ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2022, № 4, с. 80–92

УДК 550.34

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВОЗМОЖНОСТЬ ВВЕДЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2022 г. А. В. Соломатин*

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

**e-mail: alf55@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.
После доработки 25.02.2022 г.
Принята к публикации 08.04.2022 г.

В настоящей работе представлена шкала энергетического класса землетрясений K^F, призванная унифицировать данные об их величинах на основе существующих шкал: M_S, M_W, mb, K_S и мн. др. Концептуальной особенностью предлагаемой шкалы является смещение акцента с традиционных в таких случаях сейсмометрических вопросов, касающихся регистрации сейсмических волн, а также вопросов их генерации и распространения, в сторону эффективного использования базовых энергетических свойств сейсмического процесса (закон Гутенберга–Рихтера). В самом общем случае предлагаемый подход позволяет существенно упростить нахождение регрессионных соотношений между различными шкалами величин землетрясений, но гораздо более перспективной является задача построения единой, обобщенной шкалы. Приведено ее частное решение – построение такой шкалы для землетрясений Камчатки. В качестве основы шкалы K^F использованы предложенный С.А. Федотовым энергетический класс $K_{S1.2}^{F68}$ (K_S – КФ ФИЦ ЕГС РАН), а также широко распространенная магнитуда mb (ISC).

Ключевые слова: шкалы магнитуд, обобщенный энергетический класс, очаг землетрясения, сейсмический процесс, закон повторяемости землетрясений, энергетический спектр, энергетический баланс

DOI: 10.31857/S0203030622040071

ВВЕДЕНИЕ

Основой определения величин землетрясений в виде магнитуд и энергетических классов, как правило, является сейсмометрический метод. Многочисленность методик оценки величины землетрясения на основе излучаемых его очагом сейсмических волн, а также сложность моделей этого процесса порождают множество магнитудных шкал. При том, что каждая из таких шкал отражает объективные характеристики величины землетрясения, их сопоставление, унификация и обобщение – крайне сложная, не решенная до сих пор проблема. Основные направления ее решения заключаются, с одной стороны, в развитии сейсмометрических методов в предположении, что в конечном итоге их возможности позволят построить эталонную для всех других магнитудную шкалу M, а с другой – в нахождении адекватной регрессионной модели, связывающей многочисленные имеющиеся шкалы.

Первое из указанных направлений можно условно признать успешным, учитывая введение таких магнитуд, как M_W [Kanamori, 1977] и M_E [Choy, Boatwright, 1995].

Второе направление до сих пор остается тупиковым, что связано, прежде всего, с нелинейностью большинства магнитудных шкал, накладывающейся на ограниченность данных в верхней и в нижней частях диапазонов их значений.

Распространенный на практике подход к решению проблемы обобщения магнитудных шкал предлагается, в частности, в результатах интерактивных выборок на основе каталога NEIC (National Earthquake Information Center)[1] US GS. В них в качестве значения магнитуды M последовательно с ростом величин землетрясений предлагаются магнитуды mb, M_S, M_W, или ряд других, менее распространенных. Несмотря на практическое удобство такого подхода нельзя не признать то, что он неоправданно, за исключением решения ряда простых задач, упрощен и в значительной мере субъективен.

[1] https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

Более обоснованный подход предложен в работе [Гусев, Мельникова, 1990], где для унификации шкал величин землетрясений эти шкалы сопоставляются с эталонной магнитудой M_W. Признавая перспективность такого подхода, необходимо отметить, что сопоставление с магнитудой M_W неприменимо для существенного объема сейсмологического материала как в настоящее время, так и в будущем.

Кроме указанных подходов, на практике предлагается множество регрессионных соотношений между шкалами величин землетрясений. Фактически это основной подход обобщения магнитудных шкал. Однако из-за существенной несогласованности таких соотношений вряд ли можно говорить об обобщении магнитудных шкал на их основе.

Для того чтобы прояснить реальные перспективы обобщения имеющихся сейсмометрических данных о величинах землетрясений, необходимо обратиться к физическому смыслу магнитуд M_W и M_E, имеющих основание считаться в настоящее время эталонными магнитудными шкалами.

В работе [Di Giacomo et al., 2008] отмечено, что магнитуды M_E и M_W дополняют друг друга, отражая принципиально разные характеристики землетрясения, а именно: оценку энергии его излучения и оценку энергии, сброшенной в результате сейсмической подвижки. Если первая из этих магнитуд основана на продолжении традиций сейсмометрического подхода при максимальном развитии возможностей регистрации сейсмических волн, то вторая, опираясь на те же возможности, соотносится уже со свойствами сейсмического процесса.

Сравнивая оба типа оценок величин землетрясений, условно можно говорить об “эффективности сейсмического излучения”. Но, учитывая, что такая эффективность не является постоянной относительно целого ряда факторов, вполне естественно определить эти две магнитуды в качестве важнейших представителей двух разных по физическому смыслу типов магнитудных шкал.

Обобщая вышесказанное, можно отметить:

– до настоящего времени не было представлено эффективной методики, позволяющей определить и практически использовать унифицированное по отношению к многочисленным магнитудным шкалам представление о “величине землетрясения”, хотя решение такой проблемы является крайне актуальным при существующем широком доступе к сейсмологической информации;

– развитие сейсмометрии, а также теоретических исследований в области генерации и распространения сейсмических волн позволило наметить два разных направления в определении обобщенной величины землетрясения M: на основе энергии сейсмического излучения его очага – E[nergy], и на основе энергетического вклада этого землетрясения в сейсмотектонический процесс – W[ork];

– для широкого класса задач именно величина вклада отдельных сейсмических событий в общий сейсмотектонический процесс является наиболее прямой и естественной оценкой их величин.

Первый тип обобщенных магнитуд (условно – M_E), как и многочисленные сейсмометрические аспекты построения шкал величин землетрясений, в настоящей работе не рассматриваются. Основой настоящей работы являются базовые особенности сейсмического процесса, что более характерно для магнитуд, условно представляемого в качестве типа магнитудой M_W.

В самом общем виде предлагаемую шкалу K^F, условно считая ее наиболее близкой к магнитуде M_W, можно определить следующим образом: она строится на основе имеющихся шкал величин землетрясений, при этом график закона повторяемости землетрясений в этой шкале максимально близок к линейному с абсолютным значением величины наклона γ равным 1/2.

Обоснование возможности построения такой шкалы в предположении ее максимальной эффективности по отношению к изучению свойств сейсмического процесса является целью настоящей работы в теоретическом плане, а ее построение для землетрясений Камчатки – в практическом.

Хотя возможность построения указанной шкалы до настоящего времени исследовалась, главным образом, на основе сейсмичности Курило-Камчатского региона [Соломатин, 2011 и др.], не представляет трудностей перенесение результатов таких исследований как в соседние, подобные по сейсмотектоническим условиям регионы, так и многие другие, в том числе на всю высокосейсмичную область окраин Тихого океана и Юго-Восточной Азии [Соломатин, 2021].

Отмечая идею введения обобщенной шкалы K^F в качестве принципиально новой, необходимо учитывать, что наиболее важный для ее построения закон, определяющий распределение величин землетрясений, – закон Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1949], фактически уже используется для оценки “линейности” существующих шкал.

1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ

Прежде всего, необходимо еще раз отметить, что величина вклада в процесс сейсмогенного разрывообразования является прямой и естественной оценкой величины сейсмического со-

бытия при решении самого широкого круга задач сейсмологии, и именно такое представление используется при построении магнитуды M_W.

Выборочное распределение величин землетрясений, как наиболее важную характеристику сейсмического процесса, традиционно определяют законом Гутенберга–Рихтера. В свою очередь, этот закон, представляющий степенное распределение, можно связать с закономерностями энергетического баланса сейсмического процесса [Соломатин, 2011; Садовский, 2004, с. 206–208]. Это положение усиливает гипотезу о сути распределения величин землетрясений в большей мере физической, чем статистической.

Следующее положение настоящего исследования заключается в существовании единого для достаточно представительных выборок землетрясений среднего наклона графика повторяемости их величин. Его обоснование заключается в следующем:

– результаты в работе [Соломатин, 2011] указывают, что баланс между энергетическими уровнями сейсмического процесса достигается при абсолютной величине γ, равной 1/2 в шкале энергетических классов K, для которых с точностью до множителя:

$$E\left(\text{энергия землетрясения}\right) = 10^K; \qquad (1)$$

– состояние баланса широкого диапазона энергетических уровней сейсмического процесса в самом первом приближении естественно принять в качестве предела долговременного среднего всех его локальных состояний.

Перечисленные выше положения вполне достаточны для построения обобщенного энергетического класса K^F на основе элементарного по реализации алгоритма: магнитудные определения величин землетрясений заменяются их ранговыми значениями и нормируются в соответствии с “идеализированным” законом повторяемости. Такое построение было выполнено в работе [Соломатин, 2021]. Несмотря на эффективность в ряде задач, такой подход вследствие безусловного приоритета в нем закона Гутенберга-Рихтера недостаточно удобен и обоснован при построении обобщенных шкал землетрясений.

Для построения более обоснованной шкалы обобщенного энергетического класса K^F необходимы как дополнительное рассмотрение свойств сейсмического процесса, так и разработка более совершенной методики построения регрессионных соотношений в качестве основного инструмента согласования магнитудных шкал.

О связи закона Гутенберга–Рихтера и условных деформаций Беньофа

Важным в рамках настоящего исследования является представление об условных деформациях (“elastic strain rebound increments” [Benioff, 1951]):

$$S = 10^{K/2}, \qquad (2)$$

где K, как и в выражении (1), – энергетический класс землетрясений.

Как правило, применяют суммирование временных последовательностей этого параметра, получая достаточно линейный по отдельным временным интервалам ход суммы $S_\Sigma = \Sigma S_i$ – график Беньофа. Здесь индекс i определяет последовательность в соответствии с временными отсчетами t_i сейсмических событий с величинами S_i из некоторой сейсмоактивной области.

Можно рассмотреть параметр S и с другой стороны. При наклоне графика повторяемости в законе Гутенберга–Рихтера $\gamma = 1/2$ (в шкале энергетических классов K), величины S распределены согласно степенному закону с показателем степени 1 (закон Зипфа – Zipf’s law). Такое распределение характерно для широкого спектра природных явлений, поэтому естественно предположить его применимость и к величинам S. Это существенный аргумент, чтобы считать условные деформации, наряду с сейсмической энергией, важной характеристикой сейсмического процесса в его энергетическом плане.

В свою очередь, величины $1/S$, при указанных условиях, распределены равномерно в диапазоне $[1/S_{max} \approx 0;\ 1/S_{min}]$, а параметр S_{min}/S определяет вероятность $P(1/S)$ появления сейсмических событий величиной S или больших. Для того, чтобы показать практическую полезность параметра $1/S$, который будет активно использоваться далее, допустим небольшое отклонение от основной темы работы.

1. Рассмотрим возможность использования распределения $P(1/S)$ в качестве удобной альтернативы закону Гутенберга–Рихтера при мониторинге развития сейсмического процесса. Для этого построим кумулятивный параметр:

$$P_\Sigma = \Sigma(S_{min}/S_i - 1/2), \qquad (3)$$

где индекс i определяет временные отсчеты последовательных сейсмических событий.

Этот параметр отражает временные вариации энергетического спектра сейсмического процесса в его вероятностном отображении относительно среднего, характерного для вероятностей уровня – 1/2.

С другой стороны, наклон графика повторяемости землетрясений для такой же временной выборки может быть определен методом максимального правдоподобия:

$$\gamma = \lg(e) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} K_i/n - K_{\min} \right) \text{ [Aki, 1965]} \qquad (4)$$

или в близком к кумулятивному относительно величин K_i представлении:

$$1/\gamma = \left(\sum_{i=1}^{n} K_i/n - K_{\min} \right) \Big/ \lg(e), \qquad (5)$$

где K_i – энергетический класс или магнитуда землетрясений в выборке объемом n и с минимальным значением $K_{\min}$.

На основе выражения (5), отойдя от смысла наклона графика повторяемости (достаточно условного понятия при его закономерных в развитии сейсмического процесса отклонениях от линейности), можно составить также кумулятивный временной ряд:

$$K_{\Sigma} = -\Sigma(K_i - K_{med}), \qquad (6)$$

который, подобно выражению (3), но в логарифмическом масштабе, отражает вариации энергетического спектра сейсмического процесса.

2. Рассматривая не слишком большие и компактные выборки землетрясений, можно предположить, что относительно высокий наклон графика повторяемости для них в большей мере соответствует локальному перераспределению напряжений, а относительно низкий – существенным сейсмическим подвижкам. По сути, этот же вывод следует из смысла графика условных деформаций Беньофа, однако отражение подобного явления в поле величин $S_{\min}/S$, фактически эквивалентных вероятностям, дополненное возможностью фильтрации на основе некоторой энтропийной или другой подобной функции, более удобно и универсально.

Подводя итог краткого рассмотрения важных качеств параметра $1/S$ – обратной величины условной деформации по Беньофу, необходимо выделить главное его качество – близкое к равномерному распределение значений.

Предлагаемая методика построения системы межмагнитудных регрессионных соотношений

Рассмотрим методику построения системы обобщения соотношений, связывающих различные магнитудные шкалы, более удобную, чем система межмагнитудных регрессий.

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты определения регрессионного отношения $K_S(Mc)$ для Камчатского региона на основе данных каталога[2] Камчатского Филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН в зоне его ответственности за период 1.I.1999–22.XI.2021 гг. и в диапазоне глубин $H = 0$–80 км. Здесь $K_S = K_{S1.2}^{F68}$ (далее – K) – энергетический класс камчатских землетрясений [Федотов, 1972], а Mc – магнитуда по кода-волнам [Лемзиков, Гусев, 1989].

Здесь же приведены данные для зависимости $K(Mc)$ на основе модифицированной методики построения регрессии с учетом ранговых соотношений [Кукинов, 1985]. Такая методика в случае монотонных соотношений подразумевает разрыв исходных пар данных (в данном случае – пар значений K и Mc) и составление новых пар значений, уже отдельно упорядоченных по рангам. При этом для возрастающих зависимостей минимальному значению K ставится в соответствие минимальное значение Mc и т.д.

Полученные результаты (см. рис. 1) указывают на следующее:

– для нахождения оптимального соотношения $K(Mc)$ необходимо использование ортогональной регрессии, что для нелинейных зависимостей, часто используемых в подобных случаях, является нетривиальной задачей;

– полнота данных при подобных, чисто регрессионных построениях обеспечивается для относительно малого числа пар точек, вследствие этого регрессионный анализ зависимости $K(Mc)$ сильно затруднен.

С другой стороны, предварительное использование рангового переупорядочения значений параметров фактически обеспечивает ортогональность регрессии и существенно повышает устойчивость решения даже в областях за пределами полноты данных. В частности, минимальный разброс полученных данных позволяет отметить значимое в представленном случае изменение наклона линии регрессии при $K \approx 12$ (см. рис. 1а).

Факт адекватного регрессионного представления монотонной зависимости раздельно упорядоченными парами, по сравнению с исходными, аналитически доказан в общем случае в работе [Кукинов, 1985]. В случае же сейсмических данных этот факт достаточно нагляден: он определяется подобием форм графиков повторяемости в двух шкалах (см. рис. 1б). Особенно важно, что эта схема при достаточно общих условиях может быть применима и при отсутствии перекрытия используемых каталогов магнитуд и энергетических классов.

Для распространения предложенной модифицированной методики на случай множества магнитуд вполне естественным выглядит представление о единой опорной шкале, в которой для величин землетрясений в максимальной степени

[2] http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php

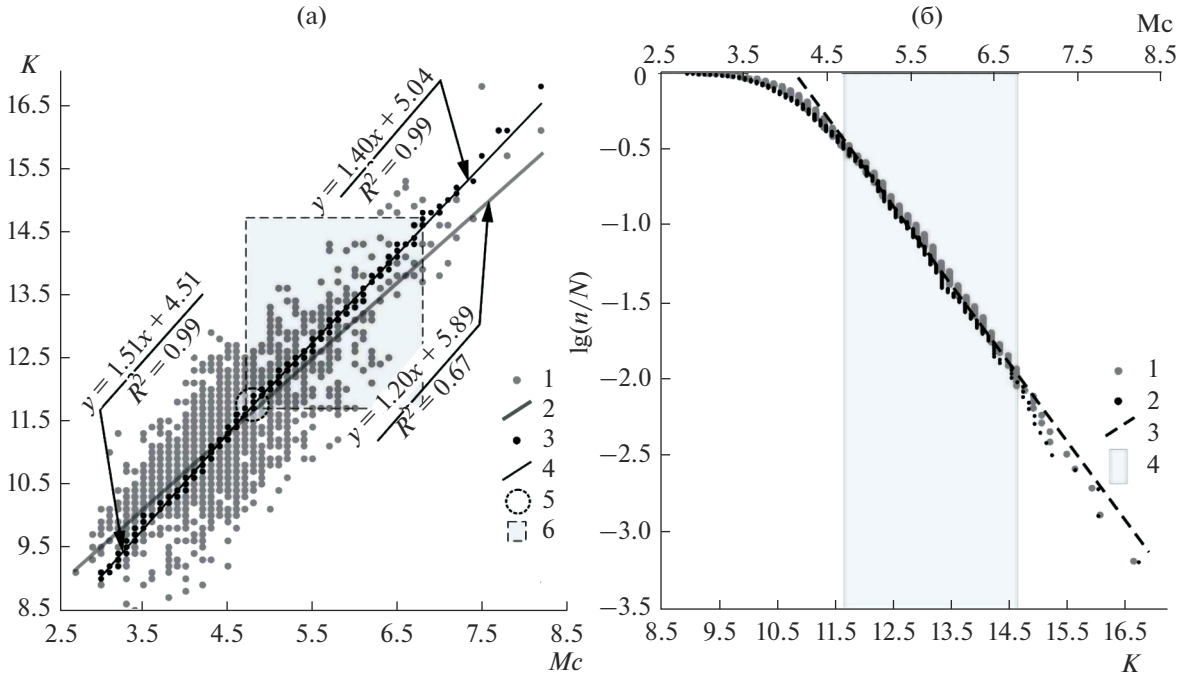

Рис. 1. Стандартная и модифицированная методики определения регрессионной зависимости энергетического класса *K* от магнитуды *Mc* (а) и графики зависимостей, представляющих закон Гутенберга–Рихтера для величин землетрясений в шкалах *K* и *Mc* (б).
а – 1, 2 – зависимость *K*(*Mc*) и ее линейная аппроксимация, 3–5 – та же зависимость на основе модифицированной методики, двухсегментная аппроксимация этой зависимости и область границы сегментов, 6 – область линейности графиков в шкалах *K* и *Mc*; б – 1, 2 – графики для параметров *K*, *Mc*, 3 – их линейная аппроксимация, 4 – условная область линейности закона повторяемости для параметров *K*, *Mc*.

выполняется закон Гутенберга–Рихтера с фиксированным параметром γ. В роли этой шкалы и предлагается использовать обобщенный энергетический класс K^F: $K^F(K)$, $K^F(mb)$, $K^F(M_W)$, $K^F(M_S)$ и т.д.

Фактически предлагаемый подход продолжает основную идею работы [Гусев, Мельникова, 1990], но уже на ином, в теоретическом и практическом планах, уровне.

Значения величин землетрясений, определенные на основе разных шкал K^F, не должны в общем случае совпадать численно. Они могут различаться также систематически, указывая на отклонения условий образования сейсмогенных разрывов, а также свойств среды распространения сейсмических волн. Но в целом шкала K^F призвана максимально сблизить, обобщить все магнитудные шкалы в предельном – усредненном случае. Более того она, согласно [Соломатин, 2011], имеет реальный физический смысл, отражая при $\gamma = 1/2$ состояние строгого энергетического баланса различных уровней сейсмического процесса. Здесь необходимо заметить, что строящаяся энергетическая шкала K^F, в отличие от аналога в работе [Соломатин, 2021], не обязательно линейна в области наибольших событий. Гипотеза о строгой линейности не обоснована, а выяснение границ линейности – такая же серьезная проблема, как и в случае магнитуды M_W.

2. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА K^F

Выбор данных для исследования

Для построения энергетического класса K^F была выбрана зона ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, охватывающая в основной массе регистрируемых сейсмических событий район восточного побережья Камчатки. Выбранный временной период: 01.01.2000–22.10.2021 гг. не включает афтершоковый процесс Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. – последнего сильнейшего землетрясения в указанном районе. В то же время он достаточен (с учетом размеров исследуемого района) для того, чтобы считать соответствующую ему выборку сейсмических событий представитель-

ной. Диапазон глубин выборки H = 20–60 км включает наиболее активную часть сейсмогенной зоны, а диапазон энергетических классов $K \geq 9.0$ обеспечивает полноту данных. На основе этих критериев было отобрано на базе регионального каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН 8221 событие.

Эти же пространственно-временные параметры были использованы далее для выбора землетрясений по типам магнитуд mb, M_S и M_W на основе каталога[3] ISC (International Seismological Centre). Нижние границы использованных величин указанных магнитуд выбирались в соответствии с полнотой соответствующих данных. Количество событий в полученных выборках: 1629 – для магнитуды mb, 153 – для M_S, 192 – для M_W.

Нахождение линейной части модели пересчета магнитуд в обобщенный энергетический класс. Построение промежуточной шкалы K'

Прежде всего, важно отметить, что округленные данные о магнитудах и энергетических классах землетрясений, представленные каталогами, были предварительно линейно сглажены. Сглаживание применялось к их вариационным рядам, и такая процедура позволила существенно улучшить представление результатов.

На первом этапе построения в качестве базового критерия использовалась отмеченная выше равномерность распределения величин S_{min}/S, где значения S определялись в соответствии с выражением (2) на основе первого приближения шкалы K^F – энергетического класса K', полученного, в свою очередь, линейным преобразованием:

$$K'(K) = a(K - 10.0) + 10.0, \quad (7)$$

где a – масштабный коэффициент, позволяющий привести распределение величин S_{min}/S к равномерному, а константа b = 10.0 предназначена для сохранения в новой шкале величин сейсмической активности A_{10} [Ризниченко, 1964] – важнейшего параметра, используемого при прогнозе землетрясений региона по методу ДССП [Федотов, 2005 и др.].

На рис. 2 представлены две гистограммы значений параметра S_{min}/S, где S определяется согласно выражениям (2) и (7) на основе значений K' при a = 1 и при a = 0.8824. Результаты построения показывают, что в последнем случае удается добиться равномерного распределения для параметра S_{min}/S в широком диапазоне его значений за исключением диапазона, соответствующего наибольшим энергетическим классам (минимальные значения S_{min}/S (см. рис. 2).

Важно отметить существенное возрастание амплитуд отклонений[4] от среднего уровня при $S_{min}/S \approx 0.42$ ($K' \approx 9.9$) и ниже (см. рис. 2). Наиболее значимые из таких аномалий рассматриваются в контексте настоящего исследования в качестве реперных точек, позволяющих совмещать шкалу $K' = K'(K)$ и шкалы K', полученные на основе магнитудных оценок: $K'(M_S)$, $K'(M_W)$, $K'(mb)$, а по необходимости – и других. Важно также, что указанные аномалии могут рассматриваться и в плане дискретности энергетического спектра сейсмического процесса [Садовский, 2004, с. 340–343].

Для исследования равномерного распределения значений некоторого параметра удобно использовать также дифференциальное представление его вариационного ряда:

$$\Delta x_i = (x_{i+c} - x_i)/c, \quad (8)$$

где c – шаг в пределах вариационного ряда, определяющий степень сглаживания данных.

На рис. 3 представлена зависимость построенного таким образом параметра $\Delta(S_{max}/S)$ в качестве функции от параметра K' (здесь и далее параметр $K' = K'(K)$ определен по формуле (7) при a = = 0.8824). Шаг сглаживания c при этом построении был выбран равным 1. Замена коэффициента нормировки с S_{min} на S_{max} здесь и далее позволяет исключить влияние на результат уровня ограничения снизу величин K'.

Очевидно, что распределение значений параметра $\Delta(S_{max}/S)$ близко к равномерному в диапазоне энергетических классов до $K' \approx 12$, благодаря предыдущему линейному преобразованию, но отличается от равномерного при больших значениях K'. Кроме того, данные на рис. 3 указывают на значимые аномалии в областях $K' \approx 9.9$, $K' \approx 11.2$ и $K' \approx 12$ и др.

Это построение было дополнено параметром $\Delta(S_{max}/S)$, вычисленным на основе более надежных в области сильных землетрясений магнитудных шкал M_S и M_W (рис. 4).

Шаг сглаживания c на рис. 4 и дальше был выбран равным 10 отсчетам. Для определения зна-

[3] http://www.isc.ac.uk

[4] Пилообразный ход в правой части графика может быть существенно уменьшен линейным сглаживанием не вариационного ряда энергетических классов K, а соответствующего ему вариационного ряда величин 1/S. Такой вариант более перспективен, однако в рамках настоящего исследования принципиальной разницы между этими видами сглаживания нет.

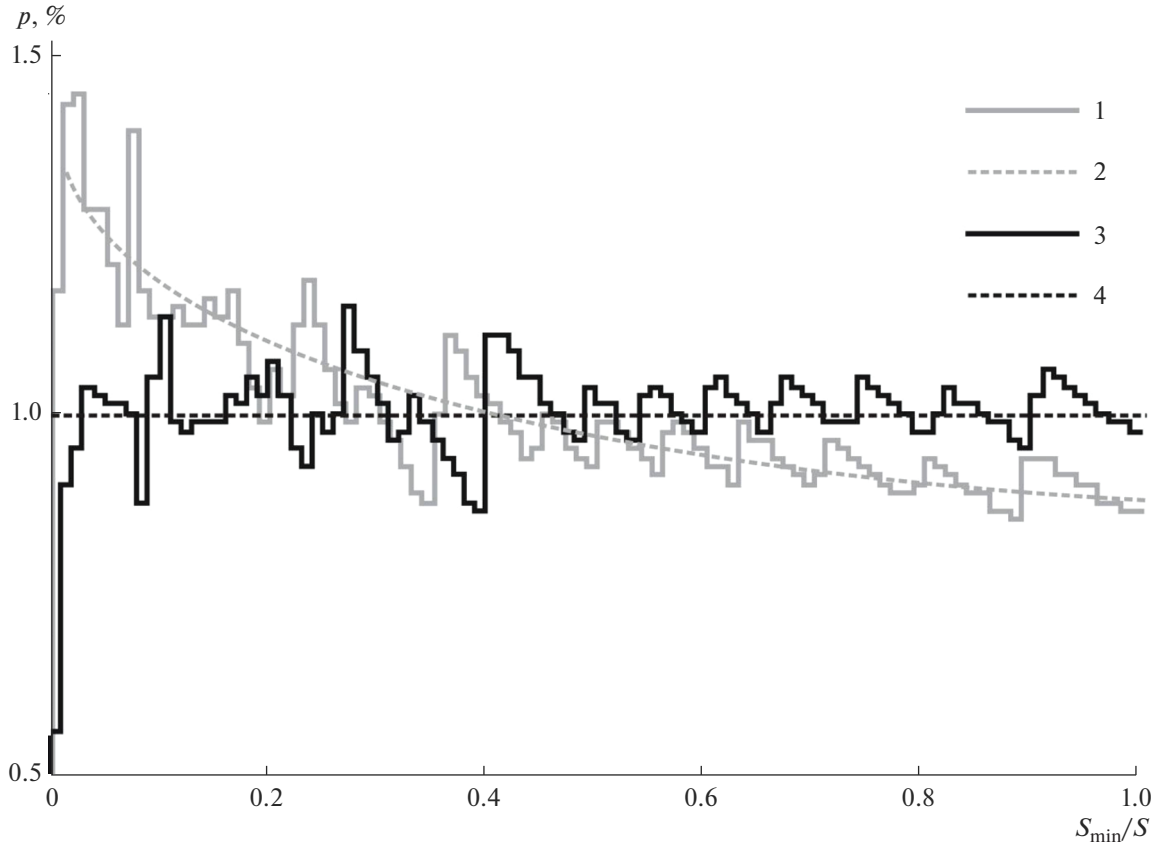

Рис. 2. Гистограммы значений параметра S_{min}/S в шкале энергетического класса $K'(K)$, рассчитанного при разных значениях масштабного коэффициента a в выражении (7).
1, 2 – гистограмма значений параметра S_{min}/S при $a = 1$ и ее криволинейная аппроксимация; 3, 4 – то же при $a = 0.8824$ и линейная аппроксимация. Левая часть гистограмм соответствует максимальным значениям параметра K', правая – минимальным.

чений K' в этом случае использовались соотношения:

$$K'(M_S) = 1.3236M_S + 5.67 \quad (9)$$

и

$$K'(M_W) = 1.3236M_W + 3.77, \quad (10)$$

где масштабный коэффициент $a = 1.3236$ ($3/2 \times \times 0.8824$) получен на основе масштабного коэффициента $a = 0.8824$ в соотношении $K'(K)$ и коэффициента 3/2 в соотношениях $K(M_S)$ [Федотов, 1972] и $K(M_W)$ (сайт US GS)[5]; аддитивные коэффициенты b выбраны для наилучшей сопоставимости аномалий при $K' = 13.3$.

Величины $\Delta(S_{max}/S_i)$ для всех трех рядов K': $K'(K)$, $K'(M_S)$ и $K'(M_W)$ приведены к нулю в наиболее субъективно значимой части диапазона K' (см. рис. 4).

[5] https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/earthquake-magnitude-energy-release-and-shaking-intensity?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

С учетом низкой точности выражений (9) и (10), обусловленной ограниченностью набора данных, основная цель этого построения – сопоставить нелинейность шкал K, M_S и M_W (на основе их линейных преобразований в шкалу K') в диапазоне наиболее сильных событий. При этом учитывается, что шкала энергетических классов K в большей степени приемлема в области более слабых сейсмических событий, а магнитудные шкалы M_S и M_W – в области более сильных.

Очевидно, что восходящий в области высоких энергетических классов тренд значений $\Delta(S_{max}/S)$, построенных в шкале $K'(K)$, подтверждается также и наиболее надежной в этом диапазоне шкалой $K'(M_W)$. В несколько худшей по качеству шкале $K'(M_S)$ этот тренд менее показателен.

На рис. 5 данные по параметру K' на основе шкал M_S и M_W заменены аналогичными данными на основе шкалы mb для той же пространственно-временной выборки. При этом считается, что хорошая представительность магнитуды mb в сред-

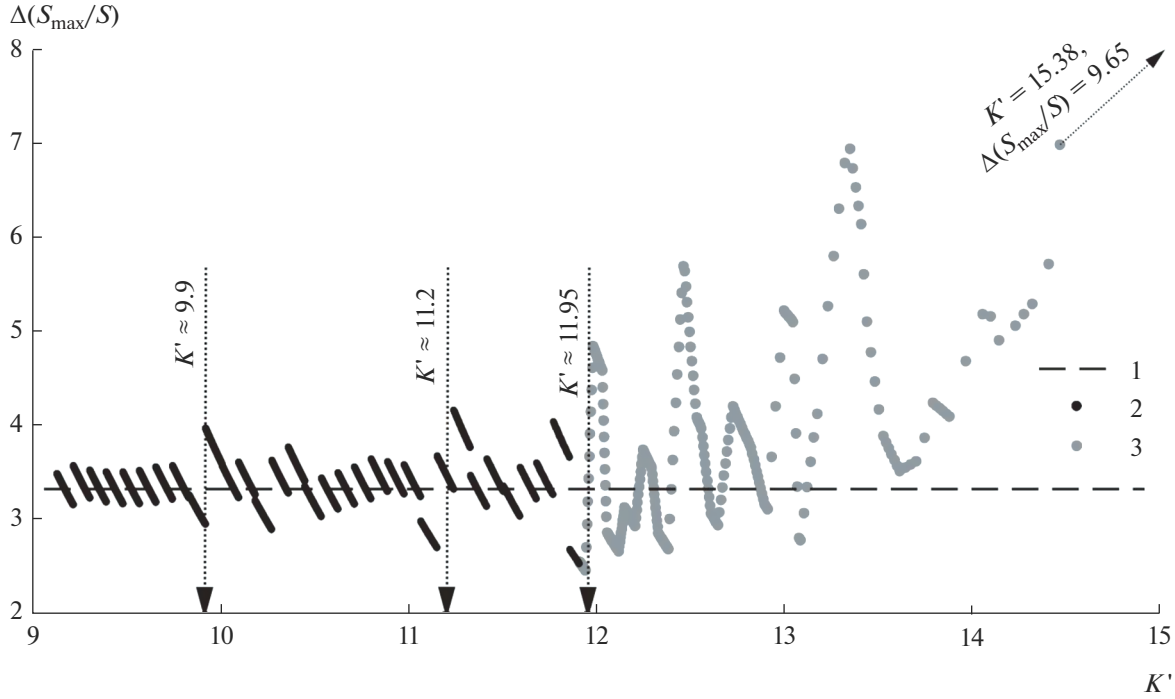

Рис. 3. Зависимость $\Delta(S_{max}/S) = f(K')$ для энергетического класса $K' = K'(K)$.
1 – оценка среднего уровня параметра $\Delta(S_{max}/S)$; 2, 3 – данные зависимости соответственно: без систематического отклонения от среднего уровня и с явным систематическим отклонением от него.

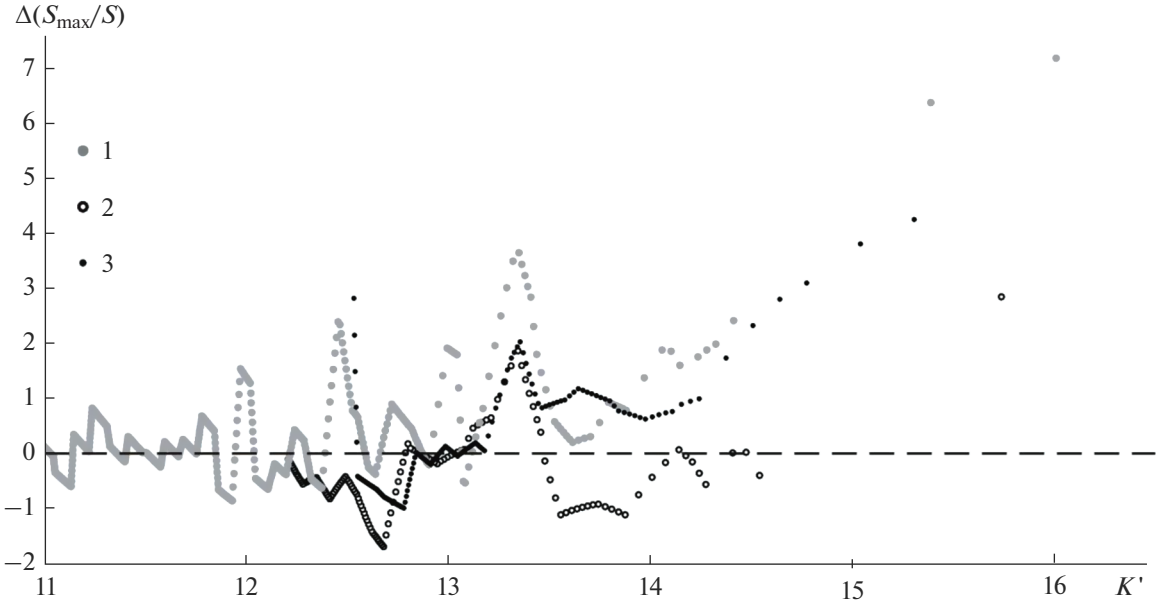

Рис. 4. Зависимость $\Delta(S_{max}/S) = f(K')$ в шкалах $K'(K)$, $K'(M_S)$ и $K'(M_W)$.
1 – зависимость в шкале $K'(K)$; 2, 3 – то же в шкалах $K'(M_S)$ и $K'(M_W)$ соответственно.

нем диапазоне величин землетрясений свяжет нижний и верхний диапазоны значений K'.

При построении использовано соотношение:

$$K'(mb) = 1.94mb + 1.93, \quad (11)$$

позволяющее за счет масштабного коэффициента $a = 1.94$ получить равномерное на основе магнитуд mb распределение $1/S$; аддитивный коэффициент $b = 1.93$ обеспечивает совмещение пиков при $K' = 13.3$.

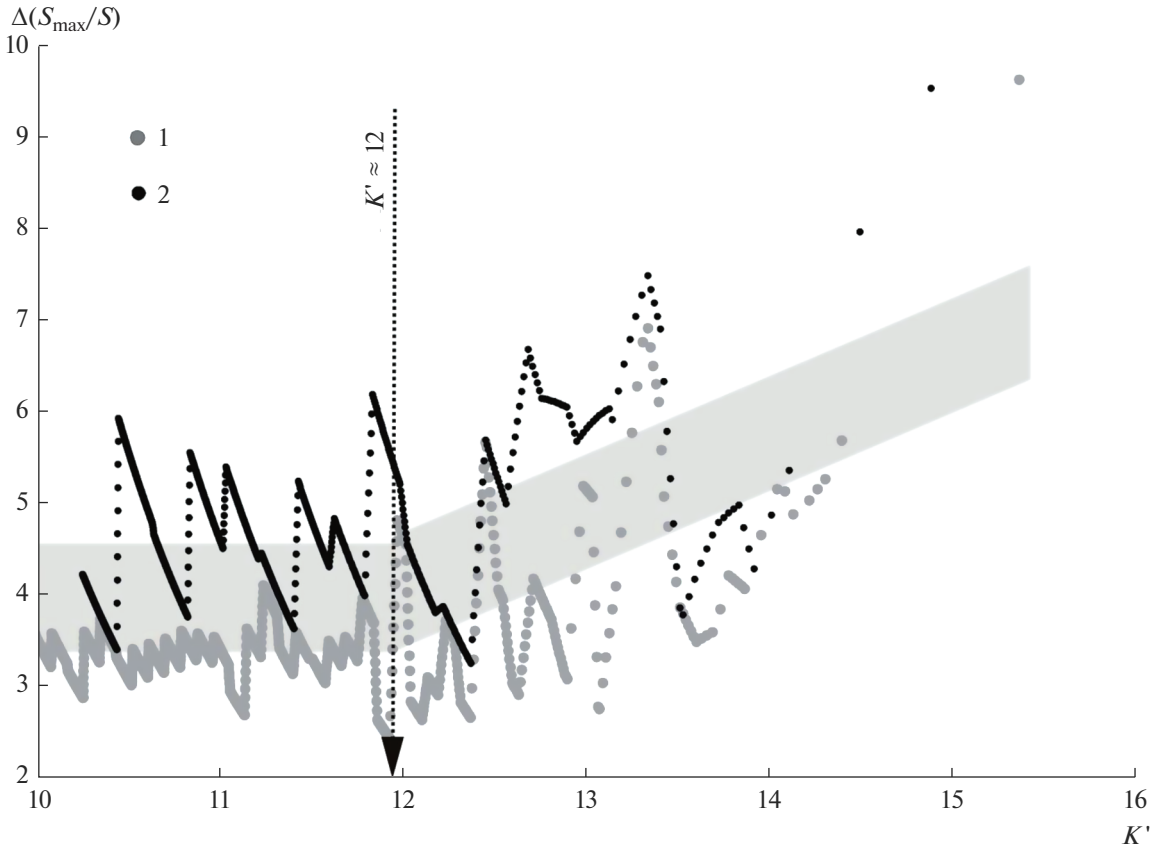

Рис. 5. Зависимость $\Delta(S_{max}/S) = f(K')$ в шкалах $K'(K)$ и $K'(mb)$.
1 – зависимость в шкале $K'(K)$; 2 – то же в шкале $K'(mb)$. Серым фоном отмечены нулевой тренд кривых в диапазоне до $K' \approx 12$ и восходящий тренд после этого значения.

Результат построений на рис. 4 и 5 показывает подобие нелинейности в области наиболее сильных событий для всех четырех шкал: $K'(K)$, $K'(mb)$, $K'(M_W)$ и $K'(M_S)$.

Нахождение нелинейной части модели пересчета магнитуд в обобщенный энергетический класс. Построение шкал $K^F(K)$ и $K^F(mb)$

Далее, как и в работе [Соломатин, 2021], используется представление об эталонном энергетическом классе K^E, строго удовлетворяющем закону Гутенберга–Рихтера с $\gamma = 1/2$. Шкала, соответствующая этим условиям, используется в качестве эталона для построения шкалы K^F и определяется следующим выражением:

$$K_i^E = -2\lg(i/n) + K'_{\min}, \qquad (12)$$

где n – объем данных выборок K или mb, при этом $K_n^E = K'_{\min}$ – минимальное значение, определяемое выборками для каждой из строящихся шкал: $K'(K)$ и $K'(mb)$.

Предполагается максимальное приближение строящейся шкалы к эталонной с учетом того, что для наибольших событий такое приближение может быть некорректным. Кроме того, в соответствии с основным направлением [Садовский, 2004, с. 166–170] предполагается некоторая зависимость эффективности сейсмического излучения от величины сейсмического события, неучтенная в магнитудных шкалах.

Для дальнейшего вводятся следующие обозначения:

S^E – условная деформация, определяемая на основе эталонной шкалы K^E;

S_0 и Δ – коэффициенты, определяющие соответствие данных выборок в шкалах $K'(K)$ и $K'(mb)$ эмпирически найденному выражению:

$$(S^E/S)^2 - 1 = S^E/S_0 - \Delta. \qquad (13)$$

Вероятный физический смысл выражения (13) – обратная зависимость эффективности излучения сейсмических волн от величины условной деформации.

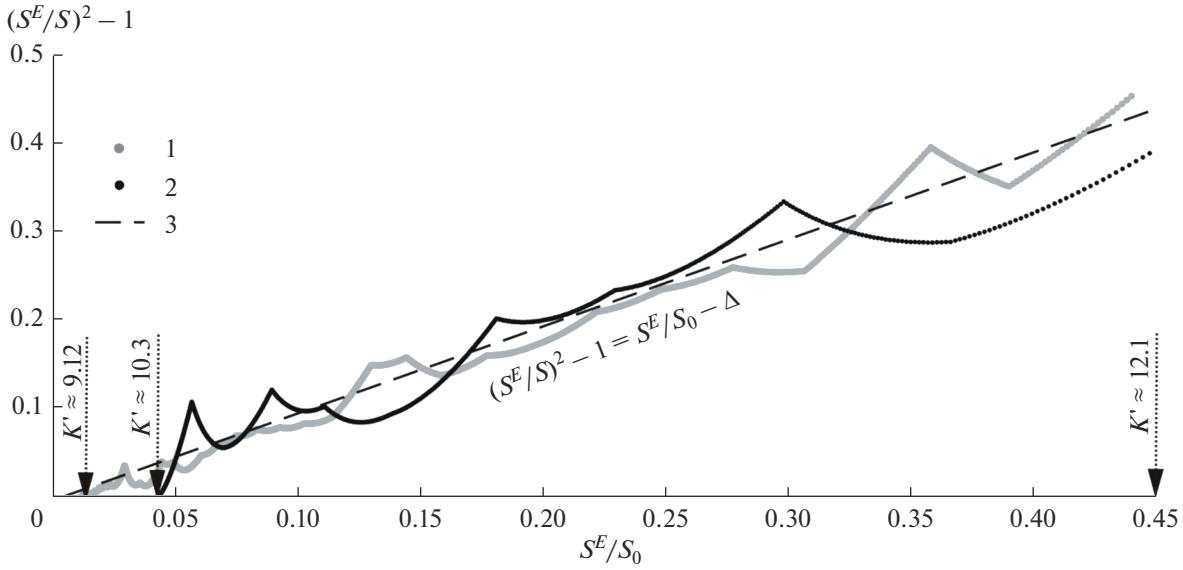

Рис. 6. Подбор параметров, определяющих нелинейные отклонения от закона Гутенберга–Рихтера шкал $K'(K)$ и $K'(mb)$.
1 – аппроксимируемый график на основе данных $K'(K)$; 2 – то же для $K'(mb)$; 3 – единая для этих графиков аппроксимирующая линейная зависимость $(S^E/S)^2 - 1 = S^E/S_0 - \Delta$.

Линейная и при этом охватывающая основную долю данных часть соотношения (13) относительно параметра $S(K')$ при $K' = K'(K)$ и $K' = K'(mb)$ представлена на рис. 6. Для этих данных в диапазоне значений K' до 12.1 было получено единое решение: $S_0 = 10^{12.978/2}$ и $\Delta = 0.05$ (см. рис. 6).

Смысл параметра $S_0 = 10^{12.978/2}$ с учетом представленного физического смысла выражения (13) заключается в том, что эффективность сейсмического излучения очагами землетрясения при $K^F = 12.978$ в два раза ниже эффективности, достигаемой при значениях $K^F \ll 12.978$.

Эти результаты получены для оценок величин землетрясений, основанных на относительно узких диапазонах спектра сейсмического излучения очагами землетрясений, которые используются при построении K и mb. Учитывая данные на рис. 4, гипотезу их можно в первом приближении отнести и к более широкой части его спектра, представленной магнитудами M_S и M_W.

Физический смысл параметра $\Delta = 0.05$ неясен, но в любом случае этот параметр положителен и близок к нулю, при этом его влияние на общий итог настоящего исследования минимально.

Для получения значений обобщенного энергетического класса K^F, приближенного к эталонной шкале, на основе значений S, необходимо решить указанное уравнение относительно $S^E_{1,2}$:

$$S^E_{1,2} = (S^2 \pm S(4S_0^2 + 4\Delta S_0^2 + S^2)^{1/2})/(2S_0). \quad (14)$$

Для получения положительных значений необходимо выбрать решение:

$$S^E_1 = \left(S^2 + S\left(4S_0^2 + 4\Delta S_0^2 + S^2\right)^{1/2}\right)\Big/(2S_0). \quad (15)$$

На рис. 7 полученные значения энергетических классов K': $K'(K)$ и $K'(mb)$, а также обобщенных энергетических классов K^F: $K^F(K)$ и $K^F(mb)$ представлены в виде графиков повторяемости. На врезке представлены их отклонения ΔK^F от графиков повторяемости в шкале эталонного энергетического класса K^E.

Рассмотрение рис. 7 позволяет сделать следующие выводы:

– предложенный в работе алгоритм унификации шкал K и mb в виде обобщенной шкалы K^F позволил получить предельно близкие результаты;

– значимые отклонения обобщенных энергетических классов $K^F(K)$ и $K^F(mb)$ в представлении графиков закона повторяемости землетрясений от эталонных наблюдаются в области величин минимум на 3–4 единицы превышающих уровень “насыщения” шкал $K'(K)$ и $K'(mb)$, что позволяет считать полученные обобщенные шкалы сопоставимыми с “эталонными” при $M = 5–7$ магнитудами M_S и M_W;

– с учетом предварительных данных о подобии нелинейностей шкал $K'(K)$, $K'(mb)$, $K'(M_S)$ и $K'(M_W)$ (см. рис. 4 и 5) потенциал приближения обобщенной шкалы $K^F(K, mb, M_S, M_W)$ к идеальной еще выше, однако для удовлетворительного

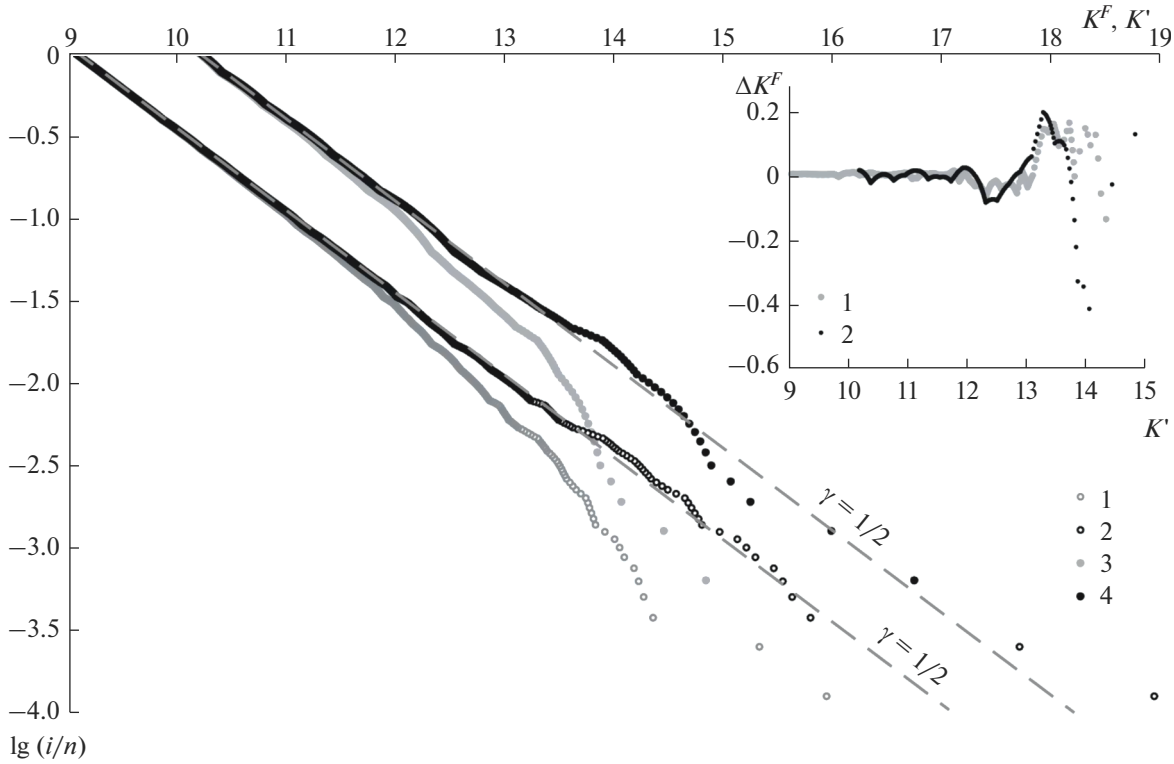

Рис. 7. Графики повторяемости для камчатских землетрясений в шкалах K^F и K' и отклонения этих графиков в шкале K^F от эталонного, на основе шкалы K^E.
1, 2 – графики повторяемости землетрясений в шкалах $K^F(K)$ и $K'(K)$; 3, 4 – то же в шкалах $K^F(mb)$ и $K'(mb)$.
На врезке: 1 – отклонения от эталонного графика величин $\Delta K^F(K)$; 2 – то же для $\Delta K^F(mb)$.

обоснования этого предположения необходимы дополнительные исследования;

– существенные аномалии распределения значений K^F в диапазонах ≈12.5 и ≈14, вероятно, связаны с региональными свойствами сейсмичности, в том числе, в соответствии с идеями М.А. Садовского о дискретности геосреды [Садовский, 2004, с. 337–353]; эти аномалии могут быть использованы для построения шкалы K^F на основе и других магнитуд;

– в дальнейшем необходимо сопоставление полученных результатов об “эффективности” сейсмического излучения очагов землетрясений различного масштаба с аналогичными данными М.А. Садовского и, возможно, данными других авторов, полученными при изучении сейсмического эффекта взрывов; в настоящее же время такое сопоставление в большей мере указывает на справедливость представленной в настоящей работе модели.

3. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ПОЛУЧЕННЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ

Прежде всего, необходимо отметить, что полученные в настоящей работе результаты имеют теоретическое значение в плане новизны как подхода к построению единой энергетической шкалы величин землетрясений K^F, так и в плане предлагаемых для его реализации представлений о свойствах сейсмического процесса.

Представление перспективного метода построения указанной единой шкалы, а также его частная реализация при построении шкалы K^F для землетрясений Камчатки имеют существенное практическое значение.

Полученные результаты также позволяют надеяться, что предложенный в работе подход позволит в конечном итоге эффективно решить проблему сопоставимости и унификации различных магнитудных шкал не только в региональном, но и в глобальном масштабе.

Полученные результаты указывают на возможность более корректного отражения данными о величинах землетрясений в шкале K^F реального энергетического спектра сейсмического процесса. В свою очередь, предполагается, что его вариации служат не менее важным индикатором изменений состояния сейсмоактивной среды [Соломатин, 2021], чем используемые в настоящее время вариации интенсивности сейсмического процесса [Федотов, 2005 и др.].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложена идея и основные методики построения обобщенного энергетического класса K^F. Введение этой шкалы является потенциальной альтернативой предельно сложной системе множества межмагнитудных соотношений. Предполагается, что представление сейсмологических данных о величинах землетрясений в ней, во-первых, позволяет максимально сблизить все используемые магнитудные шкалы и обобщить их, во-вторых, оправдано с физической точки зрения.

По сравнению с работой [Соломатин, 2021], в которой обобщенный энергетический класс был построен на уровне рангового представления величин землетрясений, в настоящей работе такое построение более обоснованно.

В работе также представлено частное практическое применение идеи построения шкалы K^F. Такая шкала была построена для землетрясений Камчатки как на основе энергетического класса K (региональный каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН), так и на основе магнитуды mb (каталог ISC). Полученные результаты в обоих случаях оказались предельно близки, что указывает на правильность используемой концепции обобщенной шкалы K^F и убедительность предложенных методик ее построения, а также перспективность применения такой шкалы для других сейсмоактивных регионов.

Предложенные методики включают целый ряд новых теоретических представлений о свойствах сейсмического процесса. В качестве важного теоретического результата исследования можно выделить гипотезу о законе зависимости эффективности сейсмического излучения очагом землетрясения от величины, соответствующей этому землетрясению условной деформации по Беньофу – эффекте, не учитываемом в магнитудных шкалах.

Ряд используемых в работе представлений введен на основе изучения сейсмического процесса Курило-Камчатского региона, но представляется очевидной перспективность их развития и для других сейсмоактивных регионов со сходными сейсмотектоническими условиями. В конечном же итоге можно представить создание на основе энергетического класса K^F наиболее общей системы энергетической классификации землетрясений мира.

К другим перспективным направлениям использования результатов настоящей работы относятся:

– развитие работ по прогнозу землетрясений, в том числе, работ на основе метода долгосрочного сейсмического прогноза ДССП С.А. Федотова, а также работ по среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности;

– исследования аномалий энергетического спектра сейсмического процесса и их связи с региональными геофлюидодинамическими процессами;

– развитие методик моделирования и мониторинга динамического состояния сейсмоактивных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.

Кукинов А.М. Применение порядковых статистик и ранговых критериев для обработки наблюдений // Поиск зависимости и оценка погрешности / Отв. ред. И.Ш. Пинскер. М.: Наука, 1985. С. 97–110.

Лемзиков В.К., Гусев А.А. Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. 1989. № 4. С. 83–97.

Ризниченко Ю.В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 7. С. 969–977.

Садовский М.А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. М.: Наука, 2004. 440 с.

Соломатин А.В. Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39–48.

Соломатин А.В. Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67–79.

Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.

Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.

Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula lg N = a – bM and its confidence limits // Bull. Earth. Res. Ins. 1965. V. 43. P. 237–239.

Benioff H. Earthquakes and rock creep // Bull. of the Seismological Society of America. 1951. V. 41. P. 50–62.

Choy G.L., Boatwright J.L. Global Patterns of Radiated Seismic Energy and Apparent Stress // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 18205–18228.

Di Giacomo D., Grosser H., Parolai S. et al. Rapid determination of ME for strong to great shallow earthquakes // Geophys. Res. Letters. 2008. V. 35. L1030. https://doi.org/10.1029/2008GL033505

Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton: Princeton University Press, 1949. 310 p.

Kanamori H. The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2981–2987.

Energy Properties of the Seismic Process and the Possibility of Introducing a Generalized Earthquakes Energy Class

A. V. Solomatin*

Institute of Volcanology and Seismology Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

**e-mail: alf55@mail.ru*

This paper presents a scale of the earthquake energy class K^F, designed to unify data on their magnitudes based on existing scales: M_S, M_W, mb, K_S and many others. The conceptual feature of the proposed scale is a shift in emphasis from the traditional in such cases seismometric issues related to the registration of seismic waves (as well as related issues of their generation and propagation), towards the effective use of the basic energy properties of the seismic process, such as the Gutenberg-Richter law. In the most general case, the proposed approach makes it possible to significantly simplify the finding of regression relationships between different scales of earthquake magnitudes, but the task of constructing a single, generalized scale is much more promising. The paper presents its particular solution – the construction of such a scale for earthquakes in Kamchatka. The proposed S.A. Fedotov's energy class is $K_{S1.2}^{F68}$ (K_S – of Kamchatka Branch of the Federal Research Center "Geophysical Service of Russian Academy of Sciences") is used as the basis of the K^F scale, as well as the widespread magnitude mb (International Seismological Centre).

Keywords: magnitude scale, generalized energy class, earthquake source, seismic process, earthquake recurrence law, energy spectrum, energy balance