

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.348.436

СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕРРИТОРИИ
СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ© 2024 г. А. Ю. Осипова¹*, В. Ю. Осипов¹, Д. Д. Бызов¹¹Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН)
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: seismolab@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 13.09.2023 г.

Принята к публикации 18.09.2023 г.

Строительство объектов повышенного уровня ответственности и особо ответственных объектов на территории Свердловской области необходимо выполнять с учетом результатов работ по уточнению исходной сейсмичности. Для целей детального сейсмического районирования территории были выполнены сейсмологические исследования. На основе обобщенных исторических и инструментальных каталожных материалов за период 1788–2022 гг. составлен сводный унифицированный каталог тектонических землетрясений Уральского региона. В статье приведено определение параметров сейсмического режима территории Свердловской области — построен график повторяемости, оценен уровень сейсмической активности исследуемого региона, определена глубина залегания сейсмоактивного слоя и построена матрица сейсмической активности $A_{3,3}$. Установлено, что сейсмическая активность территории слабая, наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной ее части.

Ключевые слова: каталог землетрясений, график повторяемости, сейсмическая активность, сейсмический режим, магнитуда

DOI: 10.31857/S0869780924010052, EDN: GNWHYS

ВВЕДЕНИЕ

Территория Свердловской области расположена в пределах крайней восточной окраины Восточно-Европейской платформы, средней, северной частей Уральской горно-складчатой системы и западной части Западно-Сибирской плиты. В настоящее время на территории области ежегодно регистрируется порядка 400 сейсмических событий разной природы — взрывы, горные удары, горно-тектонические события и тектонические землетрясения, последние из которых происходят редко. За период 1788–2022 гг. на территории области было отмечено порядка 30 тектонических землетрясений силой до 5.0–6.0 баллов по шкале MSK-64 в эпицентрах. Из них только одно событие — Билимбаевское землетрясение 17.08.1914 г. ($M_S = 5.0$, координаты эпицентра 57.09° с.ш., 59.80° в.д.) имело в эпицентре силу порядка 6.0 баллов по шкале MSK-64. За этот период было отмечено еще порядка 11 землетрясений, сила сотрясения в эпицентре во время которых оценивается ~4.0–5.0 баллов по шкале MSK-64, а магнитуда — от 3.0 до 4.7 [1–4, 7, 9, 13, 14, 17, 26, 27].

В последние годы наиболее сильные землетрясения на территории Свердловской обл. были зарегистрированы 29.03.2010 г. ($M_S = 3.9$; координаты

эпицентра 58.85° с.ш., 59.17° в.д.) в 25 км к северо-западу от г. Качканар и 18.10.2015 г. ($M_S = 4.4$; координаты эпицентра 57.13° с.ш., 58.83° в.д.) в районе пос. Сабик Шалинского района, приблизительно в 40 км к западу-северо-западу от Билимбаевского землетрясения [2, 5, 6, 8, 11, 12, 26].

Свердловская область — активно развивающийся регион с большим количеством горнодобывающих предприятий, промышленных заводов, соседствующих с крупными городами. Помимо тектонических землетрясений на рассматриваемой территории регистрируется большое количество техногенных сейсмических событий (взрывы, горные и горно-тектонические удары). В связи с этим детальное сейсмическое районирование территории актуально для обеспечения сейсмической безопасности населения, существующих и планируемых к строительству зданий, сооружений. Основой сейсмического районирования является каталог землетрясений, однородный (унифицированный) по содержанию и представительный (на уровне современной изученности) для всей исследуемой территории.

Цель данной работы — составление сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений, произошедших за период 1788–2022 гг. в исследуемом регионе, а также оценка сейсмического режима территории Свердловской области.

Исходные сейсмологические материалы

Область сейсмологических исследований определяют исходя из условия, что объект или территория, подлежащие оценке сейсмической опасности, располагались внутри этой области на расстоянии не менее 200 км от ее границ [23]. Сводный каталог тектонических землетрясений составляют в пространственных границах, выбранных в зависимости от степени изученности “окружающего” района и уровня сейсмичности, как правило, в радиусе не более 300 км от объекта.

Источниками для составления сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений с эпицентрами в пределах района исследования послужили:

- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.) [1];
- Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. [7];
- База данных “Землетрясения России” с 2003 г. по 2022 г. [2];
- Информация Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН [13];
- База данных сейсмологического мониторинга Западного Урала [26];
- Геофизические обсерваторские исследования на Урале [17].

Данные, содержащиеся в перечисленных выше каталогах, были подвергнуты взаимной проверке с целью взаимного дополнения источников и исключения недостоверной информации. В рассматриваемых сейсмологических каталогах часто приводятся разные магнитуды (m_b , M_L , M_S), и (или) указан энергетический класс сейсмического события (K). Для составления сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений Свердловской обл., прежде всего, была проведена работа по выборке из всех землетрясений только тектонических (исключены взрывы, горно-тектонические удары, импактные события, афтершоки). Магнитуды сейсмических событий были унифицированы, т.е. приведены к одной магнитуде — M_S .

В ежегодниках “Землетрясения России” [2] расчет магнитуды M в сводных каталогах сейсмических событий производится из значений магнитуд и энергетических классов, публикуемых в Сейсмологических бюллетенях ФИЦ ЕГС РАН и региональных каталогах подразделений ФИЦ ЕГС РАН по приведенным формулам в табл. 1.

Анализ сейсмического режима территории Свердловской области

Для анализа сейсмического режима территории Свердловской обл. использовался сводный унифицированный каталог, который насчитывал 156 тектонических событий магнитудой $M_S \leq 5.3$

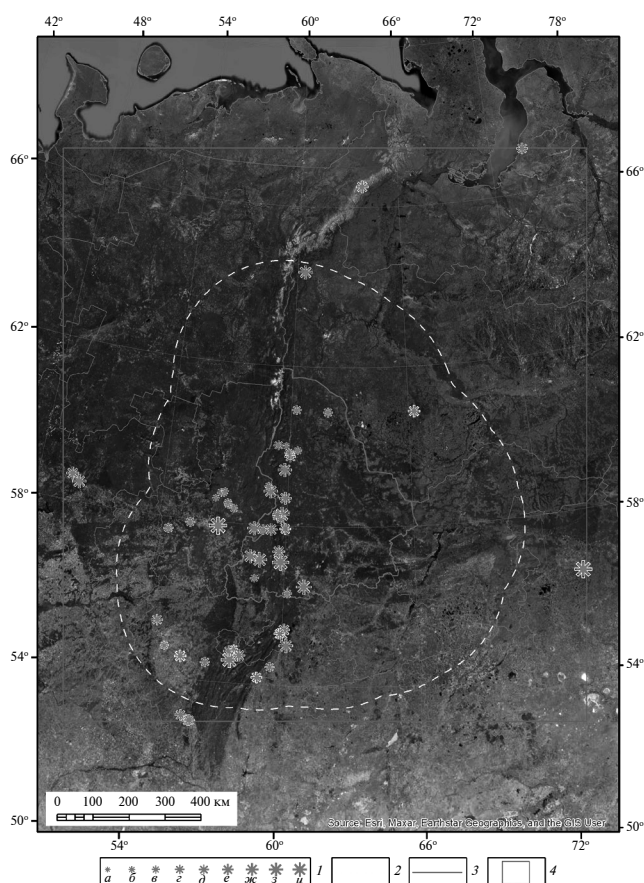


Рис. 1. Схема расположения эпицентров тектонических землетрясений ($1.4 \leq M_S \leq 5.3$) за период 1788–2022 гг. Условные обозначения: 1 — эпицентры тектонических событий, магнитудой M_S (шаг 0.5 ± 0.2): а — 1.5, б — 2.0, в — 2.5, г — 3.0, д — 3.5, е — 4.0, ж — 4.5, з — 5.0, и — 5.5; 2 — граница, соответствующая буферной зоне 300 км от административной границы Свердловской обл.; 3 — административная граница Свердловской обл.; 4 — территория расчета матрицы сейсмической активности $A_{3.3}$.

и охватывал период времени 1788–2022 гг. Предварительно из него были исключены афтершоки сильных и умеренных ($M_S \geq 3.8$) тектонических землетрясений, поскольку их учет искажает параметры графика повторюемости и значения сейсмической активности [25]. В Уральском регионе афтершоки были зарегистрированы от двух землетрясений: 29.03.2010, $M_S = 3.9$ — г. Качканар; 04.09.2018, $M_S = 5.0$ — г. Катав-Ивановск. После исключения афтершоков сводный унифицированный каталог насчитывал 67 сейсмических событий с магнитудами $1.4 \leq M_S \leq 5.3$. На рис. 1 приведена схема расположения эпицентров этих тектонических землетрясений за период 1788–2022 гг.

В табл. 2 дано распределение числа событий в каталоге по годам и магнитудам (жирным шрифтом выделены периоды представительных наблюдений для различных магнитуд). Для всей рассматриваемой территории нижешей представительной

магнитудой была признана $M_S = 2.5$ (в период 2001–2022 гг.).

После уточнения периодов представительной регистрации различных магнитуд в соответствии с табл. 2 был сформирован сводный представительный каталог землетрясений региона, насчитывающий 50 событий в интервале магнитуд $2.5 \leq M_S \leq 5.5$ за период 1788–2022 гг., который использовался при построении графика повторяемости.

График (закон) повторяемости

Один из ключевых законов сейсмологии — Гутенберга-Рихтера [28], описывающий зависимость логарифма числа событий с определенной магнитудой в некотором регионе от величины этой магнитуды. Эмпирически было выявлено, что эта зависимость линейная:

$$\lg N = a - b \cdot M \tag{1}$$

где N — число событий с магнитудой M , a и b — константы.

Сама эта зависимость обычно называется частотно-магнитудным распределением либо

графиком повторяемости, а коэффициент b — наклоном графика повторяемости, либо b -value. Этот параметр несет смысл соотношения между числом событий с малыми и большими магнитудами, т.е. чем больше его значение, тем больше малых событий по сравнению с большими.

Наклон графика повторяемости землетрясений имеет большое теоретическое и практическое значение и может, в частности, использоваться для прогноза сильных землетрясений. Для этой цели необходимо анализировать изменение параметра b -value во времени. Перед большим землетрясением значение параметра b -value уменьшается с последующим увеличением после землетрясения [22]. Известно также, что величина параметра b -value зависит от тектонического напряжения в среде, изменений температуры, порового давления и степени неоднородности среды и, соответственно, может нести в себе информацию об этих величинах. Поэтому подобные исследования актуальны для изучения природы сейсмичности, а также процессов, происходящих в недрах.

Для целей сейсмического районирования число событий в каждом интервале магнитуд

Таблица 1. Расчет магнитуды M (M_{LH} , M_S) [2]

Регион Код центра	Формула расчета M	Глубина h , км	Условия применения	Автор	Период применения формулы
Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь. Восточная часть Балтийского щита					
GSRAS	$M = M_S$	≤ 70	определена M_S	[16]	2003–2020 гг.
	$M = M_S + 0.8$	> 70	определена M_S	[16]	2003–2008 гг.
	$M = 1.59 MPLP - 3.97$	≤ 70	нет M_S	[16]	2003–2012 гг.
	$M = 1.59 MPSP - 3.67$	≤ 70	нет M_S	[16]	2003–2019 гг.
VMGSR	$M = (K_p - 4)/1.8$			[20, 21]	2003–2019 гг.
KOGSR	$M = 1.43 M_L - 0.02 M_L^2 - 2.1$			[15]	2003–2009 гг.
	$M \approx M_L - 0.2$				2010–2013 гг.
	$M \approx M_L$				2014–2020 гг.
OBGSR	$M \approx M_L$				2010–2020 гг.
MIRAS	$M \approx M_L$				2003–2007 гг. 2014–2017 гг.
	$M \approx M_L - 0.5$				2008–2013 гг.
	$M = (K_p - 4)/1.8$			[20, 21]	2014–2020 гг.
	$M = 0.9 M_L$				2018–2020 гг.
IDG	$M \approx M_L - 0.5$				2005–2020 гг.
FCIAR	$M \approx M_L$				2013–2020 гг.
IGKRC	$M \approx M_L$				2017–2020 гг.
IGKR	$M \approx M_L$				2017–2020 гг.
	$M = M_S$				2020–

Таблица 2. Распределение числа событий в каталоге по годам и магнитудам

Годы	M_s (шаг 0.5 ± 0.2)									N
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	
1701–1800	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
1801–1850	0	0	0	1	2	2	1	0	0	6
1851–1900	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
1901–1950	0	0	1	0	1	1	0	1	1	5
1951–2000	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
2001–2005	1	2	1	2	3	0	0	0	0	9
2006–2010	0	0	3	3	1	1	0	0	0	8
2011–2015	2	4	5	6	2	1	1	0	0	21
2016–2020	2	2	4	1	0	0	0	1	0	10
2021–2022	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
N	5	9	14	14	10	8	3	2	2	67
N_{repr}			13	12	10	8	3	2	2	50

нормируется на свой период представительной регистрации T_{repr} , так что:

$$\lg N / T_{repr} = -b \cdot M_s + a \tag{2}$$

Параметр N / T_{repr} — это среднее число событий за год в соответствующем интервале магнитуд. График повторяемости оценивает средний период повторения землетрясений с данной магнитудой на территории детального сейсмического районирования. Под периодом представительной фиксации землетрясений T_{repr} определенного интервала магнитуд понимается период времени, в течение которого землетрясения в пределах этого интервала магнитуд фиксируются без пропусков на рассматриваемой территории. При этом дискретизация шкалы магнитуд проводится через 0.5 единицы магнитуды с центральными значениями 3.0; 3.5; 4.0; и т.п., а соответствующие им интервалы магнитуд: 2.8–3.2; 3.3–3.7; 3.8–4.2 и т.д. [23].

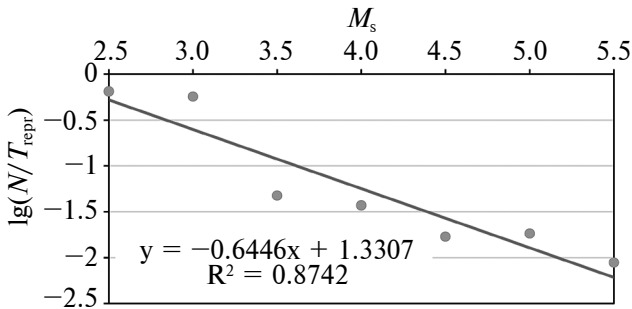


Рис. 2. Региональный график повторяемости в интервале магнитуд $2.5 \leq M_s \leq 5.5$ по материалам за период 1788–2022 гг.

В табл. 3 события сводного представительного каталога землетрясений разнесены по числу событий в соответствующих интервалах магнитуд с учетом периода их представительного наблюдения.

На основании данных табл. 3 методом линейной ортогональной регрессии был построен ненормированный график повторяемости, дающий представление о средних периодах повторения землетрясений соответствующих магнитуд на всей рассматриваемой территории по каталогам за период 1788–2022 гг. (рис. 2).

В аналитической форме график повторяемости имеет вид:

$$\lg(N/T_{repr}) = -(0.6446 \pm 0.1093) \cdot M_s + (1.3307 \pm 0.4508), R_c = 0.93499. \tag{3}$$

Весьма высокий коэффициент линейной корреляции $R_c = 0.93499$ свидетельствует о достаточно высокой надежности полученного результата.

Таблица 3. Распределение числа событий по интервалам представительных наблюдений и магнитудам

M_s (шаг 0.5 ± 0.2)	Годы	T_{repr} , лет	N	N/T_{repr}	$\lg(N/T_{repr})$
2.5	2003–2022	20	13	0.6500	–0.1871
3.0	2002–2022	21	12	0.5714	–0.2430
3.5	1813–2022	210	10	0.0476	–1.3222
4.0	1809–2022	214	8	0.0374	–1.4273
4.5	1847–2022	176	3	0.0170	–1.7684
5.0	1914–2022	109	2	0.0183	–1.7364
5.5	1798–2022	225	2	0.0089	–2.0512

Из анализа графика повторяемости (см. рис. 2) можно сделать вывод, что тектонических землетрясений в рассматриваемом регионе происходит достаточно мало. Их зафиксированная представительная магнитуда на сегодняшний день $2.5 \leq M_S \leq 5.5$, и происходили они за период 1788–2022 гг. в среднем с периодичностью менее 1 события в год, на что указывают отрицательные значения $\lg(N/T_{repr})$. Параметр *b-value* получился равным 0.6446, что меньше, чем в сейсмичных регионах, например, на Северном Кавказе, где этот параметр составляет 0.957 [18]. Это указывает на то, что даже слабых тектонических землетрясений, по сравнению с сильными ($M_S \geq 3.8$), в рассматриваемом регионе происходит не много и редко.

Возможно, в качестве “сейсмической разгрузки” в Уральском регионе выступает достаточно развитая горнодобывающая промышленность с буровзрывными работами, деятельность которой периодически “ослабляет” сейсмический потенциал геологической среды, не позволяя накопить достаточно энергии для более частой реализации землетрясений, по крайней мере, предположительно в приповерхностной части (на глубине до первых километров). А может быть, в каком-то случае буровзрывные работы, наоборот, выступают своеобразным “триггером”, способствующим возникновению тектонических событий. Кроме того, нельзя исключать и другие факторы, воздействующие на геологическую среду. Данный вопрос требует отдельного изучения и выходит за рамки данной статьи.

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} [23, 24], которую вместе с матрицей M_{max} используют 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 по территории (см. рис. 1), укладываемой в координаты $53.0-67.5^\circ$ с.ш., $45-78^\circ$ в.д. по сетке с размерами ячеек 5×5 км. Сейсмическую активность рассчитывают по формуле [23, 24]:

$$A_0 = (1 - 10^{-b}) / 10^{-b(M_{min} - M_0)} \cdot (T_0 S_0) / (TS) \cdot N_S, \quad (4)$$

где b — наклон графика повторяемости (в данном случае $b = 0.6446$, в соответствии с формулой (3)); $M_{min} = 2.5$ — наименьшая представительная магнитуда (уровень представительности);

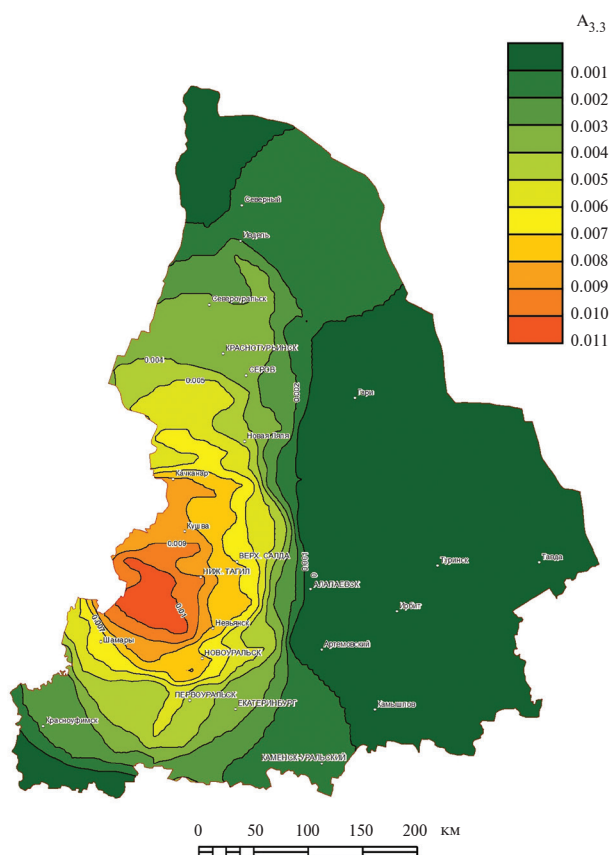


Рис. 3. Схема сейсмической активности $A_{3,3}$ территории Свердловской области.

$M_0 = 3.33$ — магнитуда землетрясений, которой соответствует рассчитываемая активность A_0 ; S_0 — принятая в соответствии с A_0 единица нормирования по площади (в данном случае $S_0 = 31415.93 \text{ км}^2$, соответствующая радиусу осреднения $R = 100 \text{ км}$), T_0 — единица времени (один год); S — площадь площадки осреднения; T — период представительного наблюдения землетрясений (лет); N_S — общее число землетрясений различных магнитуд $M \geq M_{min}$, наблюдаемых за время T на площади S .

В данной работе сейсмическая активность A_0 , по сути дела, является отражением среднего числа землетрясений с магнитудой M_0 в год на площади в 31415.93 км^2 или в радиусе 100 км от каждой точки расчета (рис. 3). Другими словами, можно сказать, что землетрясения с магнитудой $M = 3.33$ на площади в радиусе 100 км от каждой точки расчета, расположенных в пределах территории со значением изолинии 0.01 в среднем происходят 1 раз в 100 лет.

В целом, рассматриваемая территория является слабо дифференцированной по величине сейсмической активности ($A_{3,3}$), которая варьирует в диапазоне значений $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. При этом наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной части Свердловской обл. в пределах

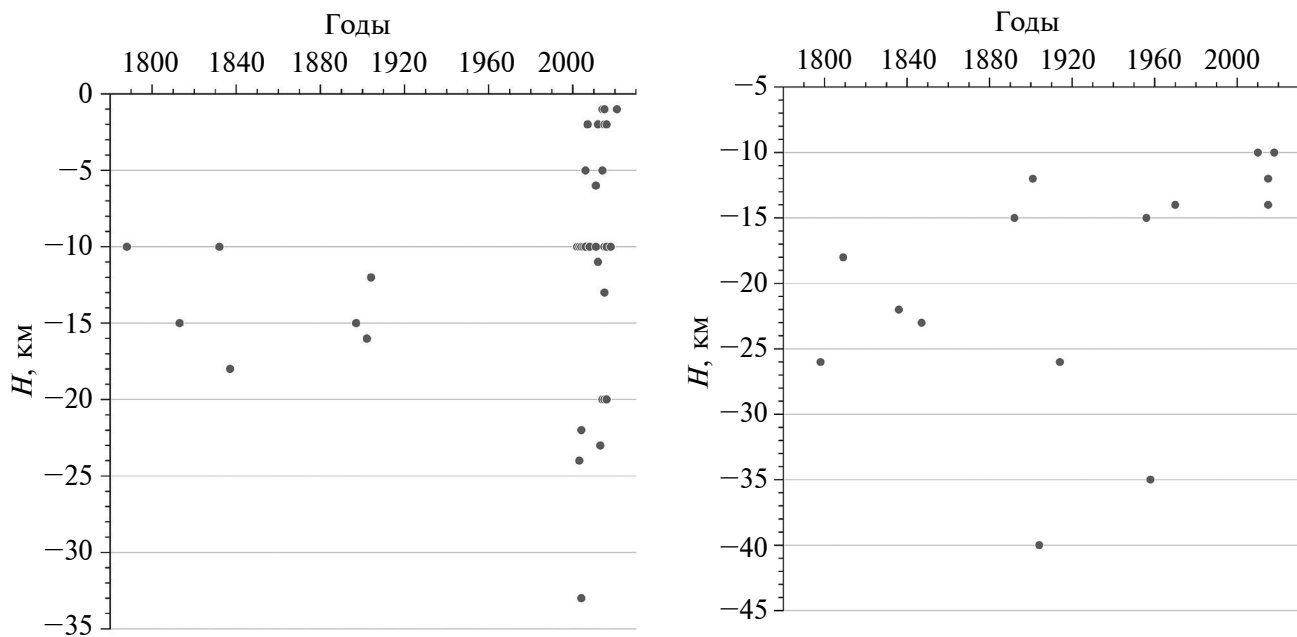


Рис. 4. Распределение гипоцентров слабых тектонических землетрясений: а — $1.5 \leq M_s \leq 3.7$, б — $3.8 \leq M_s \leq 5.3$, по глубине за период 1788–2022 гг. в пределах территории исследований.

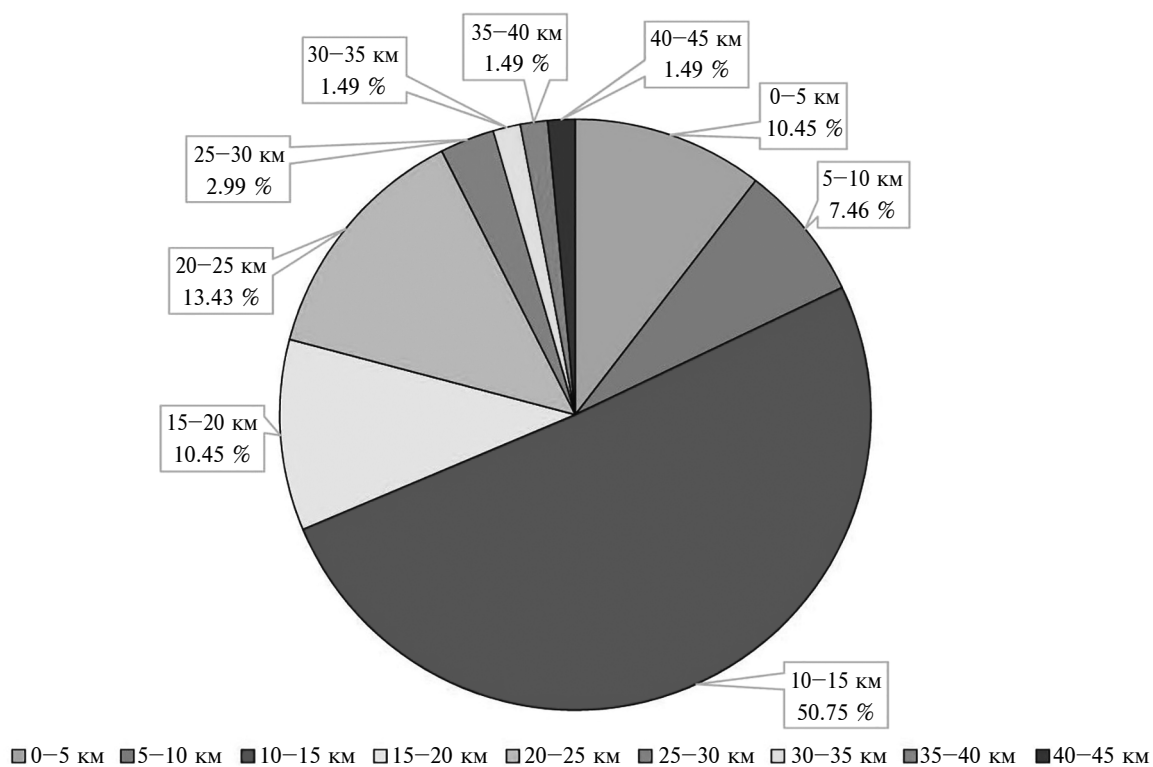


Рис. 5. Диаграмма распределения гипоцентров тектонических землетрясений по глубине за период 1788–2022 гг. в пределах территории исследований.

координат $57^{\circ}30' - 58^{\circ}$ с.ш., $58^{\circ}30' - 60^{\circ}$ в.д. Расчет сейсмической активности выполнялся по программе “seismicActivity”, реализованной на языке программирования C++ (автор: Д. Д. Бызов).

Распределение гипоцентров землетрясений по глубине

Распределение гипоцентров землетрясений по глубинам строится отдельно для сильных и умеренных [$M_S \geq 4.3$ (3.8)] и слабых [$M_S \leq 4.2$ (3.7)]. Рекомендуемый шаг распределения по глубине Δh равен 5 км [23].

Распределение гипоцентров землетрясений по глубине — важный элемент изучения сейсмического режима и позволяет судить о глубинах залегания сейсмоактивного слоя и его мощности на исследуемой территории. Эти сведения также необходимы для расчета сейсмической сотрясаемости. Представление о распределении сейсмичности по глубине в пределах всей исследуемой территории дают рис. 4, на которых отдельно представлены сведения о распределении по глубине гипоцентров слабых ($1.5 \leq M_S \leq 3.7$) и сильных и умеренных ($3.8 \leq M_S \leq 5.3$) землетрясений.

Из анализа рис. 4 в пределах территории расчета матрицы сейсмической активности $A_{3,3}$ можно выделить три основные группы, в которых гипоцентры тектонических землетрясений приурочены к интервалам глубин 0–5, 10–15 и 20–25 км. Кроме того, как можно заметить на рис. 5, наблюдается сейсмическая активность в интервале глубин 35–40 км. Сюда относятся землетрясения: 13.02.1904 г. ($M_S = 5.3$, $h = 40$ км, координаты эпицентра 56.5° с.ш., 73.6° в.д.), 13.09.1958 г. ($M_S = 3.9$, $h = 35$ км, координаты эпицентра 57.2° с.ш., 58.4° в.д.). В целом, очаги большей части ощутимых землетрясений территории исследования локализованы в интервале глубин 10–15 км (рис. 5). Этот глубинный сейсмоактивный интервал соответствует глубинам развития пород дорифейского кристаллического фундамента, что согласуется с расчетной 3D разломно-блоковой плотностной модели Урала и прилегающих территорий [10, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы впервые составлен сводный унифицированный каталог тектонических землетрясений исследуемой территории за период 1788–2022 гг., содержащий 156 событий магнитудой $M_S \leq 5.3$. На его основе, после исключения афтершоков, уточнения периодов представительной регистрации различных магнитуд построен график повторяемости тектонических событий. Положение графика ниже оси абсцисс указывает на слабую сейсмическую активность региона. Землетрясения с магнитудой $2.5 \leq M_S \leq 5.5$ происходили за период 1788–2022 гг. в среднем

с периодичностью менее 1 события в год. Полученный наклон графика повторяемости *b-value* равен 0.6446 ± 0.1093 .

Для детального знания повторяемости землетрясений различных магнитуд на рассматриваемой территории построена матрица сейсмической активности $A_{3,3}$. В целом, рассматриваемая территория слабо дифференцирована по величине сейсмической активности ($A_{3,3}$), которая варьирует в диапазоне значений $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. При этом наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной части Свердловской обл. в пределах координат $57^{\circ}30' - 58^{\circ}$ с.ш., $58^{\circ}30' - 60^{\circ}$ в.д. Фоновые значения сейсмической активности ($A_{3,3} = 0.001$) характерны для восточной части территории области, расположенной в пределах Западно-Сибирской плиты.

В пределах территории расчета матрицы сейсмической активности $A_{3,3}$ выделены три основные группы, в которых гипоцентры тектонических землетрясений приурочены к интервалам глубин 0–5, 10–15 и 20–25 км. В целом, очаги большей части ощутимых землетрясений территории исследования локализованы в интервале глубин 10–15 км.

Полученные данные являются частью работ по детальному сейсмическому районированию территории Свердловской обл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьин И. В. Сейсмологические данные по регионам: XIV. Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.). М.: Наука, 1977. С. 465–470.
2. База данных “Землетрясения России”. [Электронный ресурс]. URL: <http://eqru.gsrar.ru> (дата обращения 12.05.2023).
3. Блинова Т. С. Прогноз геодинамически неустойчивых зон. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 162 с.
4. Вейс-Ксенофонтowa З. Г., Попов В. В. К вопросу о сейсмической характеристике Урала // Тр. Сейсмологического института АН СССР. Вып. 104. М.: Изд-во АН СССР, 1940. 12 с.
5. Верхованцев Ф. Г., Габсатарова И. П., Гусева Н. С., Дягилев Р. А. Среднеуральское землетрясение 18 октября 2015 г. $M_L=4.7$, $I_0=6$ баллов // Землетрясения Северной Евразии. 2021. Вып. 24 (2015 г.). С. 314–323. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>.
6. Верхованцев Ф. Г., Дягилев Р. А. Качканарское землетрясение 29 марта 2010 г. Макросейсмические проявления // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 46–55.
7. Годзиковская А. А. Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. (Сопутствующие первичные материалы). М.: ИФЗ РАН, 2016. 258 с.

8. Гусева Н. С., Дягилев Р. А., Верхованцев Ф. Г. Макросейсмическое поле Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. XI Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 125–129.
9. Дружинин В. С., Колмогорова В. В., Парыгин Г. И. и др. Сейсмичность Урала // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 1. Землетрясения / Под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Шукина. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 263–276.
10. Дружинин В. С., Мартышко П. С., Начапкин Н. И., Осипов В. Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. 226 с.
11. Дягилев Р. А., Голубева И. В. Параметры Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. по инструментальным данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН. 2010. С. 89–93.
12. Дягилев Р. А., Гусева Н. С., Верхованцев Ф. Г. Анизотропия макросейсмического поля Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 года // Геофизика. 2016. № 5. С. 42–46.
13. Информация Службы срочных донесений // ФИЦ ЕГС РАН. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd.htm> (дата обращения: 12.05.2023)
14. Кашубин С. Н., Дружинин В. С., Гуляев А. Н., и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 124 с.
15. Коломиец А. С., Петров С. И. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 141.
16. Кондорская Н. В., Горбунова И. В., Киреев И. А., Вандышева Н. В. О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990 гг.) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 76.
17. Кусонский О. А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 280 с.
18. Лутиков А. И., Габсатарова И. П., Донцова Г. Ю. Об устойчивости параметров сейсмического режима во времени на примере востока центральной части Северного Кавказа // Российский сейсмический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 61–74.
19. Осипов В. Ю., Муравьев Л. А., Бызов Д. Д., Осипова А. Ю. Неоднородности верхов верхней мантии и кристаллической коры Урала и прилегающих территорий // Уральский геофизический вестник. 2022. № 2(48). С. 41–55. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.2.5.41>
20. Раутиан Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1964. № 32 (199). С. 88–93.
21. Раутиан Т. Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. Глава 4. Труды ИФЗ АН СССР / Отв. ред. Ю. В. Ризниченко. М.: Изд-во АН СССР, 1960. № 9 (176). С. 75–113.
22. Ризниченко Ю. В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985, 408 с.
23. Свод правил СП 286.1325800.2016. Объекты строительства повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. Минстрой России, 2016. 29 с.
24. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю. В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 190 с.
25. Сейсмическое районирование территории СССР / Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.
26. Сейсмологический мониторинг Западного Урала [Электронный ресурс]. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tc&cat (дата обращения: 12.05.2023)
27. Степанов В. В., Годзиковская А. А., Ломакин В. С. и др. Землетрясения Урала и сильнейшие землетрясения прилегающих территорий Западной Сибири и Восточно-Европейской платформы. М.: ЦСГНЭО, 2002. 135 с.
28. Gutenberg, B., Richter, C. F. Frequency of Earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America., 1944. № 34. P. 185–188.

SEISMICITY AND SEISMIC MODE IN SVERDLOVSK REGION

A. Yu. Osipova^{a, #}, V. Yu. Osipov^a, D. D. Byzov^a

^aBulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Amundsena, 100, Yekaterinburg, 620016 Russia

[#]E-mail: seismolab@mail.ru

Sverdlovsk region is a major industrial center. There are mining enterprises, chemical plants, reservoirs, and high-capacity power plants. These objects are located close to large settlements. Currently, about 400 seismic events are recorded in the region annually. These are industrial explosions, rock bursts, rock tectonic events and tectonic earthquakes. Tectonic earthquakes are rare. For the period 1788–2022, about 30 tectonic earthquakes were recorded in Sverdlovsk region. The intensity of earthquakes at the epicenters was up to 5.0–6.0 on the MSK-64 scale. To ensure the seismic safety of objects of increased responsibility and especially important engineering structures, it is necessary to carry out

studies on detailed seismic zoning of the territory under consideration. The article presents the results of seismological studies. Consolidated unified catalogue of seismic events that occurred in the Urals region was compiled. Historical and instrumental catalogue data for the period 1788–2022 served as the basis. In this paper, a repeatability graph is presented. The graph position below the abscissa scale indicates weak seismic activity in the region. Earthquakes with a magnitude of $2.5 \leq M_s \leq 5.5$ occurred over the period 1788–2022 on average with a frequency of less than 1 event per year. The resulting slope of the *b-value* repeatability graph is 0.6446 ± 0.1093 . For a detailed knowledge of the repetition of earthquakes of various magnitudes in the area under consideration, a matrix of seismic activity $A_{3,3}$ was constructed. In general, the observed area is weakly differentiated in terms of seismic activity ($A_{3,3}$), which varies in the range of $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. At the same time, the highest values of $A_{3,3}$ are observed in the western part of Sverdlovsk region within the coordinates $57^{\circ}30' - 58^{\circ}$ N, $58^{\circ}30' - 60^{\circ}$ E. The background values of seismic activity ($A_{3,3}=0.001$) are typical for the eastern part of the Sverdlovsk region, located within the West Siberian plate. In the study area, the sources of most of perceptible earthquakes are localized in the depth interval of 10–15 km, which corresponds to the depths of the pre-Riphean crystalline basement rocks.

Keywords: earthquake catalogue, repeatability graph, seismic activity, seismic mode, magnitude

REFERENCES

- Anan'in, I.V. [Seismological data by regions: XIV. European part of the USSR, Urals, and the Western Siberia]. In: [New catalog of strong earthquakes in the USSR territory (from the ancient times till 1975)]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 465–470. (in Russian)
- Database on the earthquakes in Russia. Online resource. URL: <http://eqru.gsr.ru> (accessed 12.05.2023). (in Russian)
- Blinova, T.S. [Forecast of geodynamically unstable zones]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2003, p. 162. (in Russian)
- Veis-Ksenofontova, Z.G., Popov, V.V. [About seismological characteristics of the Urals]. Proc. Seismological Institute USSR Academy of Sciences. Issue 104. Moscow, AN SSSR Publ., 1940, p. 12. (in Russian)
- Verkholtantsev, F.G., Gabsatarova, I.P., Guseva, N.S., Dyagilev, R.A. [The MidUrals earthquake on October 18, 2015. $M_L=4.7$, $I_0=6$]. In: [The North Eurasian earthquakes]. Issue 24 (2015), 2021, pp. 314–323. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>. (in Russian)
- Verkholtantsev, F.G., Dyagilev, R.A. [The Kachkanar earthquake on March 29, 2010. Macro seismic manifestations]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. V Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2010, pp. 46–55. (in Russian)
- Godzikovskaya, A.A. [Catalog of seismic events in the Urals region from the ancient times till 2002 (Related primary data)]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2016, 258 p. (in Russian)
- Guseva, N.S., Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G. [Macro seismic field of the MidUrals earthquake on October 18, 2015]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. XI Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2016, pp. 125–129. (in Russian)
- Druzhinin, V.S., Kolmogorova, V.V., Parygin, G.I., et al. [Seismicity of the Urals]. In: [Earthquakes and micro seismicity in the tasks of modern geodynamics of the East European platform. Book 1. Earthquakes]. N.V. Sharov, A.A. Malovichko, Yu.K. Shchukin, Eds. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2007, pp. 263–276. (in Russian)
- Druzhinin, V., Martyshko, P.S., Nachapkin, N.I., Osipov, V.Yu. [Structure of the upper lithosphere and oil and gas content in the Urals region bowels]. Yekaterinburg, IGF UrO RAN Publ., 2014, 226 p. (in Russian)
- Dyagilev, R.A., Golubeva, I.V. [The parameters of Kachkanar earthquakes on March 29, 2010 by instrumental data]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. V Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2010, pp. 89–93. (in Russian)
- Dyagilev, R.A., Guseva, N.S., Verkholtantsev, F.G. [Anisotropy of macro seismic field on the MidUrals earthquake on October 18, 2015]. *Geofizika*, 2016, no. 5, pp. 42–46. (in Russian)
- Early alert service information. Federal research center. Geophysical survey. Online resource. URL: <http://www.ceme.gsr.ru/new/ssd.htm> (accessed: 12.05.2023) (in Russian)
- Kashubin, S.N., Druzhinin, V.S., Gulyaev, A.N., et al. [Seismicity and seismic zoning of the Urals region]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2001, 124 p. (in Russian)
- Kolomiyets, A.S., Petrov, S.I. [The Eastern part of the Baltic shield]. In: [Earthquakes in the Northern Eurasia in 1995]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2001, pp. 141. (in Russian)
- Kondorskaya, N.V., Gorbunova, I.V., Kireyev, I.A., Vandysheva, N.V. [About compilation of a unified catalog of strong earthquakes in the Northern Eurasia by instrumental data (1901–1990)]. In: [Seismicity and seismic zoning of the Northern Eurasia]. Issue 1., Moscow, IFZ RAN Publ., 1993, 76 p. (in Russian)
- Kusonskii, O.A. [Geophysical observation studies in the Urals]. Yekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 2012, 280 p. (in Russian)
- Lutikov, A.I., Gabsatarova, I.P., Dontsova, G.Yu. [About time stability of seismic regime parameters by the example of the eastern segment on the central part of the Northern Caucasus]. *Rossiiskii seismicheskii zhurnal*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 61–74. (in Russian)
- Osipov, V.Yu., Murav'ev, L.A., Byzov, D.D., Osipova, A.Yu. [Heterogeneity in the upper part of the upper mantle and the crystalline crust of the Urals and the adjacent territories]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2022, no. 2(48), pp. 41–55. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.2.5.41> (in Russian)

20. Rautian, T.G. [About determination of the earthquake energy at a distance to 3000 km]. *Ekspertimental'naya seismika. Trudy IFZ AN SSSR*. 1964, no. 32 (199), pp. 88–93. (in Russian)
21. Rautian, T.G. [Energy of earthquakes]. *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Trudy IFZ AN SSSR*, 1960, no. 9 (176), pp. 75–113. (in Russian)
22. Riznichenko, Yu.V. [Selected works. Problems in seismology]. Moscow, Nauka, 1985, 408 p. (in Russian)
23. [Construction rules. SP 286.1325800.2016. Construction objects of high responsibility. Rules of detailed seismic zoning]. Minstroj Rossii, 2016, 29 p. (in Russian)
24. [Seismic shaking of the USSR territory]. Yu. V. Riznichenko, Ed. Moscow, Nauka Publ., 1979, 190 p. (in Russian)
25. [Seismic zoning of the USSR territory]. V.I. Bune, G.P. Gorshkov, Eds. Moscow, Nauka Publ., 1980, 308 p. (in Russian)
26. [Seismologic monitoring of the Western Urals]. Online resource. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tc&at (accessed 12.05.2023) (in Russian)
27. Stepanov, V.V., Godzikovskaya, A.A., Lomakin, V.S., et al. [The Urals earthquakes and the strongest earthquakes in the adjacent territories of the Western Siberia and the East European platform]. Moscow, TsSGNEO Publ., 2002, 135 p. (in Russian)
28. Gutenberg, B., Richter, C.F. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, no. 34, pp. 185–188.