

УДК 550.34

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ СЕВЕРО-ВОСТОКА РФ (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Лутиков А.И.<sup>1,2</sup>, Андреева Н.В.<sup>2</sup>, Габсатарова И.П.<sup>1</sup>, Донцова Г.Ю.<sup>1</sup>, Карпенко Л.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Единая Геофизическая служба Российской академии наук»,  
г. Обнинск [ail@ifz.ru](mailto:ail@ifz.ru), [ira@gstras.ru](mailto:ira@gstras.ru), [donzova@ifz.ru](mailto:donzova@ifz.ru)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, [zmv@ifz.ru](mailto:zmv@ifz.ru)

<sup>3</sup>Магаданский филиал ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН», г. Магадан, [Larisa@memsd.ru](mailto:Larisa@memsd.ru)

### Введение

Северо-восток РФ, значительную часть которого занимает Магаданская область, относится к территориям с высокой степенью сейсмической опасности. По данным карт ОСР-2015 эта территория располагается в 7-ми, 8-ми и 9-ти балльных зонах согласно действующей макросейсмической шкале. Этим обусловлена актуальность проведения исследований по оценке сейсмической опасности территории Магаданской области в масштабе близком к масштабу детального сейсмического районирования.

Исследуемая область находится в зоне сочленения литосферной и двух коровых плит—: Охотоморской малой литосферной плиты, Сибирской (Восточно-Сибирской) и Колымо-Чукотской коровых плит. В динамической модели главных сейсмогенерирующих структур территории северо-востока Азии эта область относится к Индигино-Колымскому сегменту сеймотектонической зоны Черского с трансрессивным (сдвиг при дополнительном боковом сжатии) геодинамическим режимом [6].

Первые результаты исследования сейсмического режима Магаданской области с расчетом сейсмической сотрясаемости были опубликованы в монографии «Сейсмическая сотрясаемость территории СССР» [8]. Для расчета сейсмической активности  $A_{10}$  в этой работе были использованы 265 представительных землетрясений за период наблюдений 1968–1973 г. Также были привлечены данные известных на то время исторических землетрясений. График повторяемости землетрясений  $N(K)$ , построенный за шесть лет наблюдений имел угловой коэффициент  $\gamma=0.48$ . Важное значение имела карта  $K_{\max}$ , которая была рассчитана на основании корреляции  $K_{\max}$  с сейсмической активностью  $A$  по установленной в других регионах Среднеазиатско-Японской зависимости. Карты  $K_{\max}(A)$  были несколько преобразованы на основании качественного учета неотектоники региона, границы  $K_{\max}(A)$  были расширены на «однородные» в геологическом отношении блоки, что привело к некоторому увеличению значений сотрясаемости в районах с меньшей современной сейсмической активностью [8].

Направления таких работ получили развитие, и были положены в основу метода вероятностного анализа сейсмической опасности ВАСО, который применялся при составлении комплекта вероятностных нормативных карт ОСР-97 (А, В, С, D) и, в последствие, проекта карт ОСР-2012 (А, В, С, D, E, F). За модели зон ВОЗ принимались сейсмолинеаменты разных  $M_{\max}$ . Вариант такой карты для соседнего с Магаданской областью Верхоянского района, захватывающий частично Магаданскую область, был представлен В.И. Уломовым с соавторами [13] на 4-ой Камчатской конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». В статье также опубликована карта, на которой одновременно в сравнении представлены сейсмолинеаменты  $M_{\max}$  в Черской зоне, применяемые при создании ОСР-97 и проекта ОСР-2012, на которой хорошо видно, что при соблюдении общих тенденций про простирание сейсмолинеаментов, имеются заметные различия в их положении. Это иллюстрирует результаты работы с комплексом геолого-геофизических и других данных по уточнению положения активных зон разломов и оценки их потенциала.

В работе [3] сообщается, что по просьбе дирекции ОАО «Колымаэнерго», были выполнены исследования по определению исходного балла региональной сейсмичности, а так же проведена оценка сотрясаемости участка основных сооружений Колымской ГЭС. Сделан вывод, что за все время сейсмического мониторинга (1785 – 2008 гг.) максимальная энергия землетрясения в непосредственной близости от основных сооружений не превышала энергии  $K = 11$ , что соответствует примерно магнитуде  $M = 4.0$ . Максимальной магнитудой этого единственного самого

сильного события и определяется локальная максимальная сотрясаемость в районе Колымской ГЭС [3].

Настоящее исследование направлено на актуализацию полученных ранее данных в задаче сейсмического районирования и оценки сейсмической опасности территории Магаданской области и представление карт сейсмической опасности в масштабе карт.

### Использованные данные и методика исследований

Информационной базой для настоящих работ служили: очищенный от афтершоков каталог Северо-Востока России, подготовленный сотрудниками Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 2013 г. от магнитуды  $M = 3.5$ . (УКЗСЕ) [11], – СМТ-каталог [<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>]. На основании перечисленных выше источников был составлен сводный каталог землетрясений для территории исследований в следующих границах: по широте –  $\varphi=58.0^{\circ}$ – $66.0^{\circ}$ N, по долготе –  $\lambda=142.0^{\circ}$ – $160.0^{\circ}$ E, охватывающий период времени с 1735 г. по 2015 г. включительно. После исключения заведомо непредставительных землетрясений с магнитудами  $M_S \leq 1.7$  сводный каталог насчитывал 3052 события с магнитудами  $1.8 \leq M_S \leq 7.1$ . Для унификации по магнитуде  $M_S$  использовалось соотношение:

$$M_S = 0.5481 \cdot K - 2.1271, R_c = 0.958 \quad (1)$$

Методом линейной ортогональной регрессии строился ненормированный график повторяемости, дающий представление о среднем периоде повторения землетрясений соответствующих магнитуд на всей рассматриваемой территории.

В аналитической форме график повторяемости в интервале магнитуд  $2.0 \leq M_S \leq 6.0$  имел вид:

$$\lg(N / T_{repr}) = -(0.880 \pm 0.022) \cdot M_S + 3.799 \pm 0.147, R_c = 0.998 \quad (2)$$

Высокий коэффициент линейной корреляции  $R_c = 0.998$  свидетельствовал о достаточно высокой надежности полученного результата. По результатам исследований прошлых лет (60 – 70 годы прошлого века) [8] получен наклон графика повторяемости относительно энергетического класса  $\gamma = 0.48$ . С учетом соотношения (1) наклон графика повторяемости по магнитуде  $M_S$  равен  $b = \gamma / 0.5481 = 0.876$ , что практически идентично величине  $b$  в формуле (2). Последнее свидетельствует о высокой временной устойчивости параметра  $b$ .

*Сейсмическая активность.* Для детального знания повторяемости землетрясений различных магнитуд на рассматриваемой территории строилась матрица сейсмической активности  $A_{3,3}$ , являющаяся аналогом сейсмической активности  $A_{10}$  [8], которая вместе с матрицей  $M_{max}$  также использовалась для расчета сейсмической сотрясаемости. В матрице сейсмической активности  $A_{3,3}$  (магнитуда  $M_S = 3.3$  соответствует землетрясениям с энергетическим классом  $K = 10$ ; тем самым сохраняется преемственность в оценках величины сейсмической активности к исследованиям прошлых лет и обеспечивается сопоставимость полученных результатов), значения сейсмической активности отнесены к центрам узлов координатной сетки. Расчеты велись для ячеек размером  $1/6^{\circ}$  по широте и  $1/3^{\circ}$  по долготе. Напомним, что сейсмическая активность определялась по формуле (3)

$$A_0 = (1 - 10^{-b}) / 10^{-b(M_{min} - M_0)} \times (T_0 \cdot S_0) / (T \cdot S) \times N_s \quad (3)$$

где  $b$  - наклон графика повторяемости (в данном случае  $b = -0.880$ );  $M_{min} = 2.0$  - наименьшая представительная магнитуда (уровень представительности)  $M_0 = 3.33$  - магнитуда землетрясений, которой соответствует рассчитываемая активность  $A_0$ ;  $S$  - площадь площадки осреднения;  $T$  - период представительного наблюдения землетрясений;  $S_0$  - принятая в соответствии с  $A_0$  единица нормирования по площади (в данном случае  $S_0 = 1000 \text{ км}^2$ ),  $T_0$  - единица времени (1 год);  $N_s$  - общее число землетрясений различных магнитуд  $M \geq M_{min}$ , наблюдаемых за время  $T$  на площади  $S$ . По сути дела, сейсмическая активность  $A_0$  имеет смысл среднего числа землетрясений с магнитудой  $M_0$  в год на площади в 1 тысячу квадратных километров. Расчет сейсмической активности выполнялся по программе SEIACT2m (автор А.И. Лутиков).

Вся матрица  $A_{3,3}$  была рассчитана в координатах  $58.5^{\circ}$ – $66.0^{\circ}$  с.ш.,  $142.33^{\circ}$ – $157.67^{\circ}$  в.д. Максимальные значения сейсмической активности  $A_{3,3}$  в рассматриваемой области достигают  $A_{3,3} = 0.103$ . Матрица сейсмической активности, использовавшаяся для расчета сейсмической сотрясаемости, была скорректирована с учетом схемы зон ВОЗ таким образом, что в пределах каждой зоны ВОЗ принималась одинаковая сейсмическая активность, равная максимальной наблюдаемой в этой зоне.

За глубину гипоцентров при расчете сейсмической сотрясаемости была принята глубина  $h = 10 \text{ км}$ .

**Сейсмотектоника и зоны ВОЗ.** Выделение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) для Магаданской области производилось на основе сейсмологических и геологических данных. Зоны ВОЗ классифицируются по  $M_{\max}$  – магнитуде максимально возможного в их пределах землетрясения. Величина  $M_{\max}$  при этом определяется по комплексу геолого-геофизических, геоморфологических и неотектонических данных, протяженности и сегментации сейсмоактивных разломов, по уровню сейсмичности, по размеру древних и современных сейсмодислокаций, по результатам тектонофизических исследований.

Структурные особенности проявления сейсмичности в Магаданской области демонстрируются картой сейсмолинеаментов Восточной Сибири В.С. Имаева. Эта карта легла в основу выделения зон ВОЗ для оценки сейсмической опасности интересующего нас региона [5]. Сейсмолинеаменты, выделенные на карте [5, 6], сопоставлялось с разломами по картам Трифонова [12] и государственной геологической [2], а их положение уточнялось по рельефу, космоснимкам и обзорным геологическим картам крупного масштаба. Кроме того, учитывались тектоническая позиция, кинематика и возраст самых молодых смещенных образований, скорость смещений, проявления активности в новейшее и голоценовое время [9, 2]. Магнитудный потенциал сейсмолинеаментов оценивался с использованием данных каталогов землетрясений, содержащих информацию о землетрясениях инструментального периода и по наличию палеосейсмодислокаций [9, 1]. Также учитывались магнитуда, положение, кинематика и механизмы очагов землетрясений [4, 6]. Магнитуда индивидуальных сейсмогенерирующих сегментов ( $M_{\max}$ ) оценивалась по их протяженности в соответствии с известной зависимостью [14]:

$$M_{\max} = 4.38 + 1.49 \lg(L), \quad (4)$$

где  $L$  – длина приповерхностного разлома в километрах.

Ширина зон ВОЗ оценивалась по зависимости, предложенной Ю.В. Ризниченко [7] в виде:

$$\lg(W) = 0.405 \cdot M_{\max} - 1.464, \quad (5)$$

где  $W$  – ширина зоны ВОЗ в километрах.

При этом за ось зоны ВОЗ принимались соответствующие активные разломы и сейсмолинеаменты. Учитывался также разброс в локализации активных разломов, причем в некоторых случаях несколько разломов объединялись в пределах одной зоны ВОЗ.

Для изучаемого региона были выделены следующие зоны ВОЗ, для которых была проведена оценка сейсмического потенциала, установлено простираие зон и вероятная кинематика смещений при сейсмогенных подвижках (табл. 1): Улаханская, Дапирская, Сигланская, Чай-Юрьинская зоны с прогнозным сейсмическим потенциалом  $M_{\max} = 7.5$ , Янская, Арга-Тасская, Ланкомо-Омолонская с прогнозным сейсмическим потенциалом  $M_{\max} = 7.0$  и Омчакская, Инская, Иня-Ямская с  $M_{\max} = 6.5$ . Для всей остальной территории была принята фоновая  $M_{\max} = 5.0$ .

Таблица 1. Зоны ВОЗ на территории Магаданской области

№	Зона ВОЗ	Простираие	Тип подвижки	$M_{\max}$
1	Улаханская	СЗ	Левосторонний сдвиг и сбросо-надвиг	7.5
2	Дапирская	СЗ	взбросо-сдвиг	7.5
3	Чай-Юрьинская	СЗ	взбросо-сдвиг, переходящий в надвиг	7.5
4	Янская	СЗ	Сдвиг с надвиговой составляющей	7.0
5	Арга-Тасская	СЗ	Левый сдвиг	7.0
6	Умарская	СЗ	Взброс и надвиг	6.5
7	Омчакская	СЗ	листрический сброс	6.5
8	Инская	СВ	-	6.5
9	Иня-Ямская	В-З	-	6.5
10	Паутовская	СВ	Надвиг	6.5
11	Челомджа-Ямская	В-З	Надвиг	7.0
12	Сигланская	СВ	Сдвиг, сбросо-сдвиг	7.5
13	Ланково-Омолонская	СВ	Сбросо-сдвиг	7.0

Предложенная схема зон ВОЗ после оцифровки превращена в матрицу  $M_{\max}$ . Макросейсмический балл определялся путем расчета сейсмической сотрясаемости по методу Ю.В. Ризниченко [8]. Уравнение макросейсмического поля, дающее корреляционную связь между наблюдаемой макросейсмической балльностью, магнитудой землетрясения, эпицентральной

расстоянием и глубиной очага. При расчетах использовалось предложенное для северо-востока России уравнение макросейсмического поля [8] в виде:

$$I = 1.5M_s - 3.0\lg(R) + 2.5, \quad (6)$$

где  $R$  –гипоцентральное расстояние в километрах.

Отметим, что, когда сейсмическая опасность оценивается в терминах макросейсмического балла, использование метода Ю.В. Ризниченко является, на наш взгляд, оптимальным.

Конечным результатом работы является оценка сейсмической опасности в баллах макросейсмической шкалы с вероятностями непревышения в 1%, 5% и 10% за 50 лет.

### Полученные результаты

Построены карты балльности (рис. 1а, б, в), которые в генерализованном виде повторяют карты  $M_{\max}$  и сейсмической активности  $A_{3,3}$ . Наибольшие значения макросейсмической балльности наблюдаются в областях зон с высокой  $M_{\max}$  ( $M_{\max} \sim 7.0 - 7.5$ ). Максимальная балльность изменяется от более, чем  $I = 7.5$  при  $T_{av} = 500$  лет до  $I = 8.8$  при  $T_{av} = 5000$  лет. В целом, расчетная балльность оказалась немного ниже, чем по ОСП-97 и ОСП-2015. При этом полученные нами карты балльности оказались более дифференцированными, чем в ОСП-2015.

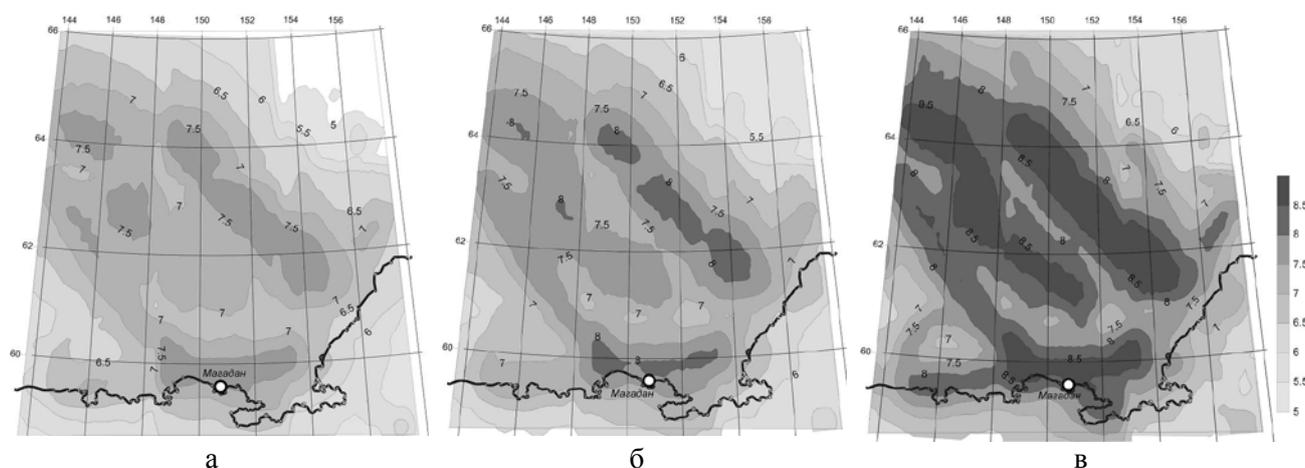


Рис. 1. Карты макросейсмической балльности Магаданской области при среднем периоде повторения сейсмических воздействий а – 1 раз в 500 лет, б – 1 раз в 1000 лет, в – 1 раз в 5000 лет. Цифрами подписаны изолинии балльности.

В соответствии с картами (рис. 1 а, б, в) г. Магадан расположен на территории с достаточно высоким уровнем сейсмической опасности: по нашим данным он попал на границу зон с балльностью 7.0–7.5 при  $T_{av} = 500$  лет (по [10] – 8 баллов); 7.5 – 8.0 при  $T_{av} = 1000$  лет (по [10] – 8 баллов); и 8.0 – 8.5 баллов при  $T_{av} = 5000$  лет (по [10] – 9 баллов). Два других особо опасных объекта на территории Магаданской области: Колымская ГЭС (п. Синегорье) и Усть-Среднеканская ГЭС (п. Усть-Среднекан), по полученным нами данным находятся в областях, соответственно первый и второй объекты: расположены в зоне с балльностью 7.0 – 7.5 и 7.5 – 8.0 при  $T_{av} = 500$  лет (по [10] – 8 и 7 баллов); 7.5 – 8.0 и 8.0 при  $T_{av} = 1000$  лет (по [10] – оба 8 баллов); и 8.0 – 8.5 и 8.5 – 9.0 баллов при  $T_{av} = 5000$  лет (по [10] – оба 9 баллов). Таким образом, во-всех случаях наши расчеты примерно на 0.5 балла ниже оценок ОСП-2015.

### Заключение

Оценка сейсмической опасности Магаданской области в координатах  $58.5^\circ - 66.0^\circ$  с.ш.,  $143.3^\circ - 157.7^\circ$  в.д. в баллах макросейсмической шкалы выполнена по методу Ю.В. Ризниченко. В основе метода лежит расчет сейсмической сотрясаемости. В работе оценены основные параметры сейсмического режима: наклон графика повторяемости ( $b = 0.88$ ), матрица сейсмической активности ( $A_{3,3}$ ), оценены средняя мощность и средняя глубина залегания сейсмоактивного слоя ( $h$ ), на основании чего при расчетах карт балльности была принята  $h = 10$  км.

На основании анализа комплекса сейсмологических, тектонических и геологических данных на территории Магаданской области были выделены 13 зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) с  $M_{\max}$  6.5, 7.0 и 7.5. Вне выделенных зон ВОЗ в качестве фоновой  $M_{\max}$  была принята  $M_{\max} 5.0$ .

Важной особенностью работы является то, что при расчете карт балльности использовалась матрица сейсмической активности, скорректированная с учетом карты зон ВОЗ. А именно, в

пределах каждой зоны ВОЗ принималась одна и та же сейсмическая активность, равная максимальной наблюдаемой в этой зоне.

Результатом работы явились вероятностные карты сейсмической опасности Магаданской области в баллах макросейсмической шкалы, рассчитанные на средний период повторения в 500, 1000 и 5000 лет. Полученные карты балльности в генерализованном виде повторяют карты  $M_{\max}$  и сейсмической активности  $A_{3.3}$ . Наибольшие значения макросейсмической балльности наблюдаются в областях зон с высокой  $M_{\max}$  ( $M_{\max} \sim 7.0 - 7.5$ ). Максимальная балльность изменяется от более, чем  $I = 7.5$  при  $T_{av} = 500$  лет до  $I = 8.8$  при  $T_{av} = 5000$  лет. Расчетная балльность по нашим данным оказалась немного ниже, чем по ОСР-97 и ОСР-2015.

Обзорный масштаб карты, взятой за основу, высокая степень генерализации исходных данных и низкая точность привязки привели к необходимости уточнения положения разломов в соответствии с собранной геолого-геофизической информацией, что является необходимой ступенью при детальной оценке сейсмической опасности.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00453-19-01.

### Список литературы

1. *Важенин Б.П.* Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. 205 с.
2. *Гельман М.Л. (отв. ред.), В.Г.Корольков и др.* Госгеолкарта. Масштаб 1:1000 000. Новая серия. Лист О-56 - Магадан; Р-56-57 - Сеймчан (с объяснительной запиской) // СПб: ВСЕГЕИ, 1992. 174 с.
3. *Гунбина Л.В., Седов Б.М.* Результаты сейсмического мониторинга по оценке исходного балла сотрясаемости и цунамигенной опасности Колымской ГЭС. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тезисы Второй научно-технической конференции. Российская академия наук, Геофизическая служба, Камчатский филиал; ответственный редактор В.Н. Чебров. 2009. С. 18.
4. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмич Б.М.* Сейсмоструктура Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 227 с.
5. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В.* Карта сейсмоструктуры Восточной Сибири. Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6 № 3. С. 275-287.
6. *Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Ашурков С.В., Мельникова В.И., Середкина А.И.* Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 737–768. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0315.
7. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
8. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР // Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 220 с.
9. *Смирнов В.Н.* Северо-Восток Евразии // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. Под ред. А.Ф. Грачева. М.: Изд-во «ПРОБЕЛ», 2000. С. 120-133.
10. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП П-7-81\*». М., 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.minstroyrf.ru>. Дата обращения 17.04.19.
11. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Редакторы В.И.Уломов, Н.С.Медведева /<http://seismos-u.ifz.ru/documents/Earthquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf>.
12. *Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Бачманов Д.М.* Карта активных разломов Евразии - по базе данных. 2018 год, масштаб ~1:1 000 000.
13. *Уломов В.И., Перетокин С.А., Медведева Н.С., Данилова Т.И., Имаева Л.П., Акатова К.Н.* Динамика сейсмической опасности в Верхоянье и сильное землетрясение в Якутии 14 февраля 2013 г. //Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Российская академия наук, Геофизическая служба, Камчатский филиал; ответственный редактор В.Н. Чебров. 2013. С. 205–209.
14. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84. 974–1002.