

УДК 550.394.4

Расчётное уточнение исходной сейсмичности на примере территории г. Салават, Республика Башкортостан

Д.Ю. Шулаков^а, О.Н. Ковин^б, Ю.В. Баранов^а^аФГБУН Горный институт УрО РАН

614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а. E-mail: shulakov@mi-perm.ru

^бПермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: on_kovin@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 15 октября 2022 г.)

В ходе работ выполнен анализ региональных сейсмических каталогов, предоставленных разными агентствами, на основании чего были получены параметры сейсмического режима и региональное макросейсмическое уравнение для исследуемого района. Полученные данные послужили основой для расчета уточненного значения исходной сейсмичности для территории города Салават, Республика Башкортостан.

Ключевые слова: *уточнение исходной сейсмичности; уравнение сейсмического режима; региональное макросейсмическое уравнение; сейсмичность.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.351

Введение

Одним из основных факторов, влияющих на безопасность функционирования различных сооружений, является сейсмическое воздействие природного характера. В настоящее время в зависимости от задач и масштаба исследований рассматриваются три типа сейсмического районирования (Уломов, 2009). Во-первых, это общее сейсмическое районирование (ОСР), которое проводится для территории всей страны, учитывая осредненные условия воздействия сейсмических волн на объекты на больших территориях. Детальное сейсмическое районирование (ДСР) ограничивается характеристикой отдельных площадей и регионов и учитывает региональные особенности физических свойств грунтов. Сейсмическое микрорайонирование (СМР) проводится для локальных объектов и населенных пунктов и обычно требует инструментального определения свойств грунтов на участке исследований.

Так как свойства грунтов и сейсмичности отдельного региона или населенного пункта могут отличаться от тех, которые учитывались при расчете ОСР, при детальном районировании требуется уточнение сейсмической опасности (УСО) или уточнение исход-

ной сейсмичности (УИС) согласно данным инструментальных и расчетных методов, полученных для условий исследуемой территории (СП 14.13330, 2018). При проведении ДСР, если отсутствуют результаты инструментальных наблюдений, допускается расчётное уточнение исходной сейсмичности (СП 283.1325800, 2016). Уточнение исходной сейсмичности выполняется для корректировки величины сейсмической опасности, определенной по картам общего сейсмического районирования (ОСР), на основании данных о геологическом, сеймотектоническом строении и сейсмическом режиме региона. Оно базируется на вероятностной оценке расчетной магнитуды ожидаемых на данной территории сейсмических событий. В ходе работ выполнен анализ региональных сейсмических каталогов, предоставленных разными агентствами, на основании чего были получены параметры сейсмического режима и региональное макросейсмическое уравнение для района г. Салават, Республика Башкортостан. Полученные данные послужили основой для расчета уравнения сейсмического режима и для получения уточненного значения исходной сейсмичности.

Оценка сейсмичности района г. Салават по данным исторических и инструментальных каталогов

Определение особенностей сейсмического режима в окрестностях г. Салават проводилось на основании анализа каталогов землетрясений, базирующихся как на исторических данных, так и на инструментальных наблюдениях. В первую очередь были использованы два каталога, непосредственно создававшихся для задач сейсмического районирования – «Новый каталог сильных землетрясений ...» (Кондорская, 1977) и «Специализированный каталог землетрясений ...» (2022). Для расширения представительности данных в область низких магнитуд был использован инструментальный каталог землетрясений, формируемый Федеральным исследовательским центром Единой геофизической службой РАН (ФИЦ ЕГС РАН) и охватывающий период с 2003 по 2021 гг. (База данных...). В случае, когда землетрясение встречается в нескольких каталогах, приоритет отдавался источнику (Специализированный каталог...), поскольку он является более поздним и характеризуется более глубоким анализом исходных данных.

Дополнительно был выполнен анализ каталогов зарубежных сейсмологических агентств – ISC (Великобритания), EMSC-CSEM (Евросоюз), IRIS и USGS (США). В результате было установлено, что все они характеризуются высокой степенью «засоренности» технологическими взрывами на горнодобывающих объектах и «ложными» землетрясениями, возникающими при автоматической обработке данных сейсмостанций. Это делает данные каталоги непригодными для решения поставленной задачи.

В результате анализа доступных данных был составлен сводный каталог, включающий в себя 51 землетрясение, произошедшее с 1830 по 2021 гг. на расстоянии до 500 км от г. Салават. Данный радиус значительно больше, чем обычно используемый для оценки сейсмического режима территории, но эта величина обусловлена очень низким уровнем сейсмической активности в пределах Южного Урала. Меньшая площадь не

обеспечивает достаточного объема данных землетрясений для проведения анализа. Схема расположения эпицентров данных землетрясений представлена на рис. 1, а сам каталог дан в табл. 2 приложения.

Расчет параметров сейсмического режима в окрестностях г. Салават

На основании сформированного каталога и с учетом периодов времени, охваченных разными источниками данных, был выполнен расчет обобщенного графика повторяемости землетрясений, приведенный к территории радиусом в 300 км от г. Салават. Данный график представлен на рис. 2.

Как видно из него, диапазон представительности по магнитудам, определяемый по линейной части графика, составляет $3 \leq M \leq 5$. Землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$ за исторический период на данной территории не происходило, а землетрясения с магнитудой $M < 3$ регистрируются не представительно (с пропусками) из-за большого расстояния до ближайших сейсмостанций.

В пределах представительного диапазона магнитуд график повторяемости с высокой степенью достоверности ($R=0.95$) аппроксимируется зависимостью

$$\lg N = 2.72 - 1.0 M, \quad (1)$$

где N – среднегодовое количество землетрясений с магнитудой $\geq M$, происходящее в пределах рассматриваемой площади.

Окрестности г. Салават характеризуются крайне низким уровнем природной сейсмической активности (как количеством землетрясений, так и их магнитудой). В связи с этим выявление сейсмически активных разломов здесь не представляется возможным. Поэтому для описания условий возникновения таких землетрясений при проведении сейсмического районирования принята модель рассеянной сейсмичности, согласно которой их очаги во зникают случайным образом в пределах некоторых блоков земной коры (литосферы), рассматриваемых как площадные (объемные) зоны возможных очагов землетрясения (ВОЗ) – домены.

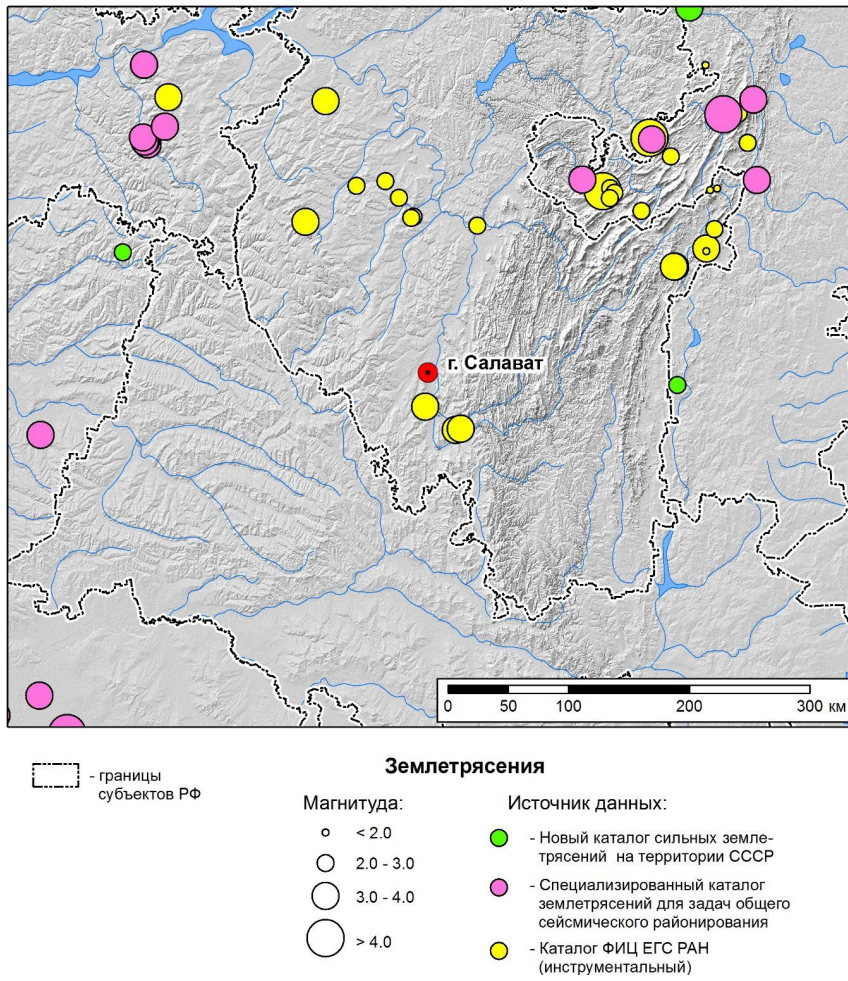


Рис. 1. Схема пространственного расположения эпицентров землетрясений в районе г. Салават

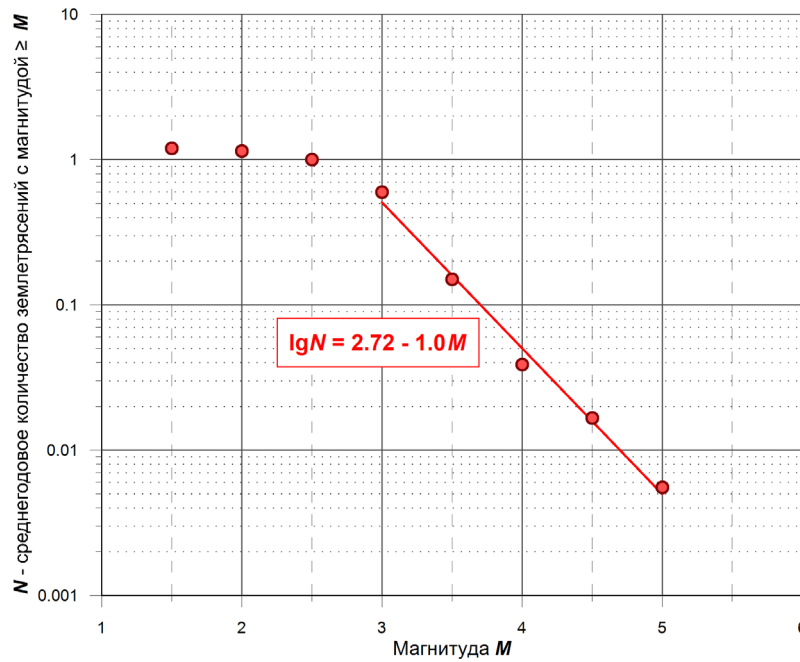


Рис. 2. Обобщенный нормированный график повторяемости землетрясений в радиусе 300 км от г. Салават

В настоящее время выделение и параметризация сейсмогенерирующих доменов для изучаемой территории наиболее глубоко проработаны в исследовании (Общее сейсмическое..., 2016). Карта сейсмодоменов для района г. Салават, сформированная согласно этому источнику, представлена на рис. 3.

Как видно из представленной карты, каждый из доменов характеризуется максимальной магнитудой землетрясений, которые могут возникнуть в его пределах M_{max} . При этом частота возникновения землетрясений с магнитудой $M < M_{max}$ может быть определена на основании уравнения (1) с поправкой на площадь домена.

Методика уточнения исходной сейсмичности

Конечной целью уточнения исходной сейсмичности (УИС) является получение для конкретного географического пункта уравнения сейсмического режима:

$$I_{ym} = a + b \cdot \lg T, \quad (2)$$

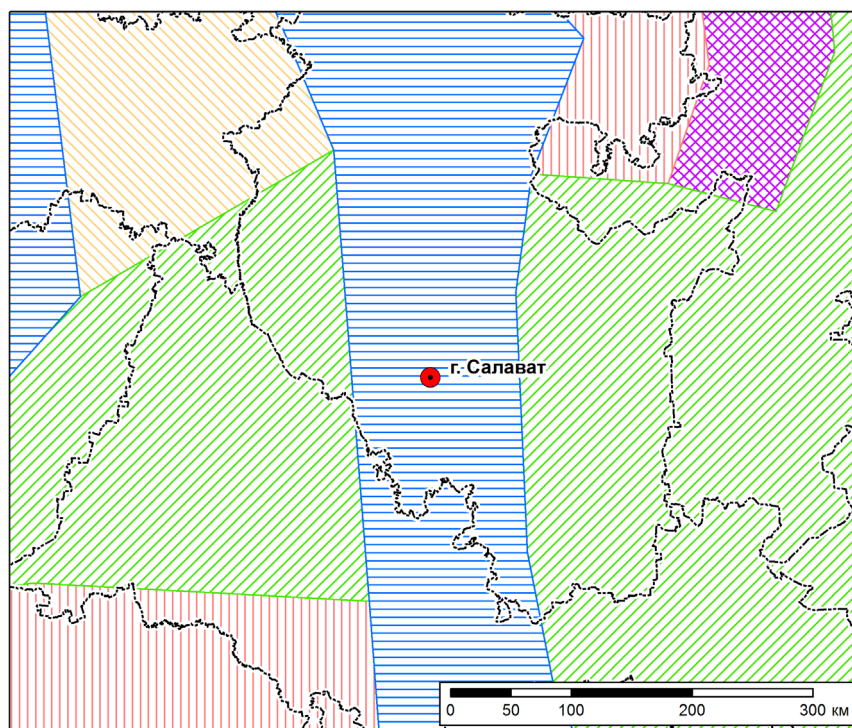
где a , b – коэффициенты уравнения сейсмического режима; T – средний промежуток времени, измеряемый в годах, между землетрясениями силой I_{ym} в месте строительства. Данное уравнение рассчитывается на основе всей совокупности данных о параметрах сейсмичности в данном регионе.

По зависимости (2) может быть определена уточненная сила землетрясения I_{ym} с точностью до 0.1 балла применительно к ровным участкам местности, сложенным средними по сейсмическим свойствам грунтами, для заданного T в интервале от 500 до 5000 лет.

Применительно к рассматриваемому объекту основой для расчетов уточненной сейсмической опасности являются следующие данные, характеризующие сеймотектонические и геологические особенности региона:

1. Величина сейсмического воздействия от землетрясения может быть описана региональным вариантом уравнения Шебалина-Блейка:

$$I = a \cdot M - b \cdot \lg \sqrt{D^2 + h^2} + c, \quad (3)$$



Сейсмодомены и их максимальная магнитуда:
 - границы субъектов РФ
 3.5 4 4.5 5 5.5

Рис. 3. Карта сейсмодоменов в районе г. Салават, согласно (Общее сейсмическое..., 2016)

где I – интенсивность колебаний в баллах MSK-64; M – магнитуда землетрясения; D – расстояние до эпицентра, км; h – глубина очага, км, a , b и c – региональные коэффициенты. Согласно п.12 ГОСТ Р 57546-2017, для изучаемой территории $a=1.5$, $b=3.5$, $c=3.0$.

2. Сейсмическая опасность определяется землетрясениями, происходящими в пределах выделенных сейсмодоменов, каждый из которых характеризуется максимальной магнитудой M_{max} .

$$\lambda(I \geq I_0) = \sum_{i=1}^{N_s} v_i \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} P[I(m, r) \geq I_0 | m_j, r_k] f(M_i = m_j) f(R_i = r_k) \quad (4)$$

где $f_{M_i}(r)$ – функция плотности вероятности магнитуд, описывающая вероятность события с магнитудой, заданной в определенных пределах; $f_{R_j}(r)$ – функция плотности вероятности расстояния от гипоцентра до исследуемого участка; $P[I(m, r) \geq I_0 | m_j, r_k]$ – вероятность превышения интенсивности I_0 в случае, если землетрясение магнитудой m произошло на расстоянии r ; v_i – частота возникновения землетрясений магнитудой больше минимальной m_{min} для отдельного источника i из общего числа источников N_s .

Таким образом, итоговая вероятность превышения заданной интенсивности колебаний в течение какого-то периода времени представляется как сумма вероятностей превышения этой интенсивности от землетрясений в каждой из сейсмогенерирующих зон.

3. Средняя повторяемость землетрясений в пределах каждого из доменов описывается уравнением (1), представляющим собой закон Гуттенберга-Рихтера с региональными коэффициентами.

Для оценки сейсмической опасности на рассматриваемой территории применялся вероятностный метод. Сущность этого метода заключается в вычислении вероятности λ , при которой уровень колебаний грунта I_0 будет достигнут или превышен величиной I (Baker, 2021):

Уточнение исходной сейсмичности исследуемой территории

Территория г. Салават находится в пределах одного из наименее активных сейсмодоменов ($M_{max}=3.5$). При этом расстояние до доменов с $M_{max}=5.0$ и более составляет не менее 190 км (рис. 3). На основании изложенной выше методики был выполнен расчет средней повторяемости колебаний с интенсивностью от 4 до 6 баллов по шкале MSK-64. Результаты расчетов показали, что в рамках используемой модели землетрясения с интенсивностью более 6 баллов на данном участке невозможны.

Интенсивности землетрясений, возможных на исследуемой территории, и расчетные периоды их повторяемости представлены в табл. 1.

Таблица 1. Периоды повторяемости землетрясений для района исследований

I, баллы MSK-64	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Период повторяемости, годы	299	761	2068	5952	18810

В графическом виде эти данные представлены на рис. 4. Как видно из него, расчетные значения с высокой достоверностью ($R=0.99$) аппроксимируются уравнением сейсмического режима

$$T = 0.0714 e^{2.068I} \quad (5)$$

или в другом представлении

$$I = 0.533 \ln(28.8T) \quad (6),$$

где I – интенсивность землетрясения в баллах MSK-64, T – период повторяемости землетрясений подобной интенсивности.

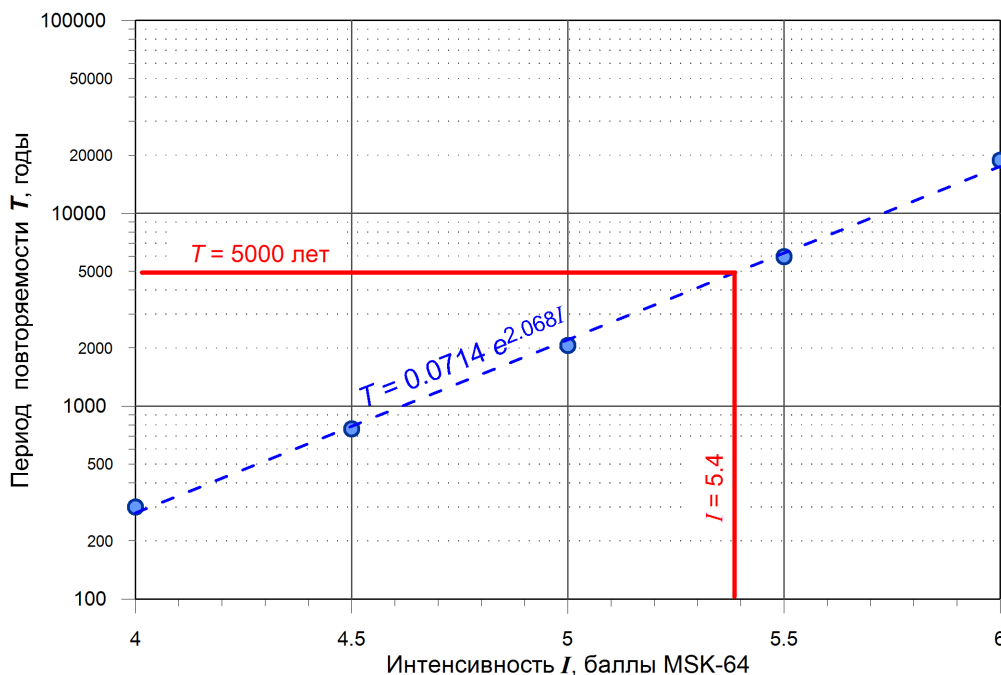


Рис. 4. График сейсмического режима для района г. Салават

Уровень ответственности объекта выбран соответствующим карте ОСР-2015 (С). Соответственно, уточненная сила землетрясения для данного объекта определяется для периода повторяемости $T=5000$ лет. Согласно уравнению сейсмического режима (6), уточненное значение сейсмичности исследуемого объекта составляет $I=5.4$ балла шкалы MSK-64, а поправка, учитывающая сейсмический режим местности, $\delta I_{с.р.} = -0.6$.

Заключение

Распространение требований оценки возможного воздействия землетрясений на строительные объекты в зонах повышенной сейсмичности на всей территории России ведет к необходимости оптимизации методов расчета для районов с низким её уровнем. В данном примере рассчитано уточненное значение сейсмичности для территории г. Салават, которое может быть использовано в практических целях. Представленную методику можно использовать для расчета УИС других территорий с сейсмичностью по шкале MSK-64 6 баллов и ниже. Расчет УИС для территорий с более высокой сейсмичностью возможно потребует дополнительной информации о параметрах и распределении

очагов землетрясений, элементах тектоники и свойствах местных грунтов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер 122012000401-7)

Библиографический список

База данных «Землетрясения России». ФИЦ ЕГС РАН. [Электронный ресурс] URL: <http://eqru.gsras.ru/index.php>, (дата посещения 23.09.2022)

ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.

Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.) Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г., Наука, Москва, 1977, 536 с.

Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 // Инженерные изыскания. № 7. 2016. С. 49 – 60.

СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП 11-7 – 81. М.: Стандартинформ, 2018. 122 с.

СП 283.1325800.2016 Свод правил. Объекты строительные повышенной ответственности.

Правила сейсмического микрорайонирования. М.: Стандартинформ. 2017.

Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Под ред. В.И. Уломова, Н.С. Медведевой. М.: ИФЗ РАН. [Электронный ресурс] URL: [http://seismos-](http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf)

[u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf](http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf) (дата посещения 26.09.2022)

Уломов В.И. Об инженерно-сейсмологических изысканиях в строительстве // Инженерные изыскания. № 9. 2009. С. 28–39.

Baker J.W., Bradley B.A., Stafford P.J. Seismic Hazard and Risk Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2021. 79 p

Calculated Correction of the General Seismic Hazard Rate for an Example of Territory of the City of Salavat, Republic of Bashkortostan

D.Yu. Shulakov^a, O.N. Kovin^b, Yu.V. Baranov^a

^aMining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

78a Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia. E-mail: shulakov@mi-perm.ru

^bPerm State University

15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: on_kovin@psu.ru

In course of the study, an analysis of the regional earthquake catalogues, issued by different institutions, was fulfilled providing the basis for determination of the seismic regime parameters and regional macroseismic equation on the area of investigation. The obtained data made it possible to calculate the corrected value of general seismicity rate for territory of the city of Salavat, Bashkortostan.

Key words: *correction of general seismicity rate; seismic regime equation; regional macroseismic equation; seismicity.*

References

Baza dannykh «Zemletryaseniya Rossii» [Data base «Earthquakes of Russia»]. FITs EGS RAN. URL: <http://eqru.gsras.ru/index.php> (Access date 09.23.2022)

GOST P 57546-2017 Zemletryaseniya. Shkala seysmicheskoy intensivnosti. [GOST P 57546-2017 Earthquakes. Seismic intensity scale]. Standartinform. Moskva, 2017, p. 32.

Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (Eds.) Novyy katalog sil'nykh zemletryaseny na territorii SSSR s drevneyshikh vremyon do 1975 g. [New catalog of strong earthquakes on territory of USSR from ancient times to 1975]. Nauka, Moskva, 1977, p. 536. (in Russian)

Obshchee seysmicheskoe rayonirovanie territorii Rossiyskoy Federatsii. Poyasnitel'naya zapiska k kompletu kart OSR-2016 [*General seismic zonation of territory of the Russian Federation. Explanation notes for collection of the maps OSR-2016*]. Inzhenernye izyskaniya. 2016. 7:49 – 60. (in Russian)

SP 14.13330.2018 Svod pravil. Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh [SP 14.13330.2018 Code of practice. Construction on seismic territories]. Standartinform, Moskva, 2018, p. 122. (in Russian)

SP 283.1325800.2016 Svod pravil. Obekty stroitel'nye povyshennoy onvetstvennosti. Pravila seysmicheskogo mikrorayonirovaniya [SP 283.1325800.2016 Code of practice. Construction facilities of high concern. Regulations of seismic microzonation]. Standartinform, Moskva, 2017.

Spetsializirovannyi katalog zemletryaseny dlya zadach obshchego seysmicheskogo mikrorayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii [Special catalog of earthquakes for general seismic zonation of Russian Federation territory]. V.I. Ulomov, N.S. Medvedeva, Eds. IFZ RAN. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf> (access date 09.26.2022)

Ulomov V.I. 2009. Ob inzhenerno-seysmologicheskikh izyskaniyakh v stroitel'stve [About engineering-seismological surveys in construction]. Inzhenernye izyskaniya. 9:28-39. (in Russian)

Baker J.W., Bradley B.A., Stafford P.J. Seismic Hazard and Risk Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2021, p. 79.

Приложение

Таблица 2. Сводный каталог землетрясений, произошедших в радиусе 500 км от г. Салават

№ п/п	Дата и время (UTC)	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Глубина, км	Магнитуда M _{LN}
1	1830.01.01	50.7	50.9	10	4
2	1836.12.12	55.3	59.7	18	4.2
3	1837.03.01	55.4	60.1	8	3.7
4	1851.12.27 10:30:00	55.6	52.1	5	3.5
5	1866.11.28 14:00:00	54.50	54.30	5	3.7
6	1892.07.10 09:52:00	56.5	60.9	15	4.7
7	1901.12.08 11:00:00	54.8	60.1	12	3.6
8	1902.09.19 17:03:00	56.1	59.3	12	3.5
9	1904.09.02 10:20:00	54.50	56.50	0.1	2.5
10	1914.08.29 06:00:00	55.00	59.00	0.5	2.8
11	1914.10.20 19:30:00	54.2	52	4	2.8
12	1930.12.13 18:00:00	53.3	59	5	2.5
13	1982.10.28 00:00:00	55.06	52.15	5	3.3
14	1986.08.09 03:40:47	52.8	51.15	10	3.5
15	1986.09.23 00:54:04	55.04	52.2	5	3.8
16	1986.09.23 01:04:30	55.03	52.18	5	3.4
17	1986.09.24 01:58:35	55.01	52.22	4	3.9
18	1988.07.15 07:08:52	55.15	52.43	5	3.3
19	1989.05.14 11:46:56	50.87	51.38	0	3.5
20	1990.05.28 00:35:13	55.14	58.73	0.4	2.6
21	1990.05.28 00:35:50	55.14	58.73	0.4	4.2
22	1990.05.28 02:41:27	55.14	58.73	0.4	4.4
23	1992.12.31 10:38:31	54.75	59.58		1.5
24	1993.09.10 13:22:12	54.74	59.49		1.5
25	1993.10.05 06:00:44	55.67	59.49		1.5
26	1994.07.28 19:11:31	55.13	58.76	4	3.5
27	2002.08.18 15:23:18	55.08	60.00		2.7
28	2003.10.15 11:21:28	55.30	59.90		2.5
29	2004.07.07 00:31:24	54.60	58.60	33	2.3
30	2004.07.07 00:46:51	54.74	58.26	22	2.8
31	2006.07.04 20:29:41	54.77	58.21	3	3.0
32	2006.10.02 05:37:59	54.84	57.85	0	3.3
33	2006.10.02 05:45:55	54.70	58.20		2.4
34	2007.05.21 01:52:31	55.40	54.50		3.1
35	2008.04.26 13:14:53	50.61	51.74	17	4.8
36	2008.05.05 14:59:20	56.19	60.33		2.7
37	2008.05.29 11:03:23	55.37	52.45		4.0

Таблица 2. Окончание

№ п/п	Дата и время (UTC)	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Глубина, км	Магнитуда MLH
38	2011.03.11 23:15:07	53.15	55.87	10	3.6
39	2011.11.25 16:41:22	52.98	56.25	6	3.4
40	2012.04.08 13:19:35	52.99	56.31	11	3.3
41	2012.09.05 20:11:03	54.31	59.42	1.4	3.4
42	2014.03.17 23:00:35	54.18	59.00	5	3.1
43	2014.05.20 18:26:21	54.55	55.65	4	2.8
44	2014.09.01 14:51:51	54.70	55.49	20	2.8
45	2014.11.01 11:13:10	54.45	59.53	1	2.5
46	2015.06.08 22:55:37	54.56	55.68	20	3.0
47	2016.01.24 05:27:04	54.78	54.94	20	2.6
48	2016.03.25 15:47:22	54.82	55.31	10	2.1
49	2016.04.03 04:53:20	54.18	59.01	10	3.3
50	2018.09.04 22:58:19	54.75	58.11	5.9	5.4
51	2021.12.16 20:53:37	54.29	59.42	1	1.6