12$) и M_0 получено в виде

$$\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] \pm 0.3 = 7.5 + 0.65 K_P.$$

Если воспользоваться известной [Раутиан, 1960] корреляционной связью между M_S и K_P , то

$$\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] = 1.17 M_S + 10.1. \quad (2)$$

Переходя в (2) от $\lg M_0$ к моментной магнитуде M_W , в соответствии с [Kanamori, 1977], корреляционное соотношение $M_W(M_S)$ получим в виде

$$M_W = 0.78 M_S + 0.667. \quad (3)$$

Ниже соотношения (2) и (3) будут сопоставлены с другими аналогичными оценками.

В работе [Bungum et al., 2003] для слабых и умеренных землетрясений Северной и Центральной Европы предложено считать $M_S \approx M_W$; в таком случае (см. [Kanamori, 1977]) $\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] \approx 1.5 M_S + 9.1$.

В последние годы в Геофизической службе РАН проводится систематическая работа по оценке очаговых параметров отдельных слабых землетрясений Кавказа, в том числе их скалярных сейсмических моментов, оцениваемых по спектрам S -волн [Габсатарова, Малянова, 2012, 2013, 2014]. При этом используются результаты исследований характеристик поглощения энергии сейсмических волн в коре и верхней мантии на Северном Кавказе и добротности среды на региональных расстояниях, выполненных О.В. Павленко [2008, 2009] по цифровым записям землетрясений последнего десятилетия.

В упомянутой выше работе [Габсатарова, Малянова, 2012] впервые исследована зависимость скалярного сейсмического момента от энергетического уровня землетрясений в Кавказском регионе с использованием данных 2004–2006 гг. Проанализировано 16 землетрясений энергетического класса $8.0 \leq K_P \leq 12.9$ ($2.2 \leq M_S \leq 4.9$) и методом ортогональной регрессии получена зависимость $\lg M_0 = f(M_S)$ в виде

$$\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] = (1.17 \pm 0.12) M_S + (10.51 \pm 0.58), R_C = 0.930. \quad (4)$$

Относительно M_W и M_S соотношение (4) можно переписать как

$$M_W = (0.802 \pm 0.083) M_S + 0.909 \pm 0.396, R_C \approx 0.933. \quad (5)$$

Отметим, что соотношение (4) почти точно совпадает с полученным ранее в [Ризниченко, Джибладзе, Бодквдзе, 1976] соотношением (2).

После добавления к уже имевшимся 16 определениям M_0 [Габсатарова, Малянова, 2012] еще 11 значений M_0 , полученных в 2007–2008 гг. по слабым землетрясениям ($8.7 \leq K_P \leq 10.7$ или $2.6 \leq M_S \leq 3.7$) [Габсатарова, Малянова, 2013, 2014], нами уже по 27 землетрясениям методом линейной ортогональной регрессии была построена новая зависимость $\lg M_0 = f(M_S)$, представленная на рис. 3. В аналитической форме эта зависимость имеет вид

$$\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] = (1.31 \pm 0.15) M_S + (10.28 \pm 0.66), R_C = 0.865 \quad (6)$$

и относительно M_W и M_S может быть представлена как

$$M_W = (0.876 \pm 0.102) M_S + 0.774 \pm 0.441, R_C \approx 0.865. \quad (7)$$

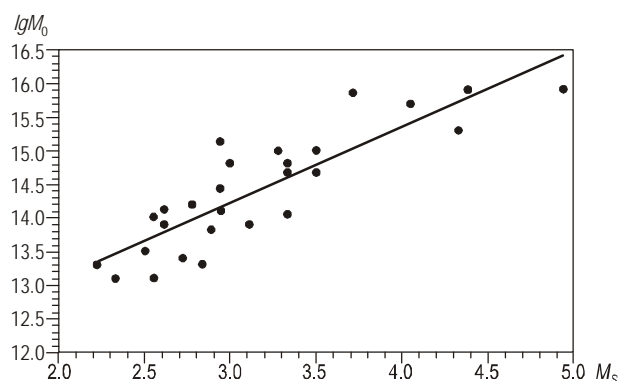


Рис. 3. Связь между $\lg M_0$ и M_S для слабых ($2.2 \leq M_S \leq 4.9$) землетрясений Кавказа. Прямая линия – аппроксимирующая ортогональная регрессия. Значения M_S пересчитаны из K_P по формуле Т.Г. Раутиан [1960]

Хотя соотношения (4) и (6) совпадают в пределах ошибок, они все же несколько различны. Угловой коэффициент при M_S в (6) выше, чем в (4) – 1.31 вместо 1.17, а свободный член несколько ниже – 10.28 в (6) вместо 10.51 в (4). Отметим также, что корреляционная связь между M_S и $\lg M_0$ в соотношении (6) оказалась менее тесной, чем в соотношении (4).

Распределения числа событий в разных интервалах энергетических классов K_P , по которым были построены соотношения (4) и (6), представлены на рис. 4.

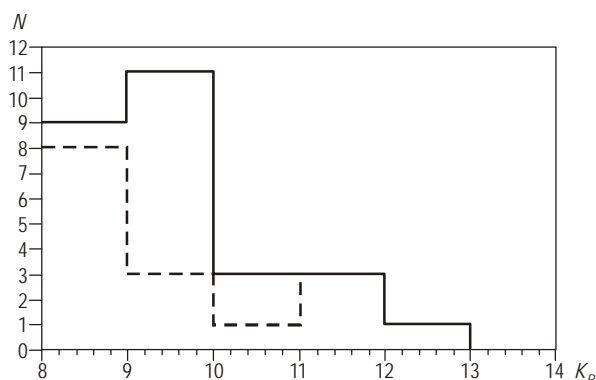


Рис. 4. Распределение числа событий в разных интервалах энергетических классов K_P , по которым были построены регрессии (4), (5) (пунктир) и (6), (7) (сплошная линия)

Видно, что распределения заметно различаются, прежде всего, за счет присутствия в регрессии (6) большого числа событий с $9.0 \leq K_P \leq 10.0$ ($2.8 \leq M_S \leq 3.3$) – 11 в (6) вместо 3 в (4). Таким образом, регрессия (6) построена по значительно большему числу событий младших энергетических классов, чем регрессия (4).

Доминирующее число определений M_0 событий с “младшими” магнитудами обусловило их больший разброс, что, в свою очередь, сказалось и на уменьшении тесноты корреляции в регрессии (6) по сравнению с регрессией (4).

Обсуждение результатов

Рассмотрим все полученные выше корреляционные зависимости $M_W(M_S)$, охватывающие интервал M_S от 2.2 до 7.3, графики которых представлены на рис. 5.

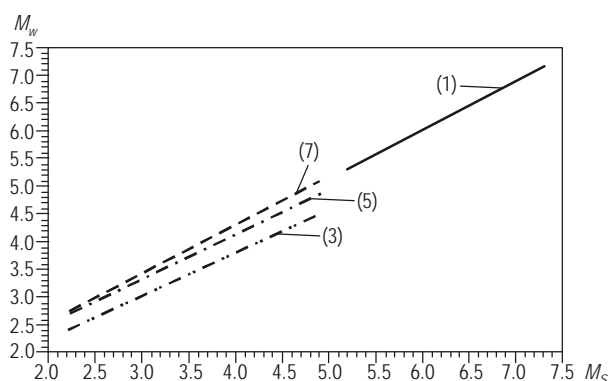


Рис. 5. Графики зависимости $M_W(M_S)$, рассчитанные по соотношениям (1), (3), (5), (7)

Можно видеть, что график, рассчитанный по соотношению (7) в интервале магнитуд $2.2 \leq M_S \leq 4.9$ по 27 парам значений M_S и M_W , является фактическим продолжением графика, рассчитанного по соотношению (1) в интервале магнитуд $5.2 \leq M_S \leq 7.3$. Это подтверждается и почти полным совпадением самих соотношений (1) и (7). Вопрос о том, какое из трех соотношений, приводимых в интервале $2.2 \leq M_S \leq 4.9$, является более предпочтительным, пока, строго говоря, остается открытым, поскольку для их построения использованы недостаточно большие выборки землетрясений. Однако при сопоставлении зависимостей (4), (5) и (6), (7) предпочтение все же следует отдать последним, поскольку они построены по почти вдвое большему числу пар значений M_S и M_W . Кроме того, распределение числа событий, по которому построены зависимости (6) и (7) (см. рис. 4), также выглядит предпочтительней, так как энергетические классы K_P (или магнитуды M_S) представлены в нем более равномерно.

Что касается зависимостей (2) и (3), то классы или магнитуды, которые использовались при их построении, впоследствии могли быть частично пересмотрены, в связи с чем они вряд ли могут считаться вполне надежными. Поэтому пока (за неимением более полных данных) будем отдавать предпочтение зависимостям (6) и (7). При этом надо отметить, что если в будущем при пополнении информационной базы зависимость (7) окажется справедливой, то M_W и M_S будут связаны единым соотношением в весьма широком интервале магнитуд – от событий с $M_S \approx 2.0-2.5$ вплоть до верхней границы насыщения шкалы M_S .

Важно при расширении информационной базы особое внимание обращать на единые методические подходы к определению всех энергетических оценок и магнитуд применительно к региональным расстояниям в рамках одного региона.

Следует отметить также, что на современном этапе корректность используемой общей формулы пересчета M_S из K_P [Раутиан, 1960] нуждается в тщательной проверке применительно к Кавказскому региону, где на подавляющем числе сейсмических станций произошло аппаратное переоснащение.

Заключение

С использованием всей совокупности имеющихся данных авторами в широком интервале магнитуд M_S (от 2.2 до 7.3) получены корреляционные соотношения, связывающие магнитуды M_W и M_S в Кавказском регионе.

На основе анализа данных каталога СМТ показана некорректность их использования для построения корреляционного соотношения $M_W(M_S)$ при $M_S \leq 5.1$, по крайней мере, в Кавказском регионе и на сопредельных территориях.

Основной вывод состоит в том, что магнитуды M_W и M_S в весьма широком интервале – от событий с $M_S \approx 2.0-2.5$ вплоть до верхней границы насыщения шкалы M_S – связаны единым соотношением. В силу ограниченности имеющейся информационной базы по слабым и умеренным землетрясениям ($M_S \leq 5.1$) этот вывод является предварительным и нуждается в подтверждении и уточнении по мере накопления новых данных.

Литература

- Габсатарова И.П., Малянова Л.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии. 2006 год. Обнинск: ГС РАН, 2012. С.286–291.
- Габсатарова И.П., Малянова Л.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии. 2007 год. Обнинск: ГС РАН, 2013. С.301–305.
- Габсатарова И.П., Малянова Л.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии. 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С.297–303.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С.55–63.
- Лутиков А.И. Сейсмологический мониторинг по ходу высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента на примере Кавказского сейсмоактивного региона // Исследования по сеймотектонике и современной геодинамике. М.: ИФЗ РАН, 2006. С.78–87.
- Лутиков А.И., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 4. С.5–17.
- Павленко О.В. Характеристики поглощения сейсмических волн в коре и верхней мантии Северного Кавказа // Физика Земли. 2008. № 6. С.52–60.
- Павленко О.В. Изучение характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе посредством моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений // Физика Земли. 2009. № 10. С.38–48.
- Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности // Труды ИФЗ АН СССР. М.: ИФЗ АН СССР, 1960. № 9(176). С.75–114.
- Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А., Болквадзе И.Н. Спектры колебаний и параметры очагов землетрясений Кавказа // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С.74–86.
- Bungum H., Lindholm C.D., Dahle A. Long-period ground-motions for large European earthquakes, 1905–1992, and comparisons with stochastic predictions // J. Seism. 2003. V. 7. P.377–396.
- Kanamori H. The energy release of great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P.2981–2987.
- Utsu T. Relationships between magnitude scales // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology / Eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger. 2002. V. 81A. P.733–746.

Сведения об авторах

ЛУТИКОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru

ГАБСАТАРОВА Ирина Петровна – кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Геофизическая служба РАН. 249035, г. Обнинск, Калужская обл., пр. Ленина, д. 189. Тел.: 8(48439) 5-77-64, 8(495) 912-68-72. E-mail: ira@gstras.ru

RELATIONSHIP BETWEEN MOMENT MAGNITUDE M_W AND SURFACE WAVE MAGNITUDE M_S FOR THE CAUCASUS REGION AND ADJACENT AREAS

A.I. Lutikov^{1,2}, I.P. Gabsatarova²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Geophysical Survey of RAS, Obninsk, Kaluga region, Russia*

Abstract. Using CMT and NEIC catalogues and data characterizing spectral and source parameters of earthquakes of Northern Caucasus that are published by the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, correlation relationships between magnitudes M_S and M_W were obtained for the Caucasus region in a surface wave magnitude range $2.2 \leq M_S \leq 7.3$. It was showed that for $M_S \leq 5.1$ in the region studied and adjacent areas, the usage of CMT data in the construction of dependence $M_W(M_S)$ is incorrect.

The basic conclusion of the work is that magnitudes M_W and M_S are connected by a uniform relationship in a rather wide interval: from events with $M_S \approx 2.0-2.5$ up to the values of M_S scale saturation. Due to limited data set available on weak and moderate earthquakes ($M_S \leq 5.1$) the above conclusion can be considered as preliminary and requires verification and additional adjustment in process of updating the data.

Keywords: Earthquake catalogues, correlation relationships, moment magnitude, surface wave magnitude, scalar seismic moment.