

УДК 550.34

ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННОЙ И ТЕКУЩЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПЛОЩАДОК ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

Бугаев Е. Г., д.т.н. (bugaev@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),
Кишкина С. Б., к.ф.-м.н. (svetlank@gmail.com) (ИДГ РАН)

На примере анализа условий площадки Балтийской АЭС проведена оценка долговременной и текущей сейсмической опасности. Достоверность полученных результатов контролируется имеющимися сейсмологическими данными и оценками ОСР-97. Предлагаемая методика позволяет формализовать выявление места, оценку магнитуды и частоты максимальных землетрясений, а также определить долговременную и текущую сейсмическую опасность.

► **Ключевые слова:** земная кора, модель, упругий предел, скорость деформации, магнитуда, вероятностная оценка, сейсмическая опасность.

ASSESSMENT LONG-TERM AND CURRENT SEISMIC HAZARD OF OIAE SITE ON BASIS OF MATERIALS OF ENGINEERING RESEARCHES

Bugaev E., Ph. D. (SEC NRS), Kishkina S., Ph. D. (IDG RAS)

Assessment long-term and current seismic hazard is executed on the example of the Baltic NPP site. Reliability of the received results are controlled taking into account available restricted, but reliable seismological yielded and results of OSR-97. The offered technique allows to formalize identification of the place, assessment of magnitude and frequency of the maximal earthquakes, their indeterminacies and also determination long-term and current seismic hazard.

► **Key words:** crust, model, resilient limit, deformation speed, magnitude, probability assessment, seismic hazard.

Введение

Актуальность оценки долговременной и текущей сейсмической опасности определяется необходимостью получения исходных данных для выполнения вероятностных анализов безопасности при обосновании достижения целевых ориентиров безопасности [1]. Согласно рекомендациям [2] при вероятностном анализе безопасности может потребоваться учет весьма редких сейсмических событий на площадке атомной станции ($\sim 10^{-8}$ в год). Результаты общего сейсмического районирования (ОСР) территории Российской Федерации (ОСР-97 и ОСР-2015) не пригодны для решения этих задач, так как оценки максимальных землетрясений (M_{\max}) ограничиваются событиями с вероятностью 10^{-4} в год и более. Сильные сейсмические события происходят не только в сейсмически активных областях, но и случаются на платформенных территориях. Так, на Североамериканской платформе произошла серия землетрясений (г. Нью-Мадрид, 1811 – 1812 гг.) с магнитудой до $M \sim 8,1$. На Восточно-Китайской платформе произошла серия сильных землетрясений (1966 – 1975 гг.), одно из которых – Хайченское (1975 г.) было успешно предсказано, а следующее за ним катастрофическое, Тяньшанское (1976 г.) с $M \sim 8,0$ – пропущено. На Туранской платформе произошла серия Газлийских землетрясений с магнитудой до $M \sim 7,3$ (1976 и 1984 гг.), после которых район города Газли отнесли к высокосейсмичным районам Земли, хотя до 1976 г. район Газли относился к району 4-балльных землетрясений по 12-балльной шкале MSK-64.

На возможность проявления в активных областях и слабоактивных территориях максимальных землетрясений одинаковой M_{\max} , но разной частоты еще в начале 50-х гг. прошлого века указывал Г. А. Гамбурцев [3]. Тем не менее при ОСР до настоящего времени принята концепция, согласно которой при оценке сейсмической опасности учитываются равновероятные события и каждая территория характеризуется своим максимальным землетрясением. Для доменов на слабоактивной территории платформы M_{\max} существенно более низкие, по сравнению с величинами M_{\max} доменов, линеаментов и очаговых зон активных областей. Для исключения так называемого «пропуска цели» (редкого сильного землетрясения) была разработана методика [4, 5, 6], позволяющая на основании материалов инженерных изысканий и исследований формально – то есть с минимальным влиянием субъективного взгляда исследователя – выявить место, оце-

нить магнитуду и повторяемость максимального землетрясения и, кроме того, выполнить оценку неопределенности результатов и получить исходные данные для расчета долговременной и текущей сейсмической опасности [4, 7, 8]. Достоверность полученных результатов контролируется имеющимися сейсмологическими данными, включая исторические землетрясения, палеоземлетрясения и микроземлетрясения [5, 6].

О методике оценки предельных графиков повторяемости

Методика оценки предельных графиков повторяемости базируется на модели, которая отражает дискретные свойства земной коры [4, 5]. Основные характеристики модели – это размер максимального элемента модели L_1 (км) и коэффициент подобия k_n . Размер максимального элемента модели L_1 выбирается соответствующим протяженности максимальной геодинамической зоны района. Коэффициент подобия k_n на основании анализа соотношения протяженности активных разломов и размеров приуроченных к ним очагов землетрясений, а также протяженностей геодинамических зон различных рангов в районах размещения атомных станций принимается равным $\sqrt{10}$. Коэффициент подобия k_n определяет соотношение размеров составных элементов модели: $L_n / L_{n+1} = k_n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Известно, что дискретные свойства земной коры описываются свойствами геометрической прогрессии, что позволяет формализовать оценку размеров L_n элементов модели и суммарное количество $N_c(n)$ элементов ранга n и более до максимального размера ($n = 1$) включительно. Размер элементов модели соответствует эффективному размеру геодинамических зон, а суммарное количество элементов модели ранга n и более отражает эффективное количество геодинамических зон района соответствующего ранга. Как правило, рассматриваются три типа проявления сейсмичности (структурированная, рассеянная и кластерная). Приуроченность очагов землетрясений к геодинамическим зонам разного ранга послужила основанием для разных типов сейсмичности использовать три типа модели: линейную (индекс «л»), плоскую (индекс «п») и объемную (индекс «о»). Модель «л» соответствует условиям одноосного деформирования, отражает структурированную сейсмичность и при оценке величин $N_c(n)$ определяет учет знаменателя геометрической прогрессии k_n . Модель «п» соответствует условиям всестороннего

деформирования, отражает рассеянную сейсмичность и при оценке величин $N_c(n)$ определяет учет знаменателя геометрической прогрессии, равного k_n^2 . Модель «о» соответствует условиям объемного деформирования, когда в процесс деформирования вовлекаются все элементы модели, что соответствует, например, проявлению афтершоков и при оценке величин $N_c(n)$ определяет учет знаменателя геометрической прогрессии, равного k_n^3 .

Нормирование величин $N_{ci}(n)$ (где i – индексы «л», «п», «о», соответствующие трем типам модели) на максимальный период T_{max} позволяет оценить частоту максимальных событий на элементах модели ранга n с учетом условий деформирования. Период T_{max} соответствует времени накопления в результате длительного деформирования на максимальной структуре деформаций, при достижении которыми упругого предела произойдет разрушение. Период подготовки $T_{max\ in}$ максимальных землетрясений на составных элементах модели ранга n_i определяется отношением T_{max} к количеству элементов ранга n [9].

Учет соотношения между эффективным размером L_n элементов модели и рангом n позволяет от суммарного количества $N_c(n)$ элементов разного ранга, нормированного на T_{max} , перейти к оценке кривой фрактальности $\lg(N_{ci}/T_{max}) = f(\lg L_i(n))$ для различных типов модели и условий деформирования. В зависимости от условий деформирования кривые фрактальности имеют разные коэффициенты фрактальности D : для «л» – модели $D_n = 1$, для «п» – модели $D_n = 2$, для «о» – модели $D_n = 3$. Тип модели и условия деформирования должны определять характер проявления сейсмического процесса, включая его дискретность.

Для оценки предельных параметров сейсмического режима можно перейти от кривых фрактальности $\lg(N_{ci}/T_{max}) = f(\lg L_i(n))$ к прогнозным пределам графиков повторяемости магнитуд. При оценке прогнозных пределов магнитуд учитываются кривые фрактальности $\lg(N_{ci}/T_{max}) = f(\lg L_i(n))$ и зависимости предельных оценок магнитуды M_{max} от размера L_n элемента и типа разрушения (хрупкое при достижении упругого предела ϵ или хрупко-пластическое при достижении хрупко-пластического предела ϵ_{xp}) в виде:

$$M_{max} = 5,1 + 0,625 \cdot \lg \epsilon \text{ (или } \epsilon_{xp}) + 1,875 \cdot \lg L_n \quad (1)$$

Данная зависимость получена с учетом экспериментально установленного соотношения между

сейсмическим моментом M_0 и магнитудой M [10]: $\lg M_0 = 15,4 + 1,6M$; здесь $M_0 = \mu AS$, где μ – модуль сдвига, A – амплитуда смещения, S – площадь плоскости разрыва, по которой происходит смещение при землетрясении. Коэффициенты в соотношении (1) получены с учетом модуля сдвига $\mu = 5 \cdot 10^{11}$ дин/см², отношения протяженности зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) к горизонтальному размеру максимального очага, равного k_n , и с учетом отношения горизонтального L и вертикального W размера очага $L/W = 2,5$.

Результаты анализа параметров сейсмогенных дислокаций в очаговых зонах сильных землетрясений по данным [11, 12 и других] использованы для обоснования эффективного упругого предела $\epsilon_{эф}$ и хрупко-пластического предела ϵ_{xp} . Деформации в очагах могут меняться в широких пределах от 10^{-9} до 10^{-3} и более (эффективная величина $\epsilon_{эф} \sim 3,2 \cdot 10^{-5}$). Принято, что $\epsilon_{эф}$ не зависит от размера очага. Величина хрупко-пластического предела ϵ_{xp} зависит от размера максимального очага L_0 и, соответственно, размера L_n структуры ($L_n/L_0 = k_n$) в виде [13, 14]:

$$\lg \epsilon_{x-p} = -0,5 \cdot \lg L_n - 2,75 \quad (2)$$

Величины $\epsilon_{эф}$ и ϵ_{x-p} учитываются при оценке M_{max} для условий хрупкого и хрупко-пластического разрушения.

При оценке сейсмической опасности на основе закона Гутенберга-Рихтера важную роль играет нелинейность графика повторяемости [15] и обоснованность его ограничения справа или неограниченная экстраполяция в область редких событий [16, 17]. Данная проблема до настоящего времени не решена, поэтому для оценки $M_{пр}$, ограничивающего закон Гутенберга-Рихтера справа, использовано эмпирическое соотношение вида:

$$M_{пр} = \lg L_n + 6,75 \quad (3)$$

В зависимости от типа модели и характера разрушения прогнозные пределы графиков повторяемости магнитуд имеют разные наклоны b : $b_n(\epsilon) = -1,07$, $b_n(\epsilon_{xp}) = -1,28$, $b_n(\epsilon) = -0,54$, $b_n(\epsilon_{xp}) = -0,65$, $b(M_b) = -2,01$, $b(M_{пр}) = -4,01$. Полученные результаты моделирования позволяют оценить предельные коэффициенты, связывающие величины D и наклон b в законе Гутенберга-Рихтера (магнитуда – частота), в диапазоне от 1,56 до 1,87 – для «п» модели и от 1,54 до 1,85 – для «л» модели.

В случае если события структурированы, отношение D_f к D_e может изменяться от 3,07 до 3,7.

Коэффициенты фрактальности D_f к D_e , оцененные для различных регионов Земли на основании пространственной связи фрактальных размерностей сети активных разломов и пространственного распределения эпицентров землетрясений соответственно, находятся в пределах $1,26 < D_f = D_e < 1,87$ [18, 19 и другие]. При этом коэффициент, связывающий величины D и наклон b в законе Гутенберга-Рихтера, несколько больше теоретического значения 2 и варьируется в диапазоне 1,7 – 2,4. На результаты оказывает влияние неоднозначность пересчета магнитуд и недостаток данных, прежде всего, по характеристикам разломов, а также тот факт, что при анализе не учитываются условия деформирования, характер разрушения и особенности графиков повторяемости сильных землетрясений.

Ниже рассмотрено практическое применение методики на примере анализа имеющихся геодинамических и сейсмологических данных по ближнему району размещения площадки Балтийской АЭС.

Структурные, геодинамические и сеймотектонические условия

Район предполагаемого размещения Балтийской АЭС расположен в пределах переходной зоны от Балтийского щита к Восточно-Европейской платформе. Согласно линеаментно-доменно-фокальной модели (ЛДФ-модели) ОСР-97 район размещения Балтийской АЭС попадает в домен с $M_{\max} = 4,5$ и ограничен на северо-востоке и юго-западе доменами с $M_{\max} = 5,0$, на северо-западе – доменом с $M_{\max} = 5,5$, а на юго-западе – с $M_{\max} = 5,0$. Домены, ограничивающие квазиоднородный тектонический блок, являются региональными зонами ВОЗ XVI порядка. Северо-восточный домен является составным северо-западным элементом проявления планетарного Сарматско-Туранского линеамента XVII порядка. Согласно [20] для северного фрагмента этой зоны (с учетом $G_{\text{эф}} = 3 \cdot 10^{-9}$ в год, $b = -1,09$ и протяженности 1000 км) получена унифицированная оценка $M_{\text{эф}} = 5,2$, что близко к оценке $M_{\max} = 5,0$, принятой при ОСР-97. При учете максимального градиента скорости четвертичных движений ($G_{\text{эф max}} = 1 \cdot 10^{-8}$ в год), который возможен в пределах слабоактивной территории, величина $M_{\text{эф max}}$ может достигать 5,9. Эти оценки не противоречат ЛДФ-модели ОСР-97 и согласуются с альтернативными региональными оценками M_{\max} (без учета повторяемости сейсмических событий) [21, 22], согласно

которым M_{\max} в рассматриваемом районе может изменяться от 4,0 до 6,1. В [22] с учетом внерегионального сеймотектонического метода отмечено, что: «... в северо-западной части Русской плиты выявляется несколько обособленных в пространстве областей с дифференцированными оценками уровня сейсмического потенциала» с M_{\max} до 5,5, связанных с сеймотектоническими обстановками местных зон ВОЗ, например, Осмуссарского землетрясения с $M = 4,7$ (1976 г.). Один из таких ареалов, для которого прогнозировалось возникновение сильного землетрясения, оказался расположенным в зоне возникновения Калининградского землетрясения 2004 г., в пределах которой ранее подобные события не фиксировались.

Для оценки возможности проявления и силы предельного землетрясения в пределах ближнего района размещения Балтийской АЭС, согласно рекомендациям [20], выполнены детальные инженерные изыскания и исследования района и ближнего района. В результате проведения дистанционных исследований и выполнения морфоструктурного анализа уточнено положение и определены характеристики (протяженность и долговременная скорость деформации) геодинамических зон – потенциальных зон ВОЗ района и ближнего района. Долговременная скорость деформации определена с учетом отношения суммарной амплитуды четвертичных тектонических движений к ширине зоны и периоду активизации (~ 1 млн лет). Схема геодинамических зон – зон ВОЗ XIII порядка (рис. 1) и их характеристики использованы для оценки места, магнитуды, частоты ближайших к площадке максимальных землетрясений.

Анализ распределения количества геодинамических зон в зависимости от их протяженности позволил получить два коэффициента фрактальности: $D_1 = 1,41$ – для мелких структур (менее 60 км) и $D_2 = 1,88$ – для крупных структур, что позволяет предположить различные условия подготовки и проявления структур разной масштабности и разного характера разрушения. Фактически относительно мелкие структуры являются составными элементами более крупных. Так, ближайшие структуры BLT-XIII-4 ($G = 1,4 \cdot 10^{-8}$ в год, $\Delta = 0,7$ км) и BLT-XIII-15 ($G = 7,9 \cdot 10^{-9}$ в год, $\Delta = 11,0$ км) являются составными элементами структур XIV порядка BLT-XIV-50 ($G = 5,2 \cdot 10^{-9}$ в год, $\Delta = 0,5$ км) и BLT-XIV-52 ($G = 4,3 \cdot 10^{-9}$ в год, $\Delta = 1,2$ км) соответственно. Ближайшая структура XV порядка BLT-XV-9 ($G = 3,8 \cdot 10^{-9}$ в год, $\Delta = 32$ км) протяженностью 305 км включает в себя структуру

XIV порядка (BLT-XIV-58) и структуры XIV порядка (BLT-XIII-18 и BLT-XIII-20).

Для оценки прогнозных пределов приняты следующие основные характеристики модели: $L_1 = 300$ км и $k_{II} = \sqrt{10}$. Рассмотрены «п» и «л» модели при всестороннем и одноосном деформировании соответственно. При всестороннем деформировании учитывались максимальный упругий предел $\epsilon_{\max} = 10^{-3}$ и минимальная долговременная скорость деформации $G_{\min} = 1 \cdot 10^{-9}$ в год. При одноосном деформировании учитывались максимальный упругий предел, эффективный упругий предел $\epsilon_{\text{эф}} = 3,2 \cdot 10^{-5}$ и минимальная долговременная скорость деформации $G_{\min} = 1 \cdot 10^{-9}$ в год. В процессе длительного деформирования упругие характеристики среды в максимальной геодинамической зоне могут изменяться, при этом ϵ_{\min} может достигать $2 \cdot 10^{-6}$, а $G_{\max} = 1 \cdot 10^{-8}$ в год, что может приводить к изменению параметров сейсмического режима.

Сейсмические условия размещения

Район предполагаемого размещения Балтийской АЭС расположен в пределах переходной зоны от Балтийского щита к Восточно-Европейской платформе. Данный район характеризуется относи-

тельно слабым проявлением сейсмичности. Каталог землетрясений включает сведения о 22 землетрясениях с магнитудой MLH от 2,5 до 5,0, начиная с 1302 г. по настоящее время (таблица 1). Анализ данных таблицы 1, выполненный в предположении, что характеристики землетрясений достоверны, показал, что:

- в рассматриваемом районе в течение последних 715 лет максимальные наблюдаемые магнитуды не превышали 5,0;
- сейсмическая активность не стационарна во времени: в период с 1302 по 1785 гг. наблюдалось затухание сейсмической активности, а с 1785 г. по настоящее время наблюдается ее увеличение (рис. 2 слева);
- график повторяемости магнитуд для всей выборки данных («ромбики» на рис. 2 справа) не линеен: левая ветвь графика более пологая, а правая, начиная с магнитуды $M \sim 4,0$, более крутая; левая ветвь графика повторяемости определяется событиями в период нарастания сейсмической активности («треугольники» на рис. 2 справа), а правая ветвь графика – событиями в период спада активности («квадраты» на рис. 2 справа).

Графики повторяемости приведены к одному году и единичной площади района диаметром 300 км.

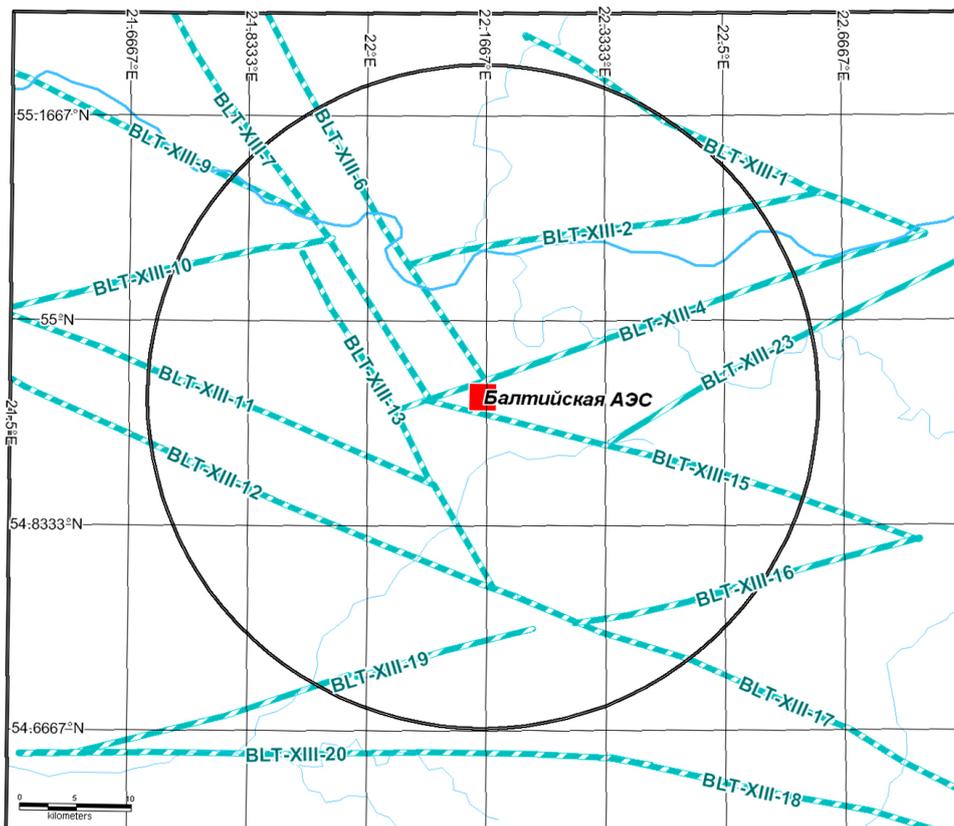


Рис. 1. Геодинамические зоны – зоны ВОЗ XIII порядка

Таблица 1

Каталог землетрясений района размещения Балтийской АЭС

Год	Месяц	День	Час	Мин	с	Широта	Долгота	Глубина, км	M _{ЛН}
1302	8	15	10	30	0,00	55,00	20,00	15	4,5
1302	8	15	10	30	0,00	55,00	20,00	15	4,3
1302	8	15	10	30	0,00	55,00	20,00	15	3,8
1303	12	1	14	0	0,00	55,30	21,00	10	5,0
1375	0	0	0	0	0,00	57,50	18,50	10	4,0
1437	5	18	23	0	0,00	57,60	19,50	10	4,0
1540	0	0	0	0	0,00	57,70	18,70	5	4,3
1572	1	6	8	0	0,00	53,00	18,50	8	4,0
1616	6	30	6	30	0,00	56,40	24,90	6	4,0
1785	10	31	2	0	0,00	57,50	21,50	8	3,5
1799	8	7	5	30	0,00	54,60	18,70	10	4,3
1832	7	15	3	0	0,00	55,00	19,00	5	3,0
1845	7	9	15	30	0,00	56,50	20,00	5	2,5
1857	5	18	10	0	0,00	57,74	22,25	10	4,0
1893	9	0	18	0	0,00	56,60	20,00	5	2,8
1912	8	4	11	45	0,00	57,40	23,50	5	2,5
1912	8	4	18	56	0,00	57,40	23,50	5	3,0
1995	2	23	8	42	45,32	54,62	19,69	10	2,7
2002	12	18	21	14	15,90	55,88	18,25	10	3,7
2004	9	21	11	5	2,00	54,91	19,88	15	4,3
2004	9	21	21	30	0,00	55,00	20,00	8	2,5
2004	9	21	13	32	28,30	54,97	20,13	14	4,6

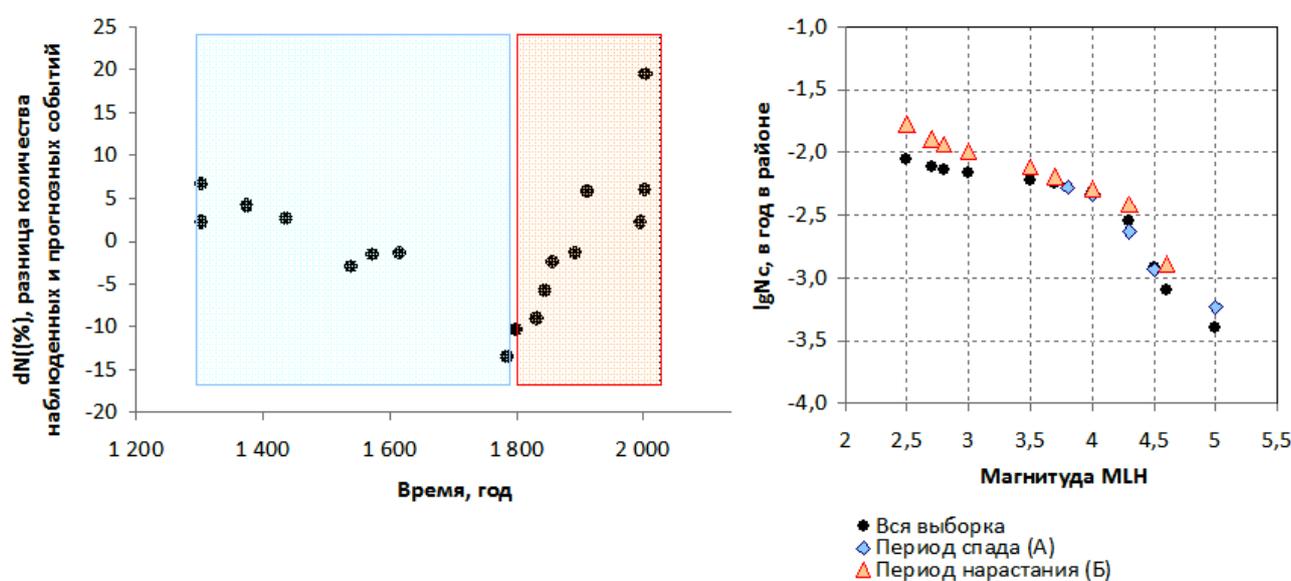


Рис. 2. Основные характеристики сейсмического процесса: слева – изменение сейсмической активности во времени; справа – графики повторяемости магнитуд

Нелинейность графика повторяемости магнитуд общеизвестна, но ее природа до настоящего времени не изучена [15]. Нелинейность графика определяет основные проблемы использования закона Гутенберга-Рихтера в качестве основы оценки сейсмической опасности: выбор линейного отрезка графика и ограничение величины M_{\max} в области редких событий. Это особенно актуально при использовании данных о повторяемости слабых землетрясений, полученных при кратковременных инструментальных сейсмологических наблюдениях в районах размещения АС, для оценки магнитуды и частоты редких сильных землетрясений. Левый загиб графика повторяемости в области слабых событий обычно связывают с непредставительностью сейсмологических данных, а его выполаживание справа или значительное увеличение наклона также объясняют как непредставительностью данных, так и недостоверностью учета площади сбора данных и оценки периода представительности сейсмических событий в области больших магнитуд [23].

В любом случае для обоснования природы нелинейности графика повторяемости и ее учета при оценке сейсмической опасности необходимо иметь физическое обоснование изменения формы графика повторяемости, его максимальной магнитуды, в зависимости от геодинамической активности зон ВОЗ, условий их деформирования, геотехнических и сейсмотектонических предпосылок.

Нелинейность графика повторяемости и возможность его представления двумя линейными отрезками, соответствующими двум различным состояниям сейсмического процесса, определяет актуальность решения следующих вопросов: какой из графиков следует использовать при оценке сейсмической опасности и следует ли ограничивать величину M_{\max} или нет при экстраполяции графиков в область редких событий. Тем более, что экстраполяция полученных графиков в область редких событий, согласно рекомендациям [2], может привести к физически необоснованным оценкам. С другой стороны, на платформах с весьма низкой сейсмической активностью могут возникать и возникают катастрофические землетрясения, что указывает на необходимость изучения природы землетрясений, необходимость выявления факторов, которые влияют на форму графика повторяемости и его уровень в разных диапазонах магнитуд, включая физическое ограничение величины M_{\max} для рассматриваемого района.

Обсуждение результатов

Кривые фрактальности, рассчитанные для случаев всестороннего (линия 1, рис. 3) и одноосного (линия 2, рис. 3) деформирования, отражают дискретные свойства зон ВОЗ района. С учетом минимальной и максимальной длительной скорости деформации и упругого и хрупко-пластического пределов, неслучайной зависимости максимальной магнитуды от протяженности зон ВОЗ (соотношения (4) ÷ (6)) можно оценить прогнозные пределы графиков повторяемости магнитуд для различных условий подготовки и проявления землетрясений (рис. 3).

Анализ природы нелинейности графиков повторяемости выполнен с учетом прогнозных пределов (рис. 3), рассчитанных на основе принятой модели с учетом условий деформирования и характера разрушения. Результаты анализа использованы для установления условий подготовки и проявления землетрясений, ответственных за отдельные линейные фрагменты графика повторяемости, а также с целью разработки исходных данных, необходимых для оценки долговременной и текущей сейсмической опасности во всем физически обоснованном диапазоне магнитуд.

Прогнозные кривые фрактальности для условий всестороннего деформирования рассчитаны с учетом минимальной скорости деформации $G_{\min} = 1 \cdot 10^{-9}$ в год для «п» модели (линия 1) при упругом пределе $\epsilon_{\max} = 10^{-3}$ (рис. 3). Для условий одноосного деформирования кривые фрактальности рассчитаны для «л» модели с учетом $G_{\max} = 1 \cdot 10^{-8}$ в год, упругого предела $\epsilon_{\text{эф}} = 3,2 \cdot 10^{-5}$ (линия 2) и $\epsilon_{\min} = 2 \cdot 10^{-6}$ (линия 3). Положение прогнозных кривых фрактальности контролируется распределением суммарного количества линеаментов ранга n и более, нормированного на соответствующие максимальные периоды (T_{\max}). Прогнозные кривые фрактальности использованы для оценки прогнозных пределов графиков повторяемости.

1. Пересечения линии 1 с линиями 2 и 3 определяют минимальный размер структур (~ 10 км и 30 м соответственно), на которых начинают накапливаться напряжения и деформации по мере увеличения скорости деформации в очаговой зоне.

2. Линия 1 определяет положение линии 1*, которая ограничивает M_{\max} сверху при хрупком разрушении очагов, линия 1** ограничивает M_{\max} сверху при хрупко-пластическом разрушении очагов, линия 1*** соответствует $M_{\text{б}}$ субочагов (или жестких очагов). Область, ограниченная линиями

1* и 1**, контролирует неопределенность графика «магнитуда-частота», определяющего долговременную сейсмическую опасность. В эту область попадают графики повторяемости исторических землетрясений («окружности»), палеоземлетрясений («желтые квадраты»), землетрясений, зарегистрированных при кратковременных наблюдениях малоапертурной группой ИДГ РАН [24, 25] («красные квадраты» (2007 г.), «красные ромбы» (2009 г.) и «красные кружки» (2010 г.)). Прогнозные графики повторяемости («черные ромбы»), которые могли сопровождать процесс формирования кривой фрактальности (линия 1), так же как графики повторяемости исторических землетрясений в период спада («желтые треугольники») и в период нарастания («зеленые квадраты») активности, попадают в данную область.

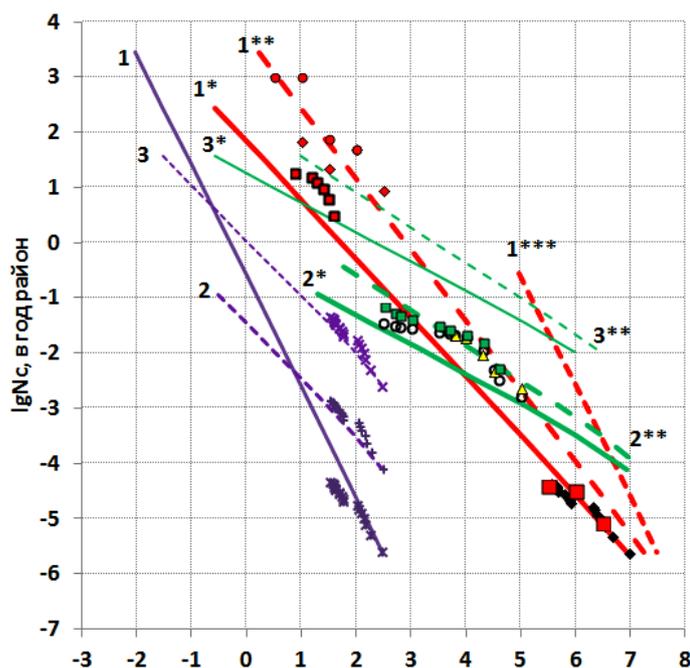
3. Линия 2 определяет положение линии 2*, которая ограничивает M_{\max} сверху при хрупком разрушении очагов, линия 2** ограничивает M_{\max} сверху при хрупко-пластическом разрушении очагов. Эти линии контролируют положение графика повторяемости исторических землетрясений в период нарастания активности («зеленые квадраты») и соответствуют условиям изменения геотехнических условий в геодинамических зонах при подготовке и проявлении сейсмических событий в очаговой зоне, контролирующими выполаживание графика повторяемости в диапазоне магнитуд от 2,5 до 4,3.

4. Линия 3 определяет положение линий 3* и 3**, которые контролируют положение графиков повторяемости сейсмических событий в очаговой зоне, обусловленных дальнейшим упрочнением и консолидацией среды в области подготовки сильного землетрясения, и определяют текущую сейсмическую опасность на настоящий момент.

5. Совместный учет линий 1* и 1** с линиями 3*, 3** и 1*** определяет потенциальную текущую сейсмическую опасность в будущем в случае изменения прочностных и деформационных характеристик среды в процессе длительного деформирования. Проявление этих тенденций контролируется результатами краткосрочных наблюдений малоапертурной группой «красные ромбики» (2009 г.) и «красные кружки» (2010 г.). Данные за эти годы отражают повышение сейсмической активности и выполаживание фрагментов графиков повторяемости по сравнению с наблюдениями в 2007 г. «красные квадраты».

6. Пересечение линий 1* и 1**, 2* и 2**, 3* и 3** с линией 1*** контролирует неопределенность оценки наиболее вероятной магнитуды M_b и частоты максимального землетрясения в рассматриваемом районе для различных условий деформирования и характера разрушения.

7. Выход графика повторяемости землетрясений за пределы линии 1*** справа отражает процесс консолидации среды и возможность проявления



Десятичный логарифм протяженности зоны ВОЗ $lgLz$ (км); магнитуда M

Рис. 3. Сравнение прогнозных пределов и наблюдаемых графиков повторяемости магнитуд

характеристического землетрясения. Своевременное выявление предпосылок подготовки характеристического землетрясения определяет актуальность проведения мониторинговых наблюдений для контроля деформационных и прочностных характеристик геодинамических зон района и ближнего района размещения атомной станции, включая геодинамический и сейсмологический мониторинг.

8. Проведение мониторинговых наблюдений предполагает установление контролируемых параметров и определение их критических величин, при достижении которых должны выдаваться рекомендации по реализации организационных и технических мер обеспечения безопасности. Применительно к сейсмологическому мониторингу стоит задача не только получения традиционных каталогов землетрясений, но и информации о параметрах очагов (размер и амплитуда подвижки в очаге, моментная магнитуда) землетрясений.

Использование полученных результатов для оценки сейсмической опасности

Прогнозные пределы графиков повторяемости соответствуют альтернативным моделям, отражающим различные условия деформирования и характер разрушения, и позволяют оценить влияние изменения магнитуд и частот землетрясений на эпистемическую неопределенность при вероятностном анализе сейсмической опасности. Для различных условий деформирования и характера разрушения получено шесть кривых сейсмической опасности, выраженных в баллах шкалы MSK-64, с учетом частоты землетрясений (рис. 4). Интенсивность сотрясений на площадке рассчитана согласно рекомендациям [26] для средних грунтов на основании среднемирового соотношения Н. В. Шебалина, с учетом прогнозных пределов (рис. 3), глубины очага 10 км и минимального удаления максимальной зоны ВОЗ от площадки ~ 30 км. Данная методика позволяет также получить кривые сейсмической опасности вида «максимальное ускорение – частота события на интервале один год» или «обобщенный спектр реакции – частота события на интервале один год».

Рассчитанные для разных условий деформирования и характера разрушения кривые сейсмической опасности позволяют получить непротиворечивые оценки интенсивности для разной вероятности на интервале один год с целью выполнения детерминистического и вероятностного обоснований безопасности.

Прогнозные пределы линий 1* и 1** использованы для оценки кривых долговременной сейсмической опасности в условиях всестороннего деформирования: линия I (1*) – при хрупком и линия I (1**) – при хрупко-пластическом разрушении, согласно которым интенсивность сотрясений I_{mpz} на средних грунтах площадки при максимальном расчетном землетрясении (MPЗ) может изменяться от 5,2 до 6,2 баллов (рис. 4). Эти оценки не противоречат результатам ОСП-97 (сейсмичность района меньше 6 баллов по шкале MSK-64). Прогнозные пределы линий 2* и 2** для условий одноосного деформирования использованы с целью оценки кривых сейсмической опасности: линия I (2*) – при хрупком и линия I (2**) – при хрупко-пластическом разрушении, согласно которым интенсивность сотрясений I_{mpz} на средних грунтах площадки может изменяться от 7 до 7,5 баллов. Следует отметить, что этим оценкам соответствует сейсмичность района для г. Калининград (7 баллов по шкале MSK-64 согласно ОСП-2015).

Увеличение магнитуд связано с накоплением деформаций в геодинамических зонах протяженностью от 10 до 100 км (элементы ранга n от 3 до 5), что определяет соответствующее увеличение интенсивности и частоты сейсмических воздействий по сравнению с условиями всестороннего деформирования, для которых долговременная скорость деформации ниже. При дальнейшем увеличении скорости деформации в очаговой зоне в процесс накопления деформаций вовлекаются более мелкие элементы. Так, при максимальной скорости деформации накопление деформаций происходит начиная с протяженности от $\sim 0,3$ до ~ 30 км (элементы ранга n от 4 до 8). При этом интенсивность наиболее вероятных сотрясений на площадке может достигать 6 баллов с частотой 10^{-2} в год вместо $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-5}$ в год согласно результатам оценки долгосрочной сейсмической опасности. Линия 1*** характеризует наиболее вероятные магнитуды субочагов и определяет интенсивность сотрясений уровня MPЗ на площадке равной 7,5 баллов, что согласуется с региональными оценками без учета повторяемости событий [21, 22]. Если невозможно обосновать условия подготовки и проявления землетрясений при вероятностном обосновании безопасности, рекомендуется учитывать все кривые сейсмической опасности. Для вероятностного обоснования безопасности рекомендуется использовать консервативный подход к оценке кривой сейсмической опасности в осях «интенсивность – частота события на интервале один год» [1, 27].

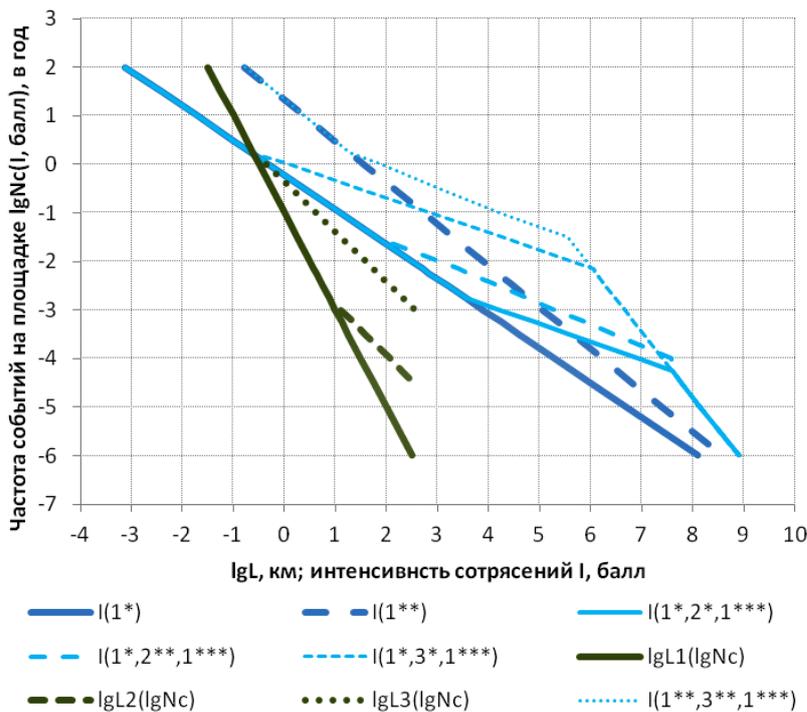


Рис. 4. Кривые фрактальности и кривые сейсмической опасности для различных условий деформирования и характера разрушения

Выводы

Приведенная модель позволяет формализовать оценки прогнозных кривых фрактальности с учетом структуры зон ВОЗ, условий деформирования и характера разрушения.

Генетическая связь геодинамического и сейсмического процесса позволяет на основании оценки параметров кривых фрактальности получать прогнозные пределы, контролируемые уровень и наклон отдельных фрагментов графиков повторяемости, полученных на основании пусть даже статистически не представительных, но достоверных данных о землетрясениях, включая палеоземлетрясения и микроземлетрясения.

Совместный анализ наблюдаемых и прогнозных данных позволяет установить факторы, определяющие условия подготовки и проявления сильных землетрясений, определить их количественные характеристики, включая условия деформирования, упругий предел, долговременную и текущую скорость деформации, характер разрушения, а также

масштабность геодинамического и сейсмического процессов.

Применение данного подхода особенно актуально при оценке долговременной и текущей сейсмической опасности слабоактивных территорий, включая платформы, для которых отсутствуют статистически представительные сейсмологические данные.

Метод позволяет установить контролируемые параметры и их критические величины, при достижении которых должны выдаваться рекомендации по реализации организационных и технических мер обеспечения безопасности по результатам мониторинговых наблюдений при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Результаты прогноза долговременной и текущей сейсмической опасности позволяют учесть неопределенность наших знаний при совершенствовании методов риск-ориентированного регулирования безопасности.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.
2. IAEA Safety Standards Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-9 IAEA, 2010.
3. Гамбурцев Г. А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Бюллетень Совета по сейсмологии, № 1, 1955.
4. Бугаев Е. Г. Совершенствование методики оценки сейсмической опасности по геологическим и сеймотектоническим данным // Ядерная и радиационная безопасность, № 1 (83), 2017.
5. Бугаев Е. Г. Оценка пределов изменения графиков повторяемости магнитуд для развития риск-ориентированного регулирования безопасности атомных станций на примере районов Восточно-Европейской и Североамериканской платформ // Вопросы инженерной сейсмологии. Т. 41, № 3. 2014.
6. Бугаев Е. Г., Кишкина С. Б., Сеелев И. Н. Формализация оценки фоновых параметров сейсмического режима площадок глубинного захоронения радиоактивных отходов по сейсмологическим и геологическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии, Т. 42, № 4, 2015.
7. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-18: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 марта 2018 г. № 90.
8. Bugaev Evgeny «Formalized Estimation of Mmax and of Strong Earthquake Recurrence» // International Journal of Modern Physics and Application. Vol. 5, No. 2, 2018.
9. Родионов В. Н. Сейсмический режим и блочное строение земной коры // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 3, 1994.
10. Ризниченко Ю. В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985.
11. Хромовских В. С. Сейсмогенные деформации земной коры в эпицентральных и плейстосейстовых зонах сильных землетрясений // Сб. «Современная динамика литосферы». – М.: Недра, 1995.
12. Раутиан Т. Г. Определение параметров субочагов землетрясений и их интерпретация // Исследования по сейсмической опасности. Сб. «Вопросы инженерной сейсмологии», № 29, 1988.
13. Бугаев Е. Г., Спивак А. А. Оценка эффективных деформационных и прочностных характеристик среды в очагах землетрясений // Сборник трудов «Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений)». – М., 2002.
14. Бугаев Е. Г. О структурированной и рассеянной сейсмичности, жесткости очагов землетрясений и нелинейности графиков повторяемости магнитуд // Геодинамика и тектонофизика. Вып. 2, № 3, 2011.
15. Шерман С. И., Родкин М. В., Горбунова Е. А. Тектонофизический анализ типов графиков повторяемости катастрофических землетрясений Центральной Азии // Вулканология и сейсмология, № 6, 2017.
16. Holschneider M., Zöller G. & Hainzl S. (2011). Estimation of the maximum possible magnitude in the framework of a doubly truncated Gutenberg – Richter model. Bull. Seismol. Soc. Am. 101, No. 4.
17. Zöller G. & Holschneider M. (2016). The earthquake history in a fault zone tells us almost nothing about Mmax, Seismol. Res. Lett. 87, No. 1.
18. Захаров В. С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, № 6, 2011.
19. Oncel A.I., Wilson T.H., Nishizawa O. Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg – Richter b values // Journal of Geophysical Research, vol. 106, 2001.
20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных. РБ-019-01: утверждено постановлением Госатомнадзора России от 28.12.2001 № 16.
21. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / под ред. А. Ф. Грачева. М.: Пробел, 2000.

22. Рейснер Г. И., Иогансон Л. И. Сейсмический потенциал западной России, других стран СНГ и Балтии. В кн.: Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993.
23. Бурмин В. Ю. Слабые землетрясения Большого Сочи // Вулканология и сейсмология, № 5, 1999.
24. Кишкина С. Б., Краснощеков Д. Н., Волосов С. Г., Иванченко Г. Н., Константиновская Н. Л., Нестеркина М. А., Ризниченко О. Ю., Санина И. А. Временные сейсмологические наблюдения в районе Ростовской АЭС // Динамические процессы в геосферах. Вып. 9. М.: ГЕОС, 2017.
25. Кишкина С. Б., Краснощеков Д. Н., Локтев Д. Н., Санина И. А. Опыт работы малоапертурных групп ИДГ РАН по сейсмологическому мониторингу площадок АЭС // Динамические процессы в геосферах. Вып. 7. М.: ГЕОС, 2015.
26. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. РБ-006-98: утверждено постановлением Госатомнадзора России от 29.12.1998 № 3.
27. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июня 2017 г. № 217.

References

1. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. General safety provisions for nuclear power plants. NP-001-15, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 522 of December 17, 2015.
2. IAEA Safety Standards Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-9 IAEA, 2010.
3. G.A. Gamburtsev. Status and prospects of earthquake predictions. Seismology Board Bulletin, 1955, № 1.
4. Ye.G. Bugaev. Improvement of the methodology for seismic hazard assessment based on geological and seismotectonic data // Nuclear and radiological safety, № 1 (83), 2017.
5. Ye.G. Bugaev. Assessment of variation limit of magnitude recurrence curve with a view to promoting risk-informed safety regulation of nuclear power plants (exemplified by East-European and North-American platform areas) // Engineering seismology issues. V. 41, № 3, 2014.
6. Ye.G. Bugaev, S.B. Kishkina, I.N. Seyelev. Formalisation of the assessment of background seismic parameters at sites for deep underground disposal of radioactive waste based on seismology and geology data // Engineering seismology issues, V. 42, № 4, 2015.
7. Safety guide in the field of the use of atomic energy. Assessment of reference seismic intensity in nuclear facility site and area during engineering survey and investigations. RB-019-18, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 90 of March 2, 2018.
8. Bugaev Evgeny. Formalized estimation of Mmax and of strong earthquake recurrence // International Journal of Modern Physics and Application. Vol. 5, No. 2, 2018.
9. V.N. Rodionov. Seismic setting and block structure of the Earth's crust. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology, № 3, 1994.
10. Yu.V. Riznichenko. Selectas. Seismology challenges. – M.: Nauka, 1985.
11. V.S. Khromovskikh. Seismogenic deformation of the earth crust in epicentral and pleistoseistic zones of strong earthquakes // Compilation "Current dynamics of lithosphere". – M.: Nedra, 1995.
12. T.G. Rautian. Identification and interpretation of earthquake subfocus parameters // Seismic hazard investigations. Compilation "Issues of engineering seismology", № 29, 1988.
13. Ye.G. Bugaev, A.A. Spivak. Assessment of effective deformation properties and strength characteristics of earthquake focus environment // Compilation of scientific papers "Non-steady-state processes occurring in the upper and lower spheres of Earth (geophysics of violent disturbances)". – M, 2002.

14. Ye.G. Bugaev. Structured and diffuse seismicity, earthquake focus impedance, and non-linearity of magnitude recurrence curves // *Geodynamics and Tectonophysics*. Issue 2, № 3, 2011.
15. S.I. Sherman, M.V. Rodkin, E.A. Gorbunova. Tectonophysics analysis of the types of recurrence curves for catastrophic earthquakes in Central Asia // *Volcanology and seismology*, № 6, 2017.
16. Holschneider M., Zöller G. & Hainzl S. (2011). Estimation of the maximum possible magnitude in the framework of a doubly truncated Gutenberg – Richter model. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, No. 4.
17. Zöller G. & Holschneider M. (2016). The earthquake history in a fault zone tells us almost nothing about M_{max} , *Seismol. Res. Lett.* 87, No. 1.
18. V.S. Zakharov. Analysis of self-similarity characteristics of Eurasia's seismic intensity and active faults system // *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, № 6, 2011.
19. Oncel A.I., Wilson T.H., Nishizawa O. Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg – Richter b values // *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, 2001.
20. Safety guide in the field of the use of atomic energy. Geodynamic assessment of the seismic hazard of sites housing hazardous radiological and nuclear facilities. RB-019-01, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 16 of 28.12.2001.
21. Latest tectonics, geodynamics and seismicity of Northern Eurasia / Ed. A.F. Grachev. M.: Probel, 2000.
22. G.I. Reisner, L.I. Ioganson. Seismic potential in western Russia and other countries of the former USSR. In a book: *Seismic intensity and seismic zoning of Northern Eurasia*. Issue 1. M.: Earth Physics Institute with RAS, 1993.
23. V.Yu. Burmin. Weak earthquakes in Big Sochi // *Volcanology and seismology*, № 5, 1999.
24. S.B. Kishkina, D.N. Krasnoschekov, S.G. Volosov, G.N. Ivanchenko, N.L. Konstantinovskaya, M.A. Nestyerkina, O.Yu. Riznichenko, I.A. Sanina. Time seismic observations in Rostov NPP area // *Dynamic processes in geospheres*. Issue 9. M.: GEOS, 2017.
25. S.B. Kishkina, D.N. Krasnoschekov, D.N. Loktev, I.A. Sanina. Working experience of low-aperture groups of RAS IDG on seismology monitoring of NPP sites // *Dynamic processes in geospheres*. Issue 7. M.: GEOS, 2015.
26. Safety guide in the field of the use of atomic energy. Evaluation of reference ground motion as input for the design bases. RB-006-98, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 3 of 29.12.1998.
27. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Consideration of natural and human-induced external impacts on nuclear facilities. NP-064-17, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 217 of 23 June 2017.

