

УДК 550.348. (100)

## Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах $ML$ в некоторых регионах Северной Евразии

© 2023 г. Н.В. Петрова, А.Д. Курова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

**Аннотация.** Проанализированы оценки локальных магнитуд  $ML$  в каталогах землетрясений Балтийского щита (сети станций региональных центров KOGSR и FCIAR), Армении, Азербайджана, Арктики, Урала и Алтая и Саян, где  $ML$  представлены массово. Установлены зависимости  $ML$  от «внешней» магнитуды  $m_b$  по данным ISC. Показано, что магнитуды  $ML$  слабых и умеренных сейсмических событий, записанных сейсмическими станциями указанных регионов, за исключением Алтая и Саян, близки при одинаковых  $mb_{ISC}$  как между собой, так и к  $ML$  по данным центров NAO, HEL, DDA, TЕН соседних государств. Для всех регионов, кроме Алтая и Саян, установлена общая зависимость в виде:  $ML_{av} = 1.06 \cdot mb_{ISC} - 0.34$ . Обнаружено существенное завышение относительно этой группы данных оценок  $ML$  землетрясений Алтая и Саян, записанных региональной сетью станций. Для основной группы данных показано превышение локальных магнитуд  $ML = f(K_p)$  над магнитудой  $M$  в известном соотношении Т.Г. Раутиан  $K_p = 1.8 \cdot M + 4$  в среднем на  $\Delta M = 0.2 \cdot 0.4$  в диапазоне магнитуд  $ML = 1.0 \div 6.0$ . Для землетрясений Алтая и Саян завышение локальных магнитуд более значительно и должно быть учтено при расчёте сейсмической энергии  $\lg E = K_p$  с помощью регионального соотношения  $K_p = f(ML)$ . В целом магнитуды в соотношении  $K_p = 1.8 \cdot M + 4$  для слабых и умеренных землетрясений ближе к локальным магнитудам  $ML$ , а для сильных событий с  $K_p > 13$  ( $M_s > 5.0$ ) – к магнитудам по поверхностным волнам  $M_s$ .

**Ключевые слова:** локальная магнитуда, сеть сейсмических станций, сейсмическая энергия, ортогональная регрессия.

**Для цитирования:** Петрова Н.В., Курова А.Д. Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах  $ML$  в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 61–76. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.05>. – EDN: LTIMEJ

### Введение

Одной из важнейших характеристик динамических процессов в очаге землетрясения является энергия. Энергия очага, излучённая в виде сейсмических волн, определяется по их амплитудным и частотным характеристикам с учётом затухания с расстоянием и амплитудно-частотной характеристики регистрирующего прибора. В связи со сложностью прямого определения энергии волн по сейсмическим записям, принято использовать корреляционные соотношения между энергией и магнитудой, которая не является по сути физическим параметром, но получила широкое распространение в наблюдательной сейсмологии. Первой магнитудой в сейсмологи-

ческой практике была локальная магнитуда  $ML$ , предложенная Чарльзом Рихтером в 1930-х гг. [Richter, 1935]. Современный стандарт IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [Summary ..., 2013] предлагает для регионов с условиями, близкими к Южной Калифорнии, следующую формулу для расчёта  $ML$ :

$$ML = \lg(A) + 1.11 \cdot \lg(R) + 0.00189 \cdot R - 2.09, \quad (1)$$

где  $A$  – максимальная амплитуда записи в  $nm$  на горизонтальной составляющей прибора, отфильтрованного таким образом, чтобы отклик сейсмографа/системы фильтров воспроизводил отклик стандартного сейсмографа Вуда-Андерсона;

$R$  – гипоцентральное расстояние в км, обычно меньше 1000 км.

Для коровых землетрясений в регионах, где свойства затухания отличаются от Южной Калифорнии и измерения амплитуд производятся на вертикальной компоненте сейсмографа, стандартное уравнение принимает форму:

$$ML = \lg(A) + C(R) + D,$$

где  $A$  и  $R$  – то же, что в уравнении (1);  $C(R)$  – калибровочная функция, учитывающая региональное затухание;  $D$  – поправка на любые систематические различия между амплитудами, измеренными на горизонтальных и вертикальных сейсмографах.

При составлении каталогов сейсмических событий в СССР широкое распространение получила шкала энергетических классов Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960], связанных с высвобожденной сейсмической энергией соотношением  $K_p = \lg(E, Дж)$ . Значения  $K_p$  землетрясений являются функцией  $A_p + A_s$  (суммы максимальных амплитуд  $P$ - и  $S$ -волн по потоку сейсмической энергии через референц-сферу радиусом 10 км) и эпицентрального расстояния:

$$K_p = 1.8 \cdot \lg(A_p + A_s) + \sigma(\Delta),$$

где  $\sigma(\Delta)$  – калибровочная функция, зависящая от эпицентрального расстояния  $\Delta$  (км).

С переходом на цифровую регистрацию, начавшимся в 1990-х гг., в ряде регионов России и соседних стран был осуществлён переход от массового определения энергетического класса  $K_p$  к определению локальной магнитуды  $ML$  местных и близких землетрясений. В настоящее время  $ML$  определяется в ряде регионов России и соседних стран наряду с другими магнитудами и энергетическими классами, тогда как при обработке записей сейсмических станций Кольской, Архангельской, Алтае-Саянской, Уральской сетей в РФ, а также в Азербайджане и Армении, она является основной и чаще всего единственной оценкой энергии землетрясения, определяемой в массовом порядке. Поэтому географические границы настоящего исследования ограничены указанными регионами и сетями. Отметим, что в этих регионах для определения  $ML$  используются разные калибровочные кривые, поэтому необходимо сопоставление полученных с их помощью магнитуд как между собой, так и с магнитудами международных агентств, с целью выработки подходов к однородной оценке магнитуды и сейсмической энергии в унифицированных каталогах землетрясений, исполь-

зуемых для обоснованной оценки сейсмической опасности на межрегиональном уровне.

Основная задача данной работы – установление соотношений локальных магнитуд землетрясений в указанных регионах с «внешними» оценками величины землетрясения, которые могут быть использованы для однородной классификации землетрясений при исследованиях межрегиональной сейсмичности.

Дополнительной задачей является прояснение вопроса, какая магнитуда подразумевается под « $M$ » в известном соотношении [Раутиан, 1960]:

$$K_p = \lg E = 1.8 \cdot M + 4, \quad (2a)$$

установленном на материале местных и близких землетрясений Центральной Азии и используемом во многих регионах Северной Евразии, где массово определяется  $K_p$ , при составлении региональных и межрегиональных каталогов для решения различных сейсмологических задач.

Соотношение (2a) установлено полуэмпирическим путём. Коэффициент  $a=1.8$  соответствует наклону корреляционной билогарифмической зависимости между суммой максимальных амплитуд  $P$ - и  $S$ -волн на сейсмограммах ВЭГИК, приведённой к фиксированному расстоянию  $R=10$  км, и энергией землетрясения, рассчитанной теоретически, а коэффициент  $b=4$  соответствует логарифму энергии землетрясения с локальной магнитудой Ч. Рихтера  $ML=0$ . К сожалению, индекс, уточняющий тип магнитуды в уравнении (2a), был опущен, но на равенство  $M=ML$  указывали Т.Г. Раутиан в своей более поздней работе [Rautian et al., 2007], Ф.Ф. Аптикаев [Аптикаев, 2012], П. Борман с соавторами [Bormann et al., 2013] и др. Однако в сейсмологических исследованиях в ряде регионов, а также в практике сейсмического районирования территории России и сопредельных стран [Новый каталог ..., 1977; Kondorskaya, Ulomov, 2023] уравнение (2a) часто использовалось как соотношение между энергетическим классом и магнитудой по поверхностным волнам ( $MLH$  или  $M_s$ , которые предполагаются равными). Есть ли для этого основания, предстоит выяснить в данной работе путём сопоставления эмпирических зависимостей  $ML(K_p)$  и  $M_s(K_p)$ , установленных для разных регионов, с уравнением (2a).

Следует отметить, что уравнение (2a) применимо к землетрясениям с  $K_p \leq 14$  ( $M \leq 5.6$ ), т.к. для более сильных событий размер очага превышает размер референц-сферы радиуса  $R=10$  км, поток энергии через которую рассчитывается при определении  $K_p$ . Для землетрясений с  $K_p > 14$

в [Раутиан, 1960] рекомендуется уравнение связи, полученное теоретически с учётом размера очага:

$$K_p = 1.1 \cdot M + 8. \quad (26)$$

### Методика анализа и характеристика исходных данных

Для сравнения определяемых в разных регионах локальных магнитуд  $ML$  устанавливались их соотношения с «внешней» магнитудой, в качестве которой выбрана магнитуда по короткопериодным  $P$ -волнам  $m_b$  по данным ISC [International ..., 2023] (далее  $mb_{ISC}$ ). Этот выбор основан на наиболее массовом определении  $mb_{ISC}$  по сравнению с другими магнитудами международных центров ( $M_s$ ,  $M_w$ ,  $M_B$  и др.) для землетрясений из исследуемых в данной статье регионов.

При анализе связи магнитуд с энергией землетрясений в качестве логарифма сейсмической энергии использовался энергетический класс по шкале Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960].

Корреляционные связи между оценками величины землетрясений устанавливались в виде линейных зависимостей типа  $Y = a \cdot X + b$ , где  $b = \bar{Y} - a \cdot \bar{X}$ ,  $a = \sigma_Y / \sigma_X$ , и — средние значения  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$ ;  $\sigma_X$  и  $\sigma_Y$  — их стандартные отклонения. Коэффициент  $a$  находился методом ортогональной регрессии, минимизирующим сумму квадратов отклонений, перпендикулярных искомой прямой, в предположении, что разброс точек в корреляционной связи между  $X$  и  $Y$  обусловлен только их случайными погрешностями  $\delta_X$  и  $\delta_Y$ , которые в свою очередь пропорциональны стандартным отклонениям  $\sigma_X$  и  $\sigma_Y$ :  $\delta_X / \sigma_X = \delta_Y / \sigma_Y$ . Это предположение справедливо для большинства экспериментальных данных и используется, когда нет информации о величинах случайных ошибок.

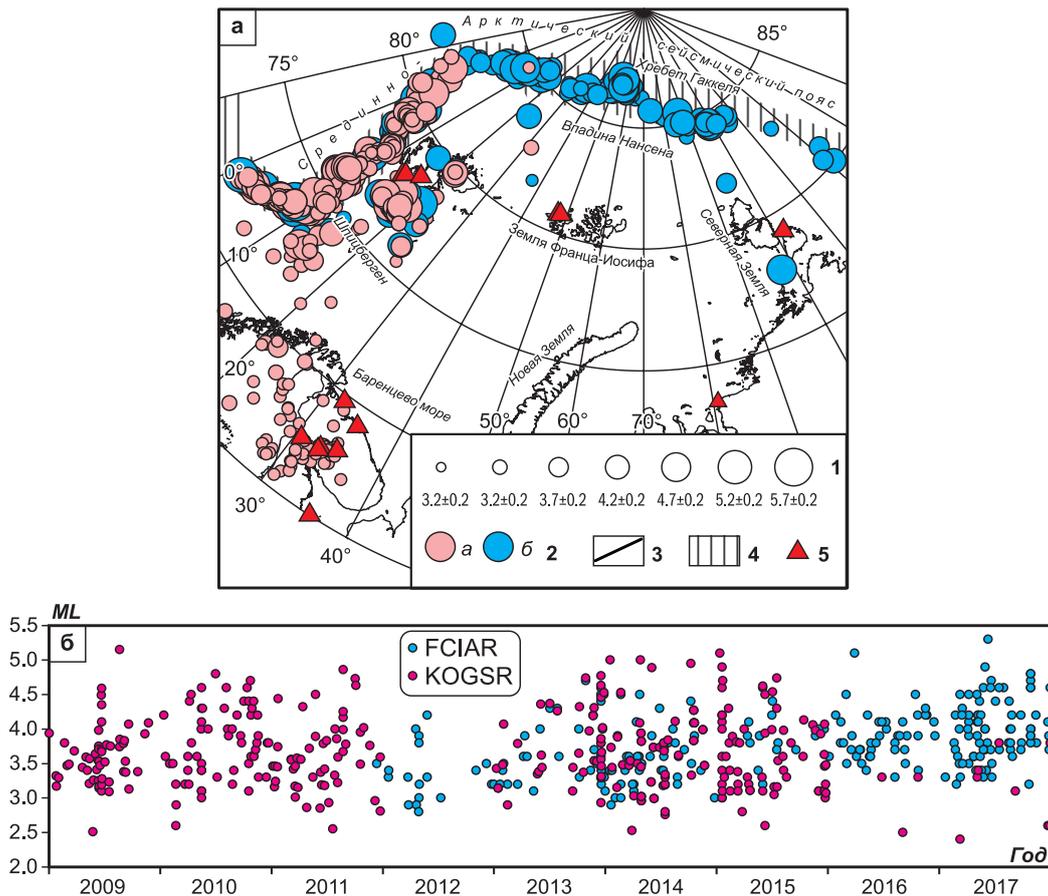
Источниками данных о  $ML$  землетрясений России и соседних стран являются региональные каталоги, публикуемые в ежегодниках и журналах «Землетрясения Северной Евразии» [Землетрясения Северной ..., 2015; 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021; 2022] и [Землетрясения России ..., 2020; 2021], а значений  $mb_{ISC}$  — Международный сейсмологический бюллетень ISC [International ..., 2023].

В разные периоды времени в вышеуказанных регионах при определении  $ML$  использовались разные калибровочные кривые, поэтому для анализа выбирались индивидуальные для каждого региона периоды времени, в течение которых  $ML$  рассчитывались единообразно.

Сейсмичность российского сектора Арктики и Балтийского щита («Арктика») контролируется в РФ телесеизмическими станциями ФИЦ ЕГС РАН, региональными сетями Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН (сеть KOGSR) и Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Уральского отделения РАН (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, код центра FCIAR). В Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН расчёт локальной магнитуды  $ML$  в 2009–2017 гг. проводился с использованием законов затухания для региона Баренцева моря, приведённых в [Hicks et al., 2004]. Для части событий, зарегистрированных станциями «Валаам», «Красное озеро», «Выборг», «Пулково» и «Ловозеро», параметры гипоцентров определялись на станции «Пулково», а значения  $ML$  брались из бюллетеня “Seismic events in Northern Europe” Института сейсмологии Университета Хельсинки, Финляндия, где  $ML$  рассчитывается по методике [Uski, 1997]. В секторе сейсмического мониторинга севера Русской плиты ФИЦ ЕГС РАН и в ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (центр FCIAR) при обработке данных сети АН в 2011–2017 гг. для определения магнитуды  $ML$  использовался способ расчёта, основанный на осреднённой по Северной Евразии калибровочной функции [Габсатарова, 2006]. Соответственно для сети центра KOGSR в настоящей работе привлечены к анализу данные о магнитудах из каталогов за 2009–2017 гг., а для FCIAR — за 2011–2017 гг. Распределение использованных землетрясений в пространстве и во времени показано на рис. 1а,б.

При обработке Уральских землетрясений в «ГИ УрО РАН» и ФИЦ ЕГС РАН до 2008 г. применялась локальная шкала магнитуд, использующая в качестве динамической характеристики максимальную скорость смещений. Поскольку максимальную амплитуду на регистрируемых волновых формах, как правило, имели  $Lg$ -волны, шкала получила условное обозначение  $M_{LgV}$ . В 2009 г. в регионе была принята шкала локальных магнитуд  $ML_{U_r}$ , которая в 2013 г. уточнена с помощью калибровочной функции, учитывающей закономерности распространения сейсмических волн для территории Пермского края и соседних областей [Дягилев, 2015]. С 2016 г. при обработке цифровых сейсмограмм уральских станций центров MIRAS и ФИЦ ЕГС РАН, наряду с расчётом магнитуды сейсмического события  $ML_{U_r}$ , стал производиться расчёт энергетического класса  $K_p$  по шкале Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960].

При этом использовался алгоритм, реализованный в программном комплексе WSG [Акимов, Красилов, 2020].



**Рис. 1.** Распределение анализируемых землетрясений российского сектора Арктики и Балтийского щита 2009–2017 гг. в пространстве (а) и во времени (б).

1 – магнитуда  $ML$ ; 2 – эпицентр землетрясения по данным KOGSR за 2009–2017 гг. (а) и FCIAR за 2011–2017 гг. (б); 3 – граница региона «Арктика» в ежегодниках и журналах «Землетрясения Северной Евразии»; 4 – сейсмический пояс; 5 – сейсмическая станция

В результате анализа параметров почти 2000 сейсмических событий установлена эмпирическая зависимость между магнитудой  $ML_{Ur}$  и энергетическим классом  $K_p$  для Урала [Верхоланцев и др., 2022]:

$$K_p = 1.74 \cdot ML_{Ur} + 3.68. \quad (3)$$

Совместных определений  $ML_{Ur}$  и  $mb_{ISC}$  по региону оказалось очень немного – значения  $ML_{Ur}$  13 землетрясений за период 2009–2017 гг. взяты из электронных приложений с каталогами землетрясений региона [Землетрясения Северной ..., 2015; 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021; 2022], а для восьми землетрясений за 2018–2019 гг., включая крупнейшее Катав-Ивановское землетрясение и его афтершоки, из [Землетрясения России ..., 2020; 2021] и [Дягилев и др., 2020]. Эпицентры анализируемых в настоящей работе землетрясений Урала за период 2009–2019 гг. показаны на рис. 2а, а магнитуды в зависимости от времени – на рис. 2б.

В Алтае-Саянском филиале (АСФ) ФИЦ ЕГС РАН в 2011 г. методика обработки сейсмологических данных полностью изменилась – произошёл переход от стандартной интерактивной обработки, введённой в практику в начале 2000-х гг., к полностью автоматизированной, реализованной в комплексе программ SeisComp3 [Еманов и др., 2018]. Энергия событий в этом комплексе оценивается локальными магнитудами  $ML$  с помощью калибровочной кривой для Южной Калифорнии, заложенной в SeisComp3. Так как ранее в регионе для классификации землетрясений использовался энергетический класс  $K_p$ , для преемственности энергетических параметров в каталогах в АСФ ФИЦ ЕГС РАН проведена работа по установлению связи между  $K_p$  и  $ML_{Alt}$ . Выборка данных включала 386 событий в диапазоне  $3.8 \leq K_p \leq 12.5$  ( $0.7 \leq ML \leq 6.0$ ). Установленная зависимость, приведённая в [Еманов и др., 2018], имеет вид:

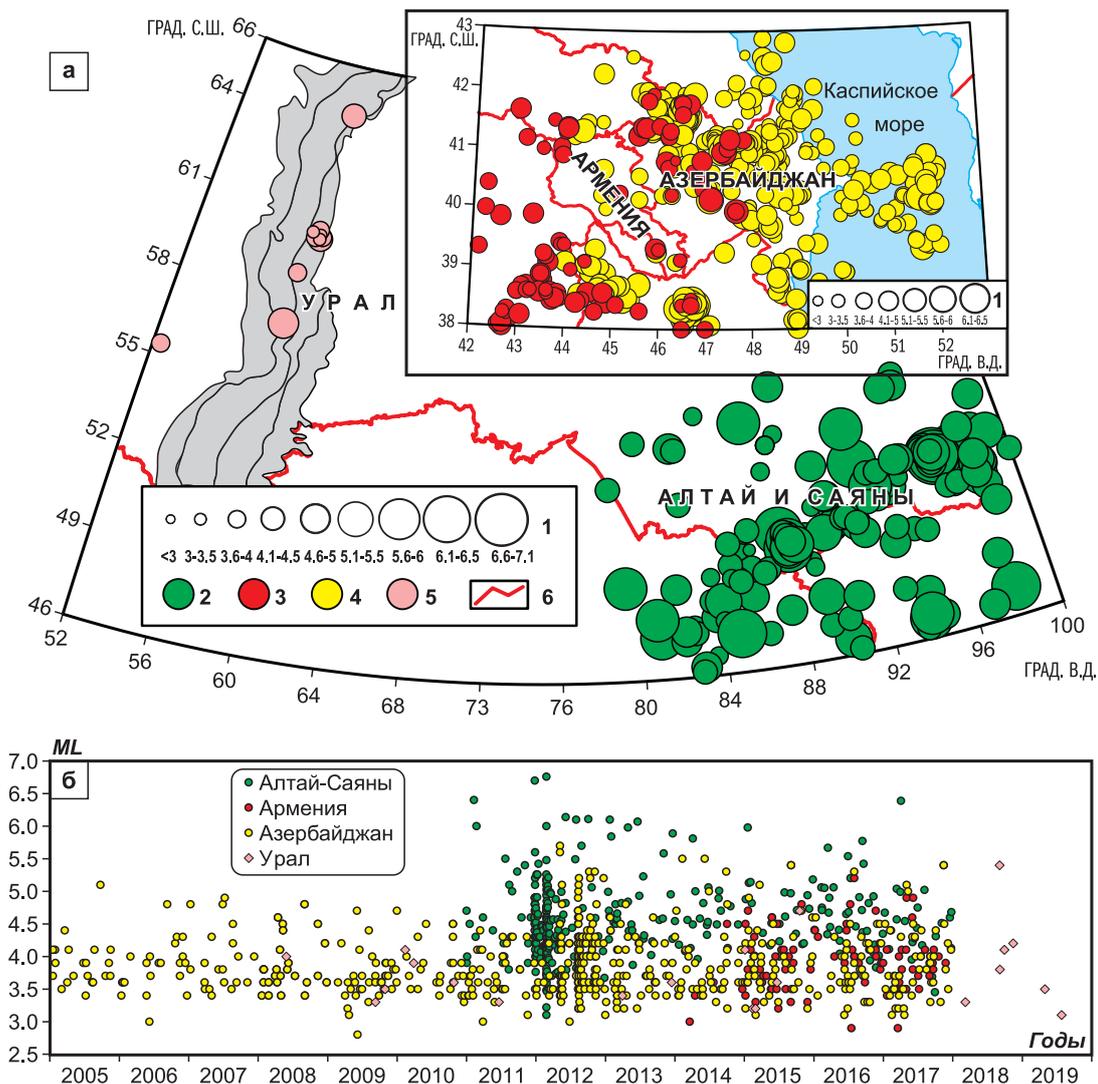


Рис. 2. Распределение анализируемых землетрясений Алтая-Саян, Армении, Азербайджана и Урала в пространстве (а) и во времени (б).

1 – магнитуда  $ML$ ; 2 – эпицентр землетрясения по данным Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 3 – то же по данным Армении за 2014–2017 гг.; 4 – то же по данным Азербайджана за 2005–2017 гг.; 5 – то же по данным центров ФИЦ ЕГС РАН и MIRAS для территории Урала; 6 – государственная граница

$$K_p = 1.7 \cdot ML_{Alt} + 2.5. \quad (4)$$

В нашем исследовании анализировались локальные магнитуды  $ML_{Alt}$  землетрясений за 2011–2017 гг. (рис. 2).

В Азербайджане, в связи с переходом в 2003 г. на цифровые способы регистрации землетрясений, в рутинной обработке наряду с энергетическим классом  $K_p$  и магнитудой  $MPVA$  появился новый тип магнитуды – локальная магнитуда  $ML$ . В настоящее время определяется только локальная магнитуда  $ML_{Azr}$ , а значения энергетических классов, публикуемые в каталогах ежегодников и журналов «Землетрясения Северной Евразии», пересчитываются из  $ML$ . Обработка

землетрясений в Азербайджане ведётся с помощью математического обеспечения Antelope Real-Time System, v. 5.6 с использованием осреднённой скоростной модели глубинного геологического строения Азербайджана. Локальная магнитуда определяется по формуле:

$$ML_{Azr} = \lg(A) + 1.66 \cdot \lg(\Delta) - 0.304 + c_2 \times \lg(\Delta \times c_3 + c_4) + c_5,$$

где  $c_2, c_3, c_4, c_5$  – стационарные поправки;  $\Delta$  – расстояние в градусах, максимальное –  $5.5^\circ$ .

В статье [Етирмишли и др., 2014] приводятся уравнения связи между  $ML_{Azr}$  и  $K_p$ :

$$ML_{Azr} = 0.2 - 5.0: K_p = 1.46 \cdot ML_{Azr} + 4.58, \quad r = 0.89, N = 1149; \quad (5a)$$

$$ML_{Azr}=4.0-5.0: K_p=1.82 \cdot ML_{Azr}+2.91, \\ r=0.59, N=25, \quad (56)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции,  $N$  – число использованных данных.

В настоящее время в практику введено новое соотношение:

$$K_p=1.39 \cdot ML_{Azr}+4.77, \quad (6)$$

установленное в более широком диапазоне магнитуд,  $ML_{Azr}=0.1-6.0$  [Етурмишли и др., 2018; 2022], но приводящее к существенному занижению  $K_p$  для землетрясений с  $ML_{Azr}>4.5$  относительно уравнений (2а, б), если принять, что  $M=ML_{Azr}$ .

Другое полезное для целей настоящего исследования соотношение из работы [Етурмишли и др., 2014]:

$$ML_{Azr}=1.13 \cdot mb_{ISC}-0.56, r=0.75, N=61 \quad (7)$$

установлено на относительно небольшом количестве данных за 2007–2009 гг. В нашем исследовании для анализа связи  $ML_{Azr}$  с  $mb_{ISC}$  собрано  $N=574$  пары данных за 2005–2017 гг. Их эпицентры показаны на рис. 2.

В Армении классификация землетрясений выполняется в магнитудах с помощью программы НУРО-71 для обработки близких землетрясений [Lee, Lahr, 1975]:

$$M=\lg(A/T)+2.56 \cdot \lg(\Delta)+0.67,$$

где  $A$  – максимальная амплитуда  $S$ -волны в микронах;  $T$  – преобладающий период ( $c$ );  $\Delta$  – эпицентральный расстояние от станции до источника в км.

Сравнение на небольшом количестве данных показало близость этой магнитуды к локальным магнитудам по данным DDA (Disaster and

Emergency Management Presidency, Ankara, Turkey) и CSEM (European-Mediterranean Seismological Centre), поэтому в данной работе она рассматривается и обозначается как локальная магнитуда  $ML_{Arm}$ . Её конвертация в энергетические классы, приведённые в опубликованных в [Землетрясения Северной ..., 2015; 2016; 2017; 2018; 2019; 2020; 2021; 2022] каталогах Армении, осуществляется по формуле (2а).

В нашем исследовании использовались данные о  $ML_{Arm}$  и  $mb_{ISC}$  за период 2014–2017 гг. (рис. 2).

### Анализ данных

На основе вышеописанных данных для каждого региона/центра установлены соотношения типа  $ML=amb_{ISC}+b$ , коэффициенты которых приведены в табл. 1, а линии регрессии показаны на рис. 3а. В табл. 1 в скобках указаны также коэффициенты  $b$  при закреплённом  $a=1$ , которые фактически являются разницей средних значений  $\overline{\Delta M} = \overline{ML} - \overline{mb_{ISC}}$  для каждого региона. Как следует из таблицы, значения  $\overline{\Delta M}$  невелики для всех регионов, за исключением Алтая и Саян (0.55). Однако средние оценки не дают реальной картины отклонений в широком диапазоне магнитуд, т.к. приведённые в таблице значения  $a$ , установленные экспериментально (верхняя строка для каждого региона), отличаются от  $a=1$ . Так, для выборки Алтае-Саянских землетрясений  $\overline{\Delta M}=0.55$  при  $\overline{mb_{ISC}}=4.0$ , для землетрясений Азербайджана  $\overline{\Delta M}=0.01$  при  $\overline{mb_{ISC}}=3.9$ , тогда как для более сильных землетрясений значения  $\overline{\Delta M}$  возрастают. Тренды значений  $ML-mb_{ISC}$  в зависимости от магнитуды  $mb_{ISC}$  в исследуемых регионах показаны на рис. 3б.

Таблица 1. Параметры регрессий типа  $ML=amb_{ISC}+b$  для разных регионов/центров

Регион / центр	$a$	$\pm\delta a$	$b$	$\pm\delta b$	$r$	$N$	$\Delta ML$	Период, гг.	
Алтай и Саяны	1.37	0.05	-0.92	0.21	0.754	350	3.1÷6.4	2011–2017	(8)
	(1.0)		(0.55)			–“–	–“–	–“–	
Азербайджан	1.23	0.03	-0.87	0.11	0.856	574	2.4÷6.4	2005–2017	(9)
	(1.0)		(0.01)			–“–	–“–	–“–	
Армения	1.08	0.06	-0.26	0.25	0.841	95	2.9÷5.4	2014–2017	(10)
	(1.0)		(0.03)			–“–	–“–	–“–	
Арктика / FCIAR	0.91	0.05	+0.19	0.21	0.614	231	2.8÷5.3	2011–2017	(11)
	(1.0)		(-0.18)			–“–	–“–	–“–	
Арктика / KOGSR	1.05	0.04	-0.37	0.16	0.745	341	2.4÷5.8	2009–2017	(12)
	(1.0)		(-0.19)			–“–	–“–	–“–	
Урал	1.05	0.113	-0.32	0.44	0.890	21	3.2÷5.4	2009–2019	(13)
	(1.0)		(-0.12)			–“–	–“–	–“–	

Примечание:  $\delta a, \pm\delta b$  – ошибки определения коэффициентов регрессий  $a$  и  $b$  на 95% уровне доверия;  $r$  – коэффициент корреляции. В скобках приведены значения коэффициента  $b$  при закреплённом коэффициенте  $a=1$ .

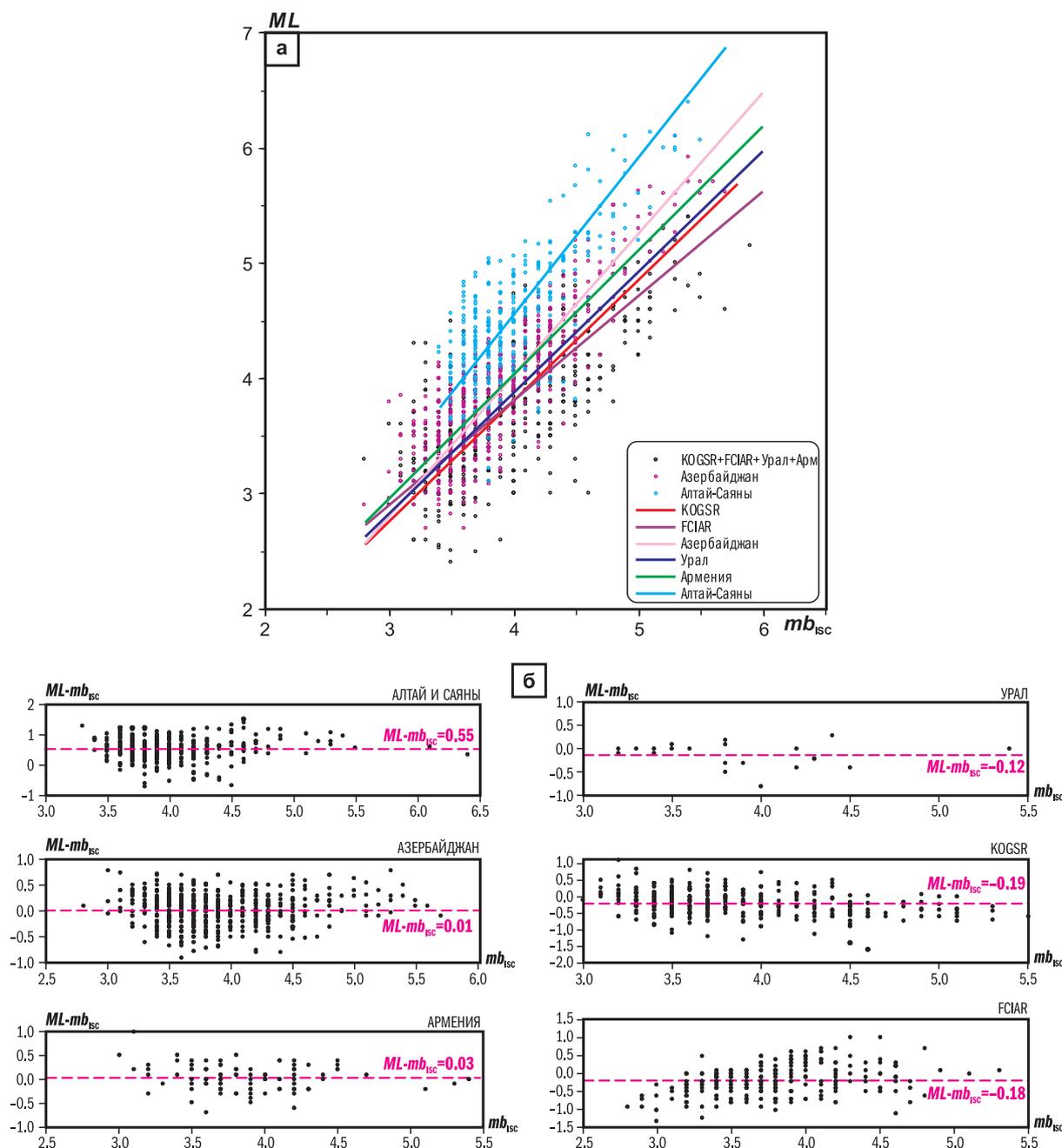
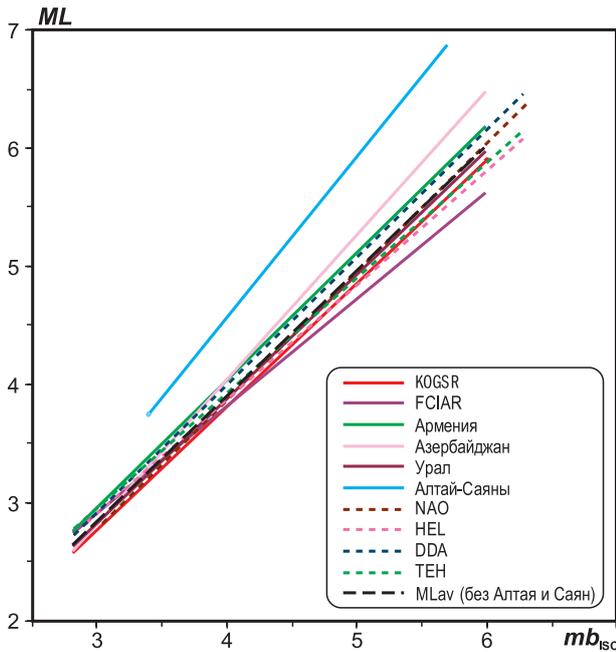


Рис. 3. Соотношения между  $ML$  и  $mb_{ISC}$  для регионов России и сопредельных стран, установленные методом ортогональной регрессии (а) и отклонения  $ML - mb_{ISC}$  в зависимости от магнитуды  $mb_{ISC}$  для исследуемых регионов (б).

FCIAR – обрабатывающий центр ФИЦ Комплексного исследования Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН.  
KOGSR – обрабатывающий центр Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН

Из соотношений (8)÷(13) наиболее близки между собой зависимости для Армении (10), KOGSR (12) и Урала (13). Соотношения (9) и (11) для Азербайджана и центра FCIAR для землетрясений с  $mb_{ISC} \leq 4.5$  также дают близкие к этой группе значения  $ML$  при равных  $mb_{ISC}$ , но при увеличении магнитуды расхождения увеличиваются (рис. 3а).

Как уравнения связи (8)÷(13) согласуются с «внешними» магнитудами  $ML$ , показано на рис. 4, где наряду с установленными в данной работе соотношениями представлены зависимости  $ML$  сейсмических служб соседних стран – NAO (Норвегия), HEL (Финляндия), DDA (Турция) и TEH (Иран) – от  $mb_{ISC}$ .



**Рис. 4.** Соотношения между  $ML$  и  $mb_{ISC}$  землетрясений в некоторых регионах России и прилегающих территорий в сравнении с аналогичными уравнениями сейсмологических агентств соседних стран.

NAO – Norwegian National Data Center, Kjeller, Norway (NORSAR); HEL – Department of Geosciences and Geography, University of Helsinki, Finland; DDA – Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, Turkey; ТЕН – Tehran University, Tehran, Iran

На рис. 4 для NAO и HEL приведены соотношения из работы [Morozov *et al.*, 2022]:

$$\text{NAO: } mb_{ISC} = 0.92 \cdot ML_{\text{NAO}} + 0.44, \quad r = 0.76, N = 558; \quad (14)$$

$$\text{HEL: } mb_{ISC} = 1.03 \cdot ML_{\text{HEL}} + 0.01, \quad r = 0.52, N = 158, \quad (15)$$

установленные методом ортогональной регрессии за перекрывающиеся с нашими данными периоды времени после 2009 г. и преобразованные в зависимости типа  $ML(mb_{ISC})$ .

Кроме того, мы установили собственные соотношения для землетрясений Армении и Азербайджана за 2012–2017 гг., записанных сейсмическими станциями Ирана (сеть ТЕН) и Турции (сеть DDA):

$$\text{ТЕН: } ML_{\text{ТЕН}} = 0.97(\pm 0.03) mb_{ISC} + 0.11(\pm 0.11), \quad r = 0.89, N = 294; \quad (16)$$

$$\text{DDA: } ML_{\text{DDA}} = 1.08(\pm 0.03) mb_{ISC} - 0.33(\pm 0.12), \quad r = 0.85, N = 165. \quad (17)$$

Как показывает сравнение, соотношения  $ML(mb_{ISC})$  для  $ML$  по данным KOGSR, Урала и Армении лучше всего согласуются с магнитудами по данным сейсмических служб соседних стран NAO, HEL, ТЕН и DDA (рис. 4). Отклонения от этой группы зависимостей для Азербайджана и FCIAR, заметные для землетрясений с  $ML > 4.0$ – $4.5$ , могут быть связаны как с различиями калибровочных кривых, так и с неравномерным распределением их количества для слабых и сильных землетрясений. Так, зависимость (7) для Азербайджана [Етирмишли и др., 2014], установленная ранее на небольшом числе данных ( $N=61$ ), практически совпадает с линией регрессии для Армении.

Для всех землетрясений, кроме Алтае-Саянских, получена общая зависимость:

$$ML_{\text{av}} = 1.06(\pm 0.03) mb_{ISC} - 0.336(\pm 0.01), \quad r = 0.75, N = 904. \quad (18)$$

При установлении соотношения (18) мы ограничили данные по Азербайджану, количество которых ( $N=574$ ) явно преобладало над данными по остальным регионам (табл. 1), периодом 2013–2017 гг., за который число землетрясений составило  $N=216$ . Для 904 пар  $ML$  и  $mb_{ISC}$ , использованных для установления общей зависимости (18), получена средняя разница между этими магнитудами:  $\overline{\Delta M} = -0.1$ .

Обособленно от соотношений (8)÷(18) лежит уравнение (8) для региона «Алтай и Саяны» (рис. 3а, 4), согласно которому  $ML_{\text{Алт}}$  превышают  $ML_{\text{ср}}$  из (18) на  $\Delta M = 0.6$  при  $mb_{ISC} = 4.0$  и на  $\Delta M = 1.1$  при  $mb_{ISC} = 5.6$ .

В исследуемых в данной работе регионах Армении, Азербайджана и Алтая и Саян для классификации землетрясений ранее применялась шкала энергетических классов  $K_p$  Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960], которая используется до сих пор в ряде других регионов Северной Евразии, в частности, для оценки сейсмической энергии:  $\lg(E, \text{Дж}) = K_p$ . Для преемственности данных при переходе на  $ML$  в Азербайджане и Алтае-Саянском регионе, а также для исследования межрегиональной сейсмичности на Урале проведены работы по одновременному определению  $ML$  и  $K_p$ , между которыми установлены соотношения: (3) – для Урала, (4) – для Алтая и Саян и (5, 6) – для Азербайджана. В публикуемых в [Землетрясения Северной ..., 2020; 2021; 2022] каталогах Армении перевод магнитуды  $ML$  в энергетический класс  $K_p$  осуществлён согласно соотношению (2а).

Для сетей станций Армении и центров FCIAR и KOGSR такие соотношения

не установлены, и расчёт сейсмической энергии осуществлялся по формулам, полученным разными авторами [Раутиан, 1960; Касахара, 1985; Båth, 1973; 1981] для других регионов и разных типов магнитуд. Оценим связь  $K_p(ML)$ , опираясь на уравнение (3) для Урала и на соотношения типа  $ML(mb_{ISC})$  для Армении (10), FCIAR (11), KOGSR (12), Урала (13) и на осреднённое для всех регионов, кроме Алтая и Саян, уравнение (18). Решением системы уравнений с исключением  $mb_{ISC}$  получены зависимости между  $ML_{Ur}$  и  $ML_{Arm}$ ,  $ML_{FCIAR}$ ,  $ML_{KOGSR}$ ,  $ML_{av}$ :

$$ML_{Ur} = 1.16 \cdot ML_{FCIAR} - 0.54, \quad (19)$$

$$ML_{Ur} = 1.01 \cdot ML_{KOGSR} + 0.05, \quad (20)$$

$$ML_{Ur} = 0.98 \cdot ML_{Arm} - 0.06, \quad (21)$$

$$ML_{Ur} = 0.99 \cdot ML_{av} + 0.015. \quad (22)$$

Подставляя  $ML_{Ur}$  из соотношений (19)–(22) в уравнение (3), получим:

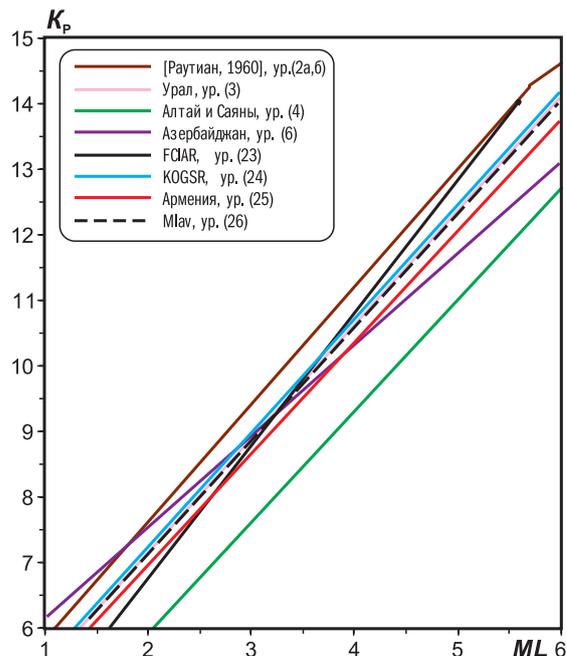
$$K_p = 2.01 \cdot ML_{FCIAR} + 2.74, \quad (23)$$

$$K_p = 1.74 \cdot ML_{KOGSR} + 3.77, \quad (24)$$

$$K_p = 1.7 \cdot ML_{Arm} + 3.58, \quad (25)$$

$$K_p = 1.72 \cdot ML_{av} + 3.71. \quad (26)$$

На рис. 5 представлены региональные соотношения (3), (4) и (5, 6) для Урала, Алтая-Саян и Азербайджана соответственно, а также установленные в данной работе уравнения связи (23)–(26) в сравнении с соотношениями Т.Г. Раутиан (2а, б). Регрессии для Урала, Арктики, Азербайджана и Армении образуют довольно компактную группу по сравнению с данными Алтая и Саян. Отклонение средней по этой группе магнитуды  $ML_{av}$  (уравнение (26)) относительно  $M$  в уравнении (2а) Т.Г. Раутиан при фиксированном  $K_p$  составляет  $\Delta M = ML_{av} - M = +0.2$  при  $ML=1$  и увеличивается до  $\Delta M = +0.4$  при  $ML=6$ , что в случае использования в этих регионах уравнения (2а) Т.Г. Раутиан, куда подставляется  $ML$  вместо  $M$ , приводит к завышению энергетического класса от  $\Delta K_p = 0.4$  при  $ML=1$  до  $\Delta K_p = 0.8$  при  $ML=6$ . Более существенное завышение значений энергии  $\lg(E, Дж) = K_p$  произойдёт для землетрясений Алтая и Саян, а также Азербайджана с  $ML > 4.5$ , если считать, что в уравнениях (2а, б)  $M = ML_{Alt}$  или  $M = ML_{Az}$ . Исходя из этого, при формировании унифицированных по магнитуде каталогов применение региональных соотношений между  $ML$  и  $K_p$ , если они известны, является предпочтительным по сравнению с уравнениями (2а, б).



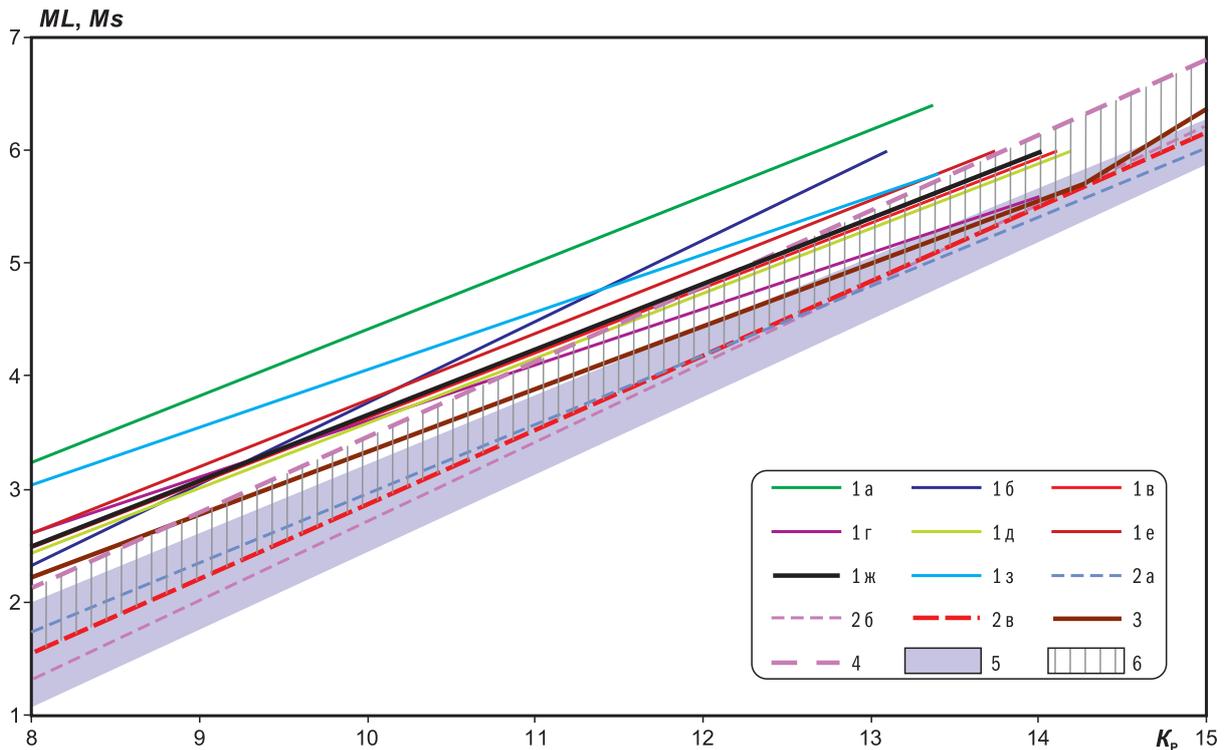
**Рис. 5.** Региональные уравнения связи между магнитудой  $ML$  и логарифмом сейсмической энергии  $\lg E = K_p$  для Азербайджана [Етирмишли и др., 2018], Урала [Верхоланцев и др., 2022], Алтая и Саян [Еманов и др., 2018], а также установленные в данной работе соотношения для Арктики (FCIAR и KOGSR) и Армении, в сопоставлении с соотношениями (2а, б) по [Раутиан, 1960]

### Обсуждение результатов

В проведённом исследовании установлено, что локальные магнитуды в широком магнитудном диапазоне не соответствуют  $M$  в известном уравнении Т.Г. Раутиан  $K_p = \lg E = 1.8 \cdot M + 4$ , часто используемом при составлении сводных каталогов, унифицированных по магнитуде [Новый каталог ..., 1977; Kondorskaya, Ulomov, 2023; Землетрясения России ..., 2020; 2021; Маловичко и др., 2021; 2022]. Для проверки гипотезы, что  $M = Ms$ , сравним это уравнение с регрессиями типа  $K_p = f(Ms_{ISC})$  из работ [Rautian et al., 2007] и [Петрова, Михайлова, 2014], полученными для разных регионов Северной Евразии.

На рис. 6 совместно с уравнениями Т.Г. Раутиан (2а, б) приведены уравнения связи  $ML(K_p)$  и  $Ms(K_p)$ , полученные обратным преобразованием зависимостей  $K_p(ML)$  и  $K_p(Ms)$ . Оно возможно, т.к. исходные уравнения установлены методом ортогональной регрессии.

В работе [Rautian et al., 2007] приведены коэффициенты соотношений между  $K_p$  и  $Ms_{ISC}$  землетрясений за период 1970–1997 гг. для разных регионов Северной Евразии, а также



**Рис. 6.** Линии ортогональной регрессии между магнитудами  $ML$ ,  $M_{s_{ISC}}$  (на рисунке нижний индекс «ISC» опущен) и энергетическим классом  $K_p$  для регионов Северной Евразии в сопоставлении с известными соотношениями Т.Г. Раутиан [Rautian, 1960], Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956] и Х. Канамори с соавторами [Kanamori et al., 1993].

1 – региональные регрессии типа  $ML(K_p)$ : 1а – Алтай и Саяны, уравнение (4) [Еманов и др., 2018]; 1б – Азербайджан, уравнение (6) [Етирмишли и др., 2018]; 1в – Урал, уравнение (3) [Верхоланцев и др., 2022]; 1г – Арктика (FCIAR), уравнение (23); 1д – Арктика и Балтийский щит (KOGSR), уравнение (24); 1е – Армения, уравнение (25); 1ж – осредненная зависимость (26); 1з – Южная Калифорния,  $ML(\lg E)$ , уравнение (30) [Kanamori et al., 1993]; 2 – региональные и осреднённые зависимости  $M_s(K_p)$ : 2а – осреднённая для регионов Северной Евразии, уравнение (27 б); 2б – то же по [Rautian et al., 2007], уравнение (27а); 2в – уравнение (28), усредняющее уравнения (27а) и (27б); 3 – уравнения (2а б) [Rautian, 1960]; 4 – уравнение (29) Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956]; 5 – область уравнений связи  $M_s(K_p)$  для регионов Центральной Азии, Казахстана, Таджикистана, Алтая и Саян, Северо-Востока России, Копетдага, Кавказа, Прибайкалья и Забайкалья и Якутии из работы [Петрова, Михайлова, 2014]; 6 – область между уравнением (29) Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956] (пунктирная линия 4) и уравнением (28) (пунктирная линия 2в)

осреднённое уравнение связи, показанное на рис. 6:

$$M_{s_{ISC}} = 0.702 \cdot K_p - 4.31. \quad (27a)$$

Как отмечается в работе [Rautian et al., 2007], исходные данные для установления этого соотношения находились в диапазоне классов  $9 \leq K_p \leq 14$ , однако на соответствующем графике, приведённом в этой же работе, эта зависимость экстраполирована в область  $8 \leq K_p \leq 16$ . На рис. 6 зависимости  $M_s(K_p)$  показаны в этом же диапазоне.

Подобные соотношения для регионов Центральной Азии, Казахстана, Таджикистана, Алтая и Саян, Северо-Востока РФ, Копетда-

га, Кавказа, Прибайкалья и Забайкалья, Якутии установлены по данным за 1992–2007 гг. в диапазоне классов  $9 \leq K_p \leq 15$  и приведены в работе [Петрова, Михайлова, 2014]. На рис. 6 показана область этих соотношений и установленное нами по исходным данным этой работы среднее уравнение связи:

$$M_{s_{ISC}} = 0.612(\pm 0.036) K_p - 3.16(\pm 0.137), \\ r = 0.65, N = 1475. \quad (27б)$$

Уравнения (27а) и (27б) в целом близки по уровню, хотя и отличаются по наклону. Осреднив коэффициенты  $a$  и  $b$  этих уравнений, получим:

$$M_{s_{ISC}} = 0.66 \cdot K_p - 3.74. \quad (28)$$

Для сравнения на рис. 6 показана эта регрессия, а также преобразованные в зависимости типа  $M=f(\lg E)$  известные соотношения Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956]:

$$\lg E = 1.5 \cdot Ms + 4.8 \quad (29)$$

и Х. Канамори с соавторами [Kanamori et al., 1993]:

$$\lg E = 1.96 \cdot ML + 2.05. \quad (30)$$

В уравнениях (29)–(30) энергия приведена в Джоулях; в уравнении (29) магнитуда  $Ms$  соответствует  $Ms_{20}$  по классификации IASPEI [Bormann et al., 2013], определяемой с замерами амплитуд поверхностных волн на периодах 18–22 с; соотношение (30) установлено для Южной Калифорнии.

Согласно рис. 6, все зависимости типа  $ML=f(K_p)$  лежат выше уравнений (2а, б) Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960], причём магнитуды  $ML$  в регрессиях по данным KOGSR, FCIAR, Армении, Азербайджана и Урала в показанном на рисунке диапазоне классов превышают  $M$  в уравнении (2а, б) в среднем на 0.3–0.4 единицы  $M$ , что соответствует разнице энергетических классов  $\Delta K_p = 0.5–0.8$  единиц  $K_p$  (рис. 5). Гораздо большее превышение  $ML_{\text{Alt}}$  землетрясений Алтая и Саян над  $M$  отчасти можно объяснить использованием для расчёта  $ML_{\text{Alt}}$  калибровочной кривой для Южной Калифорнии, с применением которой получено и показанное на рис. 6 уравнение (30) [Kanamori et al., 1993].

Региональные уравнения связи типа  $Ms_{\text{ISC}}=f(K_p)$  и осредняющие их зависимости лежат, наоборот, ниже преобразованных в  $M=f(K_p)$  уравнений (2а, б) Т.Г. Раутиан (рис. 6), которые ограничивают область их расположения сверху. Максимальное соответствие  $Ms_{\text{ISC}}$  магнитуде  $M$  в уравнениях (2а, б) наблюдается для сравнительно сильных землетрясений с  $K_p = 13 \div 15$ , тогда как для слабых событий (с  $K_p < 11$ )  $M$  ближе к локальным магнитудам  $ML$ . Таким образом, фактически  $M$  в уравнениях (2а, б) – условная магнитуда, с помощью которой осуществляется переход от магнитуд слабых землетрясений, классифицированных в  $ML$ , к  $Ms$  сильным.

Это согласуется с выводами П. Бормана [Bormann et al., 2013] при описании российских энергетических классов (“The Russian K-class system”) о том, что  $M$  в выражении (2а), в зависимости от расстояния и размера события, может относиться либо к  $ML$  слабым и умеренным землетрясениям вплоть до  $ML=6$ , либо к  $mb$  (~4.0–5.5), либо к  $Ms$  (~6.0–8.5).

Обращает на себя внимание несоответствие показанной на рис. 6 зависимости  $Ms(\lg E)$ , пре-

образованной из уравнения (29) Гутенберга-Рихтера, зависимостям  $Ms(K_p)$  для Северной Евразии из работ [Rautian et al., 2007; Петрова, Михайлова, 2014], основанным на экспериментальных данных, если считать, что  $K_p = \lg E$ . Большую разницу в магнитудах (заштрихованная область на рис. 6), составляющую  $\Delta M = 0.55$  и соответствующую завышению энергетического класса на  $\Delta \lg E = K_p - \lg E \approx 0.9$  относительно  $\lg E$  в уравнении (29), нельзя объяснить тем, что в уравнении (28) используется магнитуда  $Ms_{\text{ISC}}$ , полученная в широком диапазоне периодов ( $Ms_{\text{BB}}$  в рекомендациях IASPEI [Bormann et al., 2013]), тогда как в уравнении (29) –  $Ms_{20}$ . В работах [Lienkaemper, 1984; Bormann et al., 2009] показано, что эти магнитуды примерно равны. Значит, дело в разнице между  $K_p$  и  $\lg E$ , которая составляет, как сказано выше,  $\Delta \lg E = 0.83$ . Действительно, как отмечали П. Борман и др. [Bormann et al., 2013], сейсмическая энергия, рассчитанная как  $\lg(E, \text{Дж}) = K_p$ , завышена относительно её «западных» аналогов, реализованных, в частности, в соотношении (29).

### Заключение

Для землетрясений Арктики (центры KOGSR и FCIAR) Урала, Алтая и Саян, Азербайджана, Армении и методом ортогональной регрессии получены региональные соотношения  $ML=f(mb_{\text{ISC}})$ , а также общая зависимость  $ML_{\text{av}} = 1.06 \cdot mb_{\text{ISC}} - 0.34$  для всех регионов, кроме Алтая и Саян, где обнаружено существенное завышение  $ML$  относительно других центров.

Сопоставление установленных соотношений  $ML(K_p)$  с известным соотношением Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960],  $K_p = \lg E = 1.8 \cdot M + 4$ , показало превышение  $ML$  землетрясений группы, включающей сейсмические сети Урала, Азербайджана, Армении и центров FCIAR, KOGSR над значениями  $M$  в этой формуле в среднем на  $\Delta M \approx 0.2 \div 0.4$  единиц  $M$  в диапазоне  $1.0 \leq ML \leq 6.0$ . Для землетрясений Алтая и Саян завышение локальных магнитуд относительно  $M$  гораздо больше и учтено в региональном соотношении  $K_p = f(ML)$ .

Магнитуды  $M$  в уравнении  $K_p = 1.8 \cdot M + 4$  для слабых и умеренных землетрясений ( $K_p \approx 11$ ) близки к  $ML$  всех исследуемых регионов, кроме Алтая и Саян, а для более сильных ( $K_p \approx 13$ ) – к  $Ms$ . Таким образом, с помощью уравнения  $K_p = 1.8 \cdot M + 4$  осуществляется переход от слабых землетрясений, классифицированных в  $ML$ , к сильным с классификацией в  $Ms$ .

Показано, что логарифм сейсмической энергии в известном соотношении Гутенберга-Рихтера  $\lg E = 1.5 \cdot Ms + 4.8$  (29) ниже, чем энергетический

класс  $K_p$  по шкале Т.Г. Раутиан в региональных уравнениях связи  $K_p(M_s)$ , установленных экспериментально для Северной Евразии, в среднем на  $\Delta \lg E = K_p - \lg E = 0.83$ . Это необходимо учитывать при расчёте суммарной выделенной в регионах сейсмической энергии – если для сильных землетрясений расчёт сейсмической энергии производится из  $M_s$  по формуле (29) Гутенберга-Рихтера, простое суммирование энергии более слабых событий, определяемой как  $\lg E = 10K_p$ , недопустимо.

Полученные в данной работе результаты важны для создания однородных по магнитуде каталогов землетрясений Северной Евразии и решения на качественно новом уровне актуальных задач сейсмологии.

**Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075–01271–23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).**

## Литература

- Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г. – EDN: IOVUE
- Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. – М.: Наука и образование, 2012. – 176 с.
- Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 222–234. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20. – EDN: CFBNRE
- Габсатарова И.П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы*. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 49–53. – EDN: TPRIJQZ
- Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г.,  $m_b=5.4$  (Урал) // *Российский сейсмологический журнал*. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 7–20. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.01. – EDN: CDITJV
- Дягилев Р.А. Шкала  $M_L$  для Среднего Урала // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко*. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 118–122. – EDN: UIONIB
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Шевкунова Е.В. Алтай и Саяны // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2018. – Вып. 21 (2012 г.). – С. 132–142. – EDN: VMUFY
- Етирмишли Г.Д., Абдуллаева Р.Р., Аллахвердиева З.Г., Асадов Т.Б. Количественные соотношения между различными типами магнитуд землетрясений Азербайджана // *Землетрясения Северной Евразии*, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 480–487. – EDN: UDUCGD
- Етирмишли Г.Д., Абдуллаева Р.Р., Исмаилова С.С., Казымова С.Э. Азербайджан // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2018. – Вып. 21 (2012 г.). – С. 59–66. – EDN: NILAOE
- Етирмишли Г.Д., Абдуллаева Р.Р., Исмаилова С.С., Казымова С.Э. Сейсмичность Азербайджана и прилегающих территорий в 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 56–65. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.04. – EDN: PRKEPU
- Землетрясения России в 2018 году*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – 212 с. – EDN: CFTDON
- Землетрясения России в 2019 году*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – 214 с. – EDN: BWNCDA
- Землетрясения Северной Евразии, 2009 год*. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – 394 с. – EDN: WEEIHJ
- Землетрясения Северной Евразии, 2010 год*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – 440 с. – EDN: XSXFFP
- Землетрясения Северной Евразии, 2011 год*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – 540 с. – EDN: YJDSKA
- Землетрясения Северной Евразии*. – 2018. – Вып. 21 (2012 г.). – 492 с.
- Землетрясения Северной Евразии*. – 2019. – Вып. 22 (2013 г.). – 516 с.
- Землетрясения Северной Евразии*. – 2020. – Вып. 23 (2014 г.). – 402 с.
- Землетрясения Северной Евразии*. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – 376 с.
- Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – 392 с. – DOI: 10.35540/1818-6254
- Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – С. 25.
- Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Михайлова Р.С., Левина В.И., Старовойт О.Е., Курова А.Д. Сейсмичность Северной Евразии в 2015 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 10–30. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.01. – EDN: SRXTLZ
- Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Левина В.И., Михайлова Р.С., Курова А.Д. Сейсмичность Северной Евразии в 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.).

- С. 10–34. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.01. – EDN: PFTCUQ
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г.* / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
- Петрова Н.В., Михайлова Р.С.* Соотношения энергетического класса  $K_p$  с магнитудами по поверхностным волнам  $M_s$ ,  $M_S$ ,  $MLH$  землетрясений в регионах Северной Евразии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 365–369. – EDN: SWDSPN
- Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
- Рихтер Ч.* Инструментальная шкала для магнитуд землетрясений // Слабые землетрясения. – М.: Иностранная литература, 1961. – С. 13–44.
- Båth M.* Earthquake magnitude – recent research and current trends // Earth-Science Reviews. – 1981. – V. 17, N 4. – P. 315–398.
- Båth M.* Introduction to seismology. – Basel, Germany: Birkhauser Verlag, 1973. – 395 p.
- Bormann P., Liu R., Xu Z., Ren K., Zhang L., Wendt S.* First application of the new IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2009. – V. 99, N 3. – P. 1868–1891. DOI: 10.1785/0120080010
- Bormann P., Wendt S., Di Giacomo D.* Seismic sources and source parameters // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2). – Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2013. – P. 1–259. – DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch3
- Gutenberg B., Richter C.* Magnitude and energy of earthquakes // Annals of Geophysics. – 1956. – V. 9, N 1. – P. 1–15.
- Hicks E.C., Kværna T., Mykkeltveit S., Schweitzer J., Ringdal F.* Travel-times and attenuation relations for regional phases in the Barents Sea Region // Pure and Applied Geophysics. – 2004. – V. 161, Is. 1. – P. 1–19. DOI: 10.1007/s00024-003-2437-6
- International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site].* – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2023. DOI: 10.31905/D808B8300
- Kanamori H., Mori J., Hauksson E., Heaton T.H., Hutton L.K., Jones L.M.* Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1993. – V. 83, N 2. – P. 330–346.
- Kondorskaya N.V., Ulomov V.I.* Special catalogue of earthquakes of the Northern Eurasia (SECNE) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/nordasiacat.txt> (дата обращения 2023).
- Lee W.H.K., Lahr J.C.* HYPO-71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion patting of local earthquakes // USGS Survey. Open-file report. – 1975. – P. 75–311.
- Lienkaemper J.J.* Comparison of two surface-wave magnitude scales:  $M$  of Gutenberg and Richter (1954) and  $M_s$  of «Preliminary Determination of Epicenters» // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1984. – V. 74, N 6. – P. 2357–2378.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Mikhailova Y.A., Starkov I.V.* Unification of magnitudes for modern earthquakes in the Eurasian Arctic region // Seismic Instruments. – 2022. – V. 58, N 4. – P. 389–397. DOI: 10.3103/S0747923922040077. – EDN: IAFXGA
- Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D.* Origins and methodology of the Russian energy  $K$ -class system and its relationship to magnitude scales // Seismological Research Letters. – 2007. – V. 78, N 6. – P. 579–590. DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Richter C.F.* An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1935. – V. 25, N 1. – P. 1–32.
- Summary of Magnitude Working Group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. IASPEI* [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: [http://download.iaspei.org/commissions/CSOI/Summary\\_WG\\_recommendations\\_20130327.pdf](http://download.iaspei.org/commissions/CSOI/Summary_WG_recommendations_20130327.pdf)
- Uski M.* Local magnitude relations for earthquakes recorded in Finland // Phil. Lic. Thesis in Geophysics. – Helsinki, Finland: University of Helsinki, Dept. of Geophysics, 1997.

### Сведения об авторах

**Петрова Наталия Владимировна**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. ORCID: 0000-0002-2052-1327. E-mail: npetrova@gsras.ru

**Курова Анна Дмитриевна**, мл. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: anya-moro1112@yandex.ru

## Comparison of earthquake classification systems in local magnitudes ML in some regions of Northern Eurasia

© 2023 N.V. Petrova, A.D. Kurova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received January 23, 2023

**Abstract** The ML local magnitudes of the earthquakes of Armenia, Azerbaijan, the Arctic and the Baltic Shield (KOGSR and FCIAR station networks), the Urals and Altai and Sayan were analyzed. The regional dependences of ML on the  $mb_{ISC}$  “external” magnitude are established. It is shown that the magnitudes ML of weak and moderate seismic events registered by the seismic stations of these regions, with the exception of Altai and Sayan, are close at the same  $mb_{ISC}$  both among themselves and to ML according to the NAO, HEL, DDA, TEH networks of neighboring countries. For all regions, except for Altai and Sayan, a general dependence is established in the form:  $ML_{av} = 1.06 \cdot mb_{ISC} - 0.34$ . A significant overestimation of the ML of Altai and Sayan earthquakes recorded by the regional network is found relative to other data. For the main group of data, the excess of local magnitudes  $ML = f(K_R)$  over magnitude M in the known T.G. Rautian ratio,  $K_R = \lg E = 1.8 \cdot M + 4$ , by  $\Delta M = 0.2 \div 0.4$  in the magnitude range of  $ML = 1.0 \div 6.0$  is shown. For Altai and Sayan earthquakes, the overestimation of local magnitudes is more significant and should be taken into account when calculating seismic energy using the regional ratio  $K_R = f(ML)$ . In general, magnitudes in the ratio  $K_R = 1.8 \cdot M + 4$  for weak and moderate earthquakes are closer to local magnitudes ML, and for strong events with  $K_R > 13$  ( $M_s > 5.0$ ) – to surface wave magnitudes  $M_s$ .

**Keywords** Local magnitude, surface wave magnitude, network of seismic stations, seismic energy, orthogonal regression.

**For citation** Petrova, N.V., & Kurova, A.D. (2023). [Comparison of earthquake classification systems in local magnitudes ML in some regions of Northern Eurasia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 61-76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.05>. – EDN: LTIMEJ

### References

- Akimov, A.P., & Krasilov, S.A. (2020). [WSG software package “Seismic data processing system”]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020664678. (In Russ.). EDN: IJOVUE
- Aptikaev, F.F. (2012). *Instrumental'naya shkala seismicheskoy intensivnosti* [Instrumental scale of seismic intensity]. Moscow, Russia: Science and Education Publ., 176 p. (In Russ.).
- Båth, M. (1973). *Introduction to seismology*. Basel, Germany: Birkhauser Verlag, 395 p.
- Båth, M. (1981). Earthquake magnitude – recent research and current trends. *Earth-Science Reviews*, 17(4), 315-398.
- Bormann, P., Liu, R., Xu, Z., Ren, K., Zhang, L., & Wendt, S. (2009). First application of the new IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), 1868-1891. DOI: [10.1785/0120080010](https://doi.org/10.1785/0120080010)
- Bormann, P., Wendt, S., & Di Giacomo, D. (2013). Seismic sources and source parameters. In *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1-259). Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Publ. DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch3](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3)
- Dyagilev, R.A. (2015). [ML scale for the Middle Urals]. In *Materialy X Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly “Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh”* [Proceedings of the X International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”] (pp. 118-122). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UIONIB
- Dyagilev, R.A., Verkholantsev, F.G., Varlashova, Yu.V., Shulakov, D.Yu., Gabsatarova, I.P., & Epifanskiy, A.G. (2020). [Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018,  $mb=5.4$  (Urals)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 7-20. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2020.2.01](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01). EDN: CDITJV
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Podkorytova, V.G., & Shevkunova, E.V. (2018). [Altai and Sayan mountains]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 132-142. (In Russ.). EDN: BMIUFY

- Etirmishli, G.D., Abdullaeva, R.R., Ismailova, S.S., & Kazimova, S.E. (2022). [Seismicity of Azerbaijan and adjacent territories in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016-2017), 56-65. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.04. EDN: PRKEPU
- Etirmishli, G.D., Abdullaeva, R.R., Ismailova, S.S., & Kazimova, S.E. (2018). [Azerbaijan]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 59-66. (In Russ.). EDN: NILAOE
- Etirmishli, G.D., Abdullayeva, R.R., Allahverdieva, Z.G., & Asadov, T.B. (2014). [Quantitative relations between different types of earthquake magnitudes in Azerbaijan]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2008 godu* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2008] (pp. 480-487). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UDUCGD
- Gabsatarova, I.P. (2006). [Introduction into the routine practice of divisions of the Geophysical Survey RAS of a local magnitude calculation procedure]. In *Materialy Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 49-53). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: TPPIQZ
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*, 9(1), 1-15.
- Hicks, E.C., Kværna, T., Mykkeltveit, S., Schweitzer, J., & Ringdal, F. (2004). Travel-times and attenuation relations for regional phases in the Barents Sea region. *Pure and applied geophysics*, 161(1), 1-19. DOI: 10.1007/s00024-003-2437-6
- IASPEI. (2013). Summary of Magnitude Working Group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. Available at: [http://download.iaspei.org/commissions/CSOI/Summary\\_WG\\_recommendations\\_20130327.pdf](http://download.iaspei.org/commissions/CSOI/Summary_WG_recommendations_20130327.pdf)
- International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. DOI: 10.31905/D808B830
- Kanamori, H., Mori, J.I.M., Hauksson, E., Heaton, T.H., Hutton, L.K., & Jones, L.M. (1993). Determination of earthquake energy release and ML using TERRASCOPE. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), 330-346.
- Kasakhara, K. (1985). *Mekhanika zemletryasenii* [Earthquake mechanics] (p. 25). Moscow, Russia: Mir Publ. (In Russ.).
- Kondorskaya, N.V., & Ulomov, V.I. Special catalogue of earthquakes of the Northern Eurasia (SECNE). Available at: <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/nordasiacat.txt>
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyj katalog sil'nykh zemletryasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremyon do 1975 g.* [New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
- Lee, W.H.K., & Lahr, J.C. (1972). HYPO-71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion patting of local earthquakes. *USGS Survey. Open-file report*, 75-311.
- Lienkaemper, J.J. (1984). Comparison of two surface-wave magnitude scales: M of Gutenberg and Richter (1954) and Ms of "Preliminary Determination of Epicenters". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(6), 2357-2378.
- Malovichko, A.A., Petrova, N.V., Gabsatarova, I.P., Mikhailova, R.S., Levina, V.I., Starovoi, O.E., & Kurova, A.D. (2021). [Seismicity of Northern Eurasia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 10-30. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.01. EDN: SRXTLZ
- Malovichko, A.A., Petrova, N.V., Gabsatarova, I.P., Levina, V.I., Mikhailova, R.S., & Kurova, A.D. (2022). [Seismicity of Northern Eurasia in 2016-2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016-2017), 10-34. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.01. EDN: PFTCUQ
- Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Mikhailova, Y.A., & Starkov, I.V. (2022). Unification of Magnitudes for Modern Earthquakes in the Eurasian Arctic Region. *Seismic Instruments*, 58(4), 389-397. DOI: 10.3103/S0747923922040077. EDN: IAFXGA
- Petrova, N.V., & Mikhailova, R.S. (2014). [Correlations of the energy class of the  $K_R$  with magnitudes of surface waves  $Ms$ ,  $MS$ ,  $ML$  of earthquakes in the regions of Northern Eurasia]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Devyatoj Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the 9th International Seismological School] (pp. 365-369). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: SWDSPN
- Rautian, T.G. (1960). [Energy of the Earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Trudy IFZ ANSSSR*, 9(176). [Methods of Detailed Study of the Seismicity. Proceedings of the IPE AS USSR № 9(176)] (pp. 75-114). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., Fujita, K., Mackey, K.G., & Kendall, A.D. (2007). Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6), 579-590. DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1), 1-32.

- Richter, Ch. (1961). [Instrumental scale for earthquake magnitudes]. In *Slabye zemletryaseniya* [Weak earthquakes] (pp. 13-44). Moscow, Russia: Foreign Literature Publ. (In Russ.).
- Uski, M. (1997). Local magnitude relations for earthquakes recorded in Finland. In *Phil. Lic. Thesis in Geophysics*. Helsinki, Finland: University of Helsinki, Dept. of Geophysics Publ.
- Verkholantsev, F.G., Golubeva, I.V., Dyagilev, R.A., & Zlobina, T.V. (2022). [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016-2017), 222-234. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20. EDN: CFBNRE
- Zemletriaseniia Rossii v 2018 godu* [Earthquakes in Russia, 2018]. (2020). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Rossii v 2019 godu* [Earthquakes in Russia, 2019]. (2021). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. (2018). 21(2012), 492 p. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. (2019). 22(2013), 516 p. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. (2020). 23(2014), 402 p. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. (2021). 24(2015), 376 p. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. (2022). 25(2016-2017), 392 p. (In Russ.).
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2009 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2009]. (2015). Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 394 p. (In Russ.). EDN: WEEIHJ
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2010 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2010]. (2016). Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 440 p. (In Russ.). EDN: XSXFFP
- Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2011 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011]. (2017). Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 540 p. (In Russ.). EDN: YJDSKA

#### Information about the authors

**Petrova Nataliya Vladimirovna**, PhD, Leading Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. ORCID: 0000-0002-2052-1327. E-mail: npetrova@gstras.ru

**Kurova Anna Dmitrievna**, Junior Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: anya-moro1112@yandex.ru