

УДК 551.24+551.4+550.343.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Бугаев Е.Г., д.т.н. (bugaev@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Рассмотрена методика формализованной оценки прогнозных графиков повторяемости магнитуд (прогнозных графиков) на основе модели, учитывающей дискретные свойства земной коры и зон вероятных очагов землетрясений и прямую связь геодинамической и сейсмической активности рассматриваемой территории. Соответствие прогнозных графиков, рассчитанных на основе принятой модели и фрагментов графиков повторяемости, рассчитанных с учетом достоверных сейсмологических данных, позволяет рекомендовать данную методику для включения в руководство по безопасности «Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных» (РБ-019-01). Применение данной методики позволит получать непротиворечивые оценки параметров проектного землетрясения и максимального расчетного землетрясения на основе детерминистического и вероятностного подходов и будет способствовать дальнейшему развитию риск-ориентированного подхода к регулированию безопасности.

► **Ключевые слова:** земная кора, зона ВОЗ, очаг, модель, элемент модели, коэффициент подобия, магнитуда, повторяемость, землетрясение, платформа, опасность.

PERFECTING OF A TECHNIQUE OF ASSESSMENT OF SEISMIC HAZARD ACCORDING TO GEOLOGICAL AND SEISM TECTONIC DATA

Bugaev E., Ph. D.(SEC NRS)

The technique of the formalized assessment of expected schedules of recurrence magnitudes (expected recurrence) on the basis of the model considering discrete properties of crust and zones of the probable seismic sources and direct connections of geodynamic and seismic activity of the explored territory is considered. Compliance of the expected schedules calculated on the basis of the accepted model and fragments of the schedules of repeatability calculated taking into account the reliable seismological data allows to recommend this technique for inclusion in the guide to safety «Assessment of seismic hazard sites of placement of nuclear and radiation dangerous objects on the basis of geodynamic data» (RB-019-01). Application of this technique will allow to receive consistent estimates of the operating base earthquake (OBE) and design base earthquake (DBE) parameters on the basis of deterministic and probability approach and further development will be promoted by risk - the focused approach to safety regulation.

► **Key words:** crust, zone of PSS, source, model, model element, similarity coefficient, magnitude, recurrence, earthquake, platform, hazard.

Введение

При проектировании сейсмостойких атомных станций (АС) сейсмичность района для средних грунтов допускается устанавливать для проектного землетрясения (ПЗ) по карте ОСР-97-В и для максимального расчетного землетрясения (МРЗ) – по карте ОСР-97-Д в баллах шкалы MSK-64 [1]. С момента проектирования и строительства большинства российских объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) сейсмическая опасность значительных территорий повысилась, в том числе и для Восточно-Европейской платформы (ВЕП), ранее считавшейся тектонически пассивной и асейсмичной. Это определялось ужесточением требований к обеспечению сейсмостойкости АС и учетом проявления или возможности проявления редких катастрофических землетрясений. Согласно концепции консервативного подхода к проектированию [2], выбор площадки, пригодной для размещения АС, и разработка проекта должны осуществляться с учетом параметров и характеристик природной среды, значения и пределы которых заведомо приводят к более неблагоприятным результатам. В связи с этим особый интерес представляет оценка условий подготовки, мест проявления и силы редких катастрофических землетрясений на платформах, а также в активных областях, где такие события превышают уровень сейсмических воздействий, принятый на картах сейсмического районирования. На Североамериканской платформе (САП) за период инструментальных наблюдений не установлено землетрясений с $M > 4,5$ (каталог ANSS), в 1811 – 1812 гг. произошло три «экзотических» Нью-Мадридских землетрясения с $M \sim 8,1$ [3]. На Китайской платформе в пределах V-балльной зоны, согласно сейсмическому районированию, 27 июля 1976 г. случилось Таншаньское землетрясение с $M = 7,9$, повлекшее 255 тысяч жертв.

В настоящее время отсутствуют нормативно-регулируемые методы оценки сейсмической опасности слабоактивных платформенных территорий, включая выявление места, времени и силы редких катастрофических землетрясений. В федеральные нормы и правила (ФНП) включены лишь требования по ограничению максимальной интенсивности МРЗ; обоснованию безопасного размещения площадки в пределах тектонического блока, ненарушенного активными разломами и активизированными в четвертичное время геодинамическими зонами; разработке организационных и технических мер обеспечения безопасности на площадках

с неблагоприятными процессами, явлениями и факторами [4, 5]; определению параметров сейсмической опасности для двух уровней (ПЗ, МРЗ) с учетом конкретных геодинамических, сейсмотектонических и сейсмических условий [1].

Следует отметить, что региональные исследования при ОСР-97 не обеспечивают выполнение требований ФНП по безопасному размещению и сейсмостойкому проектированию ОИАЭ без разработки более детальных карт сейсмического районирования [6, 7]. Рекомендации по практической реализации требований ФНП по обоснованию безопасного размещения площадок и оценке сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных содержатся в руководстве по безопасности [8]. Основная идея [8] состоит в выявлении в пределах доменов ЛДФ-модели ОСР-97 локальных линейментов (активных разломов и активизированных в четвертичное время геодинамических зон – потенциальных зон ВОЗ), не выявленных при проведении региональных исследований ОСР-97. В качестве критериев выявления локальных зон ВОЗ приняты: наличие активизированных в четвертичное время разломов, геодинамических зон, а также линейных структур, к которым приурочены очаги землетрясений, включая микроземлетрясения и палеоземлетрясения.

Использование рекомендаций [8] показало их эффективность при практической реализации требований норм и правил в части обоснования безопасного размещения площадки в пределах тектонического блока, ненарушенного активными разломами и активизированными геодинамическими зонами, определения максимальной магнитуды (M_{\max}) с учетом протяженности и скорости деформации локальных зон ВОЗ и срока службы объекта (50 лет). Отсутствие представительной статистики землетрясений для ВЕП не позволяет реализовать рекомендации [8] по выполнению требований ФНП, касающихся определения сейсмической опасности для уровня ПЗ и МРЗ с учетом зависимости M_{\max} от повторяемости землетрясений на основании вероятностного подхода [9].

Это требует разработки формализованной методики оценки прогнозных графиков для оценки сейсмической опасности (параметров ПЗ и МРЗ) на основе геологических и сейсмотектонических данных. Непротиворечивая оценка параметров ПЗ и МРЗ на основе использования детерминистического и вероятностного подхода будет способствовать дальнейшему совершенствованию

риск-ориентированных подходов к регулированию безопасности [10].

Постановка задачи

Отсутствие нормативно-регламентируемых методов оценки сейсмической опасности приводит к противоречивому определению параметров ПЗ и МРЗ на основе детерминистического и вероятностного подходов. Отсутствие статистически представительной сейсмологической информации послужило основанием для разработки методологии формализованной оценки прогнозных графиков на основании геологических и сейсмотектонических данных. Контроль достоверности этих оценок рекомендуется осуществлять с учетом имеющихся для рассматриваемой территории статистически не представительных, но достоверных сейсмологических данных. Под достоверностью сейсмологических данных понимается возможность учета представительного периода наблюдений и представительного радиуса регистрации для разных диапазонов магнитуд [10].

Идея формализованной оценки прогнозного графика повторяемости магнитуд по геологическим и сейсмотектоническим данным предусматривает последовательный учет дискретных свойств земной коры, зон ВОЗ и очагов [11] для определения эффективных размеров и кумулятивного количества элементов модели ранга n и более до максимального ($n=1$) элемента включительно; скорости потока проявления структур разного ранга с учетом времени накопления предельных деформаций в зоне ВОЗ [12, 13]; зависимости M_{\max} от эффективного размера элементов модели разного ранга, условий деформирования и характера разрушения [15, 14], а также проверку достоверности прогнозных графиков повторяемости на их соответствие графикам повторяемости магнитуд, рассчитанным с учетом достоверных, хотя и статистически не представительных, данных о землетрясениях [10].

Основанием для принятия модели, учитывающей дискретные свойства земной коры рассматриваемой территории, послужила информация о порядке и ранге сейсмогенных тектонических структур в зависимости от их протяженности (размера), включенная в [8]. При выделении потенциальных зон ВОЗ рекомендуется земную кору и верхнюю мантию рассматривать как дискретно-иерархическую структуру, каждый блок которой состоит из более мелких блоков и сам является частью более крупного блока [8]. Переход от блоков

одного порядка к следующему выражается чередованием отношений их максимальных размеров, кратных 3,3 и 3 (табл. 2.2.1 [8]). Для формализованной оценки параметров прогнозного графика по геологическим (геодинамическим) и сейсмотектоническим данным с учетом табл. 2.2.1 [8] рекомендуется использовать модель, отражающую дискретные свойства земной коры, потенциальных зон ВОЗ и очагов. Данная модель не противоречит модели «кусковатости» геофизической среды академика М.А. Садовского [11]. Размер максимального элемента L_1 модели рекомендуется принимать равным протяженности максимальной зоны ВОЗ в пределах рассматриваемой территории, а коэффициент подобия k_n – равным квадратному корню из десяти $k_n \sim 3,162$, что не противоречит таблице 2.2.1 (п. 2.2 [8]).

Дискретные свойства модели описываются свойствами геометрической прогрессии, согласно которым учет размера максимального элемента L_1 модели и коэффициента подобия k_n позволяет формализовать оценку эффективных размеров структур разного ранга рассматриваемой территории и количества структур ранга n и более, до максимального ($n=1$) элемента включительно. Эффективное количество активизированных элементов, вовлеченных в геодинамический процесс, рекомендуется определять с учетом знаменателя геометрической прогрессии z , величина которого зависит от условий деформирования: при всестороннем деформировании (индекс «в») в процесс вовлекаются все элементы модели и знаменатель геометрической прогрессии $z_v = k_n^2$; при одноосном деформировании (индекс «о») в процесс вовлекается лишь часть элементов и знаменатель $z_o = k_n$ [10].

Период (T_{\max}) подготовки землетрясения с M_{\max} для максимального ($n=1$) элемента модели (или в максимальной зоне ВОЗ рассматриваемой территории) определяется отношением упругого предела к долговременной скорости деформации в зоне ВОЗ. Для составных элементов модели ранга n период подготовки землетрясения с M_{\max} определяется отношением T_{\max} к количеству составных элементов соответствующего ранга [12, 13].

При длительном деформировании в зоне ВОЗ накапливаются напряжения и деформации, при достижении которыми критической величины происходит разрушение среды, сопровождаемое землетрясением. Согласно анализу сейсмотектонических данных, величина M_{\max} зависит от размера очага, условий деформирования и характера разрушения [14, 15].

Учитывая существование, как минимум, двух типов разрушения в очаге (хрупкое и хрупко-пластичское) [14], при оценке сейсмической опасности рекомендуется рассматривать не один, а два закона, отражающих масштабный эффект подобия очагов землетрясений [16].

Исходными данными для формализованной оценки прогнозных графиков являются следующие характеристики рассматриваемой территории: структура земной коры; протяженность максимальной зоны ВОЗ; упругий предел деформирования в очаге, величина которого может изменяться от 10^{-7} до 10^{-3} [14, 16]; скорость деформации среды в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-6} в год; условия деформирования (всестороннее, одноосное); зависимость M_{\max} от размера элемента модели, условий деформирования и характера разрушения [15]; соотношение протяженности L_3 зоны ВОЗ и размера очага L_o , согласно [17]: для максимального очага $L_o \sim L_3/3,0$, для эффективного очага $L_o \sim L_3/10$; для минимального очага $L_o \sim L_3/30$.

Изменение структуры геодинамических зон – потенциальных зон ВОЗ, условий деформирования земной коры под действием внутренних и внешних воздействий может приводить к соответствующему изменению напряженно-деформированного состояния, упругого предела и скорости деформации в зонах ВОЗ разного ранга. В свою очередь, это может сказаться на изменении параметров сейсмического режима (уровень и наклон графиков повторяемости магнитуд) во времени и пространстве [18].

Основные формулы и допущения

Дискретные свойства модели характеризуются размером максимального элемента модели L_1 и коэффициентом подобия k_n и описываются свойствами геометрической прогрессии, что позволяет формализовать оценки размера и количества составных элементов модели.

Размер составных элементов модели определяется соотношением вида:

$$\lg L(n) = \lg L_1 - d(i - 1), \quad (1)$$

где L_1 и $L(n)$ – размер максимального элемента модели и, соответственно, размер n -ого составного элемента модели, км; d – разность арифметической прогрессии, равная 0,5 (или $\lg k_n$); i – ранг составного элемента модели (величина, обратная порядку структуры в модели «кусковатости» геофизической

среды академика М.А. Садовского), изменяется от 1 до 18.

Суммарное количество N_c элементов модели ранга n и более (до максимального элемента $n=1$ включительно) определяется соотношением:

$$N_c = b_1(z^i - 1)/(z - 1), \quad (2)$$

где b_1 – принят равным единице; z – знаменатель геометрической прогрессии, который, как отмечено выше, зависит от условий деформирования: при одноосном $z_o = k_n$, при всестороннем $z_b = k_n^2$.

Время T_{\max} накопления предельных деформаций при подготовке очага максимального землетрясения определяется соотношением [12, 13]:

$$T_{\max} = \varepsilon_{\text{пр}} / G_{\text{мин}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – упругий предел, $G_{\text{мин}}$ – минимальная скорость деформации (или минимальный градиент скорости четвертичных тектонических движений в зоне ВОЗ) в год. Время подготовки землетрясения с M_{\max} на составном элементе модели ранга n определяется отношением T_{\max} к количеству составных элементов модели данного ранга.

Нормирование суммарного количества активизированных элементов модели на время накопления предельных деформаций определяет скорость потока структур ранга n и более до максимального элемента ($n=1$) включительно.

Для перехода от скорости потока структур разного ранга к прогнозному графику повторяемости магнитуд рекомендуется учитывать зависимости M_{\max} от протяженности зоны ВОЗ, долговременной скорости деформации и времени ожидания (или упругого предела), полученные на основании эмпирических данных и аналитических решений.

Анализ параметров сейсмогенных дислокаций в очагах сильнейших землетрясений [15] позволил установить, что размер очага, определяемый видимыми на поверхности Земли разрывами, может достигать 1000 км. При этом эффективная максимальная магнитуда стремится к $M=8,5 \pm 0,5$, а максимальные эффективные амплитуды подвижки в очаге для условий хрупкого (A_x , м) и хрупко-пластического ($A_{\text{хп}}$, м) разрушения в зависимости от размера (L_o , км) очага определяются, соответственно, соотношениями вида [14, 15]:

$$\lg A_x(m) = \lg L_o(\text{км}) - 1,5 \quad (4)$$

$$\text{и} \quad \lg A_{\text{хп}}(m) = 0,5 \times \lg L_o(\text{км}) - 1,5. \quad (5)$$

Соотношение (4) соответствует хрупкому разрушению при достижении деформацией ϵ_x в очаге упругого предела $\sim 3 \times 10^{-5}$, близкого к эффективному упругому пределу для Земли в целом.

Соотношение (5) соответствует достижению предельной деформации $\epsilon_{хп}$ в очаге при хрупко-пластическом разрушении:

$$\lg \epsilon_{хп} = -0,5 \times \lg L_0 (\text{км}) - 3,0. \quad (6)$$

Учет двух типов разрушения в очаге позволяет при оценке сейсмической опасности использовать, как минимум, два типа графиков повторяемости, отражающих два закона подобия очагов на разных масштабных уровнях.

Предельные оценки M_{\max} в зависимости от протяженности зоны ВОЗ (индекс «з») для разных условий разрушения в очаге получены с учетом отношения протяженности зоны ВОЗ к размеру очага максимального землетрясения в зоне ВОЗ, равного коэффициенту подобия $k_n \sim 3,162$.

Чем больше упругий предел ϵ_y при хрупком разрушении, тем больше магнитуда. Например:

$$\text{при } \epsilon_{y1} = 10^{-6} \\ M_{\min} = 1,5 \times \lg L_3 (\text{км}) + 2,25, \quad (7)$$

$$\text{при } \epsilon_{y2} = 3,162 \times 10^{-5} \\ M_{\max} = 1,5 \times \lg L_3 (\text{км}) + 3,25. \quad (8)$$

При хрупко-пластическом разрушении деформации в очаге превышают упругий предел для Земли в целом ($\epsilon_{y2} = 3,162 \times 10^{-5}$) и очаги относятся к субочагам (или жестким очагам) [3, 19]. Для их характеристики приняты соотношения, определяющие зависимость M_{\max} от размера зоны ВОЗ:

$$\text{вероятные магнитуды:} \\ M_b = \lg L_3 (\text{км}) + 5,0, \quad (9)$$

$$\text{предельные магнитуды:} \\ M_k = 0,5 \times \lg L_3 (\text{км}) + 7,0. \quad (10)$$

Предельные магнитуды имеют место при достижении в зоне ВОЗ хрупко-пластического предела $\epsilon_{хп}$, величина которого, согласно эмпирическим данным, определяется соотношением вида:

$$\lg \epsilon_{хп} = -0,5 \times \lg L_3 (\text{км}) - 2,75. \quad (11)$$

С учетом скорости потока элементов модели разного ранга, эмпирические соотношения (7) – (10)

позволяют определить прогнозные пределы изменения графиков повторяемости магнитуд с учетом протяженности зоны ВОЗ, соответствующего ранга и условий разрушения.

Для оценки прогнозных графиков повторяемости магнитуд рекомендуется использовать соотношение (5.8) [8], которое было модифицировано для оценки магнитуды M_{\max} в зависимости от протяженности (L_3 , км) и долговременной скорости деформации (G_3 , в год) в зоне ВОЗ и периода (T_3 , год) ожидания землетрясения [8, 20]:

$$M_{\max} = 1,875 \times \lg L_3 + 0,625 \times \lg \epsilon' + \\ + 0,625 \times \lg T_3 + 5,0. \quad (12)$$

Согласно концепции консервативного подхода, при оценке M_{\max} в соотношении (12) учтены эмпирическое соотношение $\lg M_0 = 15,4 + 1,6 \times M$ [21] и зависимость сейсмического момента M_0 от параметров очага в виде $M_0 = \mu \times A_0 \times L_0 \times W_0$, где M_0 – сейсмический момент; M – магнитуда; μ – модуль сдвига (дин/см²), средняя амплитуда подвижки (м) в очаге; L_0 – размер очага (км); W_0 – вертикальный размер очага (км). При этом для очага принят модуль сдвига $\mu = 5 \times 10^{11}$ дин/см², который соответствует модулю сдвига изотропной однородной среды, и учтены отношения $L_0/W_0 = 2,5$ и $L_3/L_0 \approx 3$.

Заменяя в соотношении (12) сумму $0,625 \times \lg \epsilon' + 0,625 \times \lg T_3$ на $0,625 \times \lg \epsilon_y$ или $0,625 \times \lg \epsilon_{хп}$ можно оценить область проявления M_{\max} жестких очагов, контролируемую упругим и хрупко-пластическим пределом.

Переход от прогнозных графиков повторяемости магнитуд к кривым сейсмической опасности, выраженным в виде интенсивности, максимального ускорения или других динамических параметров, рекомендуется выполнять согласно рекомендациям [22].

Формализованная оценка сейсмической опасности

Формализованная оценка сейсмической опасности рассмотрена на примере двух районов: Воронежского кристаллического массива (ВКМ) Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и района проявления катастрофических Нью-Мадридских землетрясений 1811 – 1812 гг. с $M \sim 8.1$ (Нью-Мадрид) Североамериканской платформы (САП). Выбор районов связан с тем, что оба района расположены в пределах платформенных территорий, характеризующихся сходством структурных

условий (их принадлежностью к земной коре в целом), относительно низким уровнем геодинамической активности (согласно имеющимся геодинамическим и геофизическим данным, для обеих платформ принята минимальная скорость деформации $\sim 5 \times 10^{-10}$ в год; максимальная скорость деформации для ВЕП и САП приняты $\sim 3 \times 10^{-8}$ и $\sim 2 \times 10^{-7}$ в год, соответственно), сходством параметров сейсмического режима по инструментальным данным [10] и проявлением сильных исторических землетрясений, включая палеоземлетрясения на территории ВЕП и катастрофические Нью-Мадридские землетрясения на САП. Это определяет актуальность разработки критериев выявления места, силы и повторяемости сильных землетрясений, включая катастрофические на основе совместного анализа геологических, геодинамических и сейсмологических данных.

Оценка прогнозных пределов и графиков повторяемости магнитуд для районов ВЕП и САП выполнена на основе модели, с учетом размера максимального элемента $L_1=1000$ км, соответствующего протяженности максимальной зоны ВОЗ, коэффициента подобия $k_n \sim 3,162$ и принятых выше соотношений для условий всестороннего и одноосного деформирования, хрупкого и хрупкопластического разрушения. При оценке скорости потока в год структур разного порядка количество активизированных элементов модели в условиях всестороннего деформирования нормировалось на максимальный период $T_{\max} \sim 1,8$ млн лет, определяемый отношением максимального упругого предела 10^{-3} к минимальной скорости деформации, а для условий одноосного деформирования – на минимальный период $T_{\min} \sim 160$ лет, определяемый отношением упругого предела для Земли в целом к максимальной скорости деформации. Изменения упругого предела и скорости деформации отражают изменение напряженно-деформированного состояния среды в области подготовки максимальных землетрясений в условиях всестороннего и одноосного деформирования плоской и линейной модели соответственно.

С учетом скорости потока структур в год на основании зависимости M_{\max} от размера структур и условий деформирования и разрушения рассчитаны прогнозныe пределы и прогнозныe графики повторяемости, приведенные к 1 году и единичной площади, равной площади рассматриваемой территории. Достоверность оценки прогнозных пределов и прогнозных графиков повторяемости контролируется их сравнением с фрагментами графиков повто-

ряемости магнитуд, рассчитанных на основании выборок данных из каталогов инструментальных и исторических землетрясений рассматриваемых территорий. Для района ВКМ использован каталог землетрясений, зарегистрированных сетью сейсмических станций Воронежского государственного университета и Геофизической службы Российской академии наук в период с 1998 по 2009 г. Для района САП использованы выборки данных об инструментальных землетрясениях за 55 лет и исторических землетрясений за 174 года согласно данным каталога ANSS. Фрагменты графиков повторяемости по инструментальным (для ВЕП и САП) и по историческим (для САП) данным, как и прогнозные оценки, приведены к 1 году и единичной площади, равной площади рассматриваемой территории (диаметр 1000 км).

Сравнение прогнозных и наблюдаемых графиков повторяемости позволяет сделать заключение о том, что [10]:

- в области малых магнитуд ($M < 0$ для ВЕП и $M < 1,5$ для САП) имеет место левый загиб графиков, который может быть обусловлен как недостаточной чувствительностью сети сейсмических станций, так и условиями деформирования;
- в диапазоне представительных магнитуд по инструментальным данным ($0 \leq M \leq 4,0$ для ВЕП и $1,5 \leq M \leq 3,0$ для САП) для обоих районов наблюдаемые графики подобны, соответствуют закону Гутенберга-Рихтера и имеют наклон $b = -1,3$;
- в диапазоне магнитуд, начиная с $M \geq 4,0$ для ВЕП и с $M \geq 3,0$ для САП, установлено выполаживание наблюдаемых графиков;
- график повторяемости для САП, рассчитанный по историческим данным, принципиально отличается от графика, полученного по инструментальным данным, его наклон $b \sim -0,67$, при этом сейсмическая активность для катастрофических землетрясений на несколько порядков превышает прогнозные оценки аналогичных событий по инструментальным данным;
- обращает на себя внимание правый загиб вниз графика повторяемости по историческим данным.

Учет условий деформирования и характера разрушения при оценке прогнозных пределов и прогнозных графиков повторяемости позволяет в результате их сравнения с наблюдаемыми графиками повторяемости предложить объяснение нелинейности графиков повторяемости [10].

В частности, левый загиб графика может быть обусловлен не только непредставительностью

сейсмологических данных, как обычно предполагается, но и особенностями накопления и релаксации напряжений в условиях одноосного деформирования.

В пределах представительного диапазона магнитуд левая ветвь графика, полученная по результатам инструментальных наблюдений, имеет наклон $b = -1,3$ и, как правило, характеризует фоновую сейсмическую опасность в условиях всестороннего деформирования.

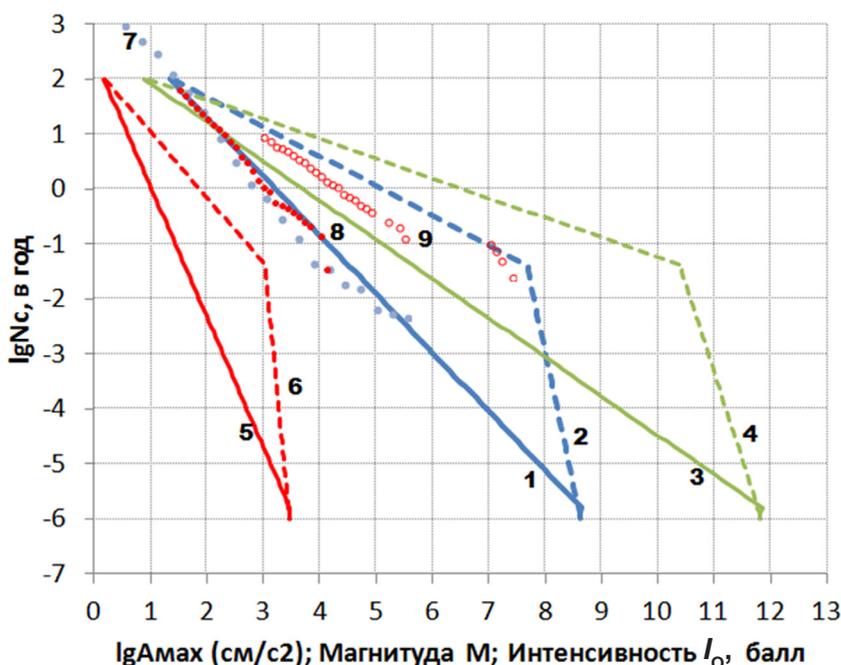
При проведении работ по ОСР-97 выполаживание графика повторяемости в диапазоне магнитуд, превышающих правое ограничение линейного графика, без обоснования причины рассматривалось как закономерное явление, которое определяет повышение сейсмической опасности [6].

Прогнозные пределы и прогнозные графики повторяемости позволяют предположить, что выполаживание графика может быть связано с преобладанием событий, сформировавшихся в условиях одноосного деформирования. Экстраполяция выположенного участка в область редких событий при ОСР-97, как правило, ограничивалась учетом $M_{\max} = M_{\max \text{ наб}} + 0,5$, в противном случае, могли иметь место физически не обоснованные оценки магни-

туд. Сравнение правого загиба графика исторических землетрясений в диапазоне максимальных магнитуд контролируется прогнозным графиком повторяемости, полученным для условий всестороннего деформирования с учетом соотношения (10), контролирующего зависимость предельных магнитуд от протяженности зоны ВОЗ в условиях хрупко-пластического разрушения (правая ветвь ломаной линии 2 на рисунке).

Прогнозные графики повторяемости магнитуд (линии 1 и 2) контролируются представительными фрагментами наблюдаемых графиков повторяемости магнитуд, рассчитанными по выборкам инструментальных данных из инструментальных каталогов (для ВКМ – голубые кружки; для зоны Нью-Мадрид – красные кружки) и по данным об исторических землетрясениях для зоны Нью-Мадрид (красные окружности) [10].

Прогнозные графики повторяемости магнитуд (линии 1 и 2) использованы для оценки графиков сейсмической опасности рассматриваемых районов ВЕП и САП, выраженных в баллах шкалы MSK-64 (линии 3 и 4) и максимальных ускорениях (линии 5 и 6) на рисунке, согласно рекомендациям [22].



Кривые сейсмической опасности, выраженные в магнитудах M (линия 1 – долговременная; линия 2 – текущая+предельная), интенсивностях I_0 , в баллах (линия 3 – долговременная; линия 4 – текущая+предельная), ускорениях (линия 5 – долговременная; линия 6 – текущая+предельная)

Интенсивность сотрясений в баллах шкалы MSK-64 рассчитана с использованием формулы Блэйка-Шебалина со среднемировыми коэффициентами [23] согласно рекомендациям [22]:

$$I_{\Delta} = 1,5 \times M - 3,5 \times \lg((H^2 + \Delta^2)^{1/2}) + 3, \quad (13)$$

где I_{Δ} – интенсивность землетрясения на средних грунтах площадки, балл; M_{\max} – максимальная магнитуда зоны ВОЗ; H – глубина очага, км; Δ – минимальное удаление зоны ВОЗ от площадки, км.

При расчетах интенсивности консервативно принято, что $\Delta=0$, а $H=15$ км. По мере удаления площадки от максимальной структуры модели величина интенсивности и ее производные будут, соответственно, уменьшаться согласно соотношению (13).

Для оценки максимального ускорения a_{\max} в зависимости от интенсивности I согласно рекомендациям [22] использованы классическое соотношение С.В. Медведева, положенное в основу сейсмической шкалы MSK-64 и принятое в [1]:

$$a_{\max} = 0,8 \times 2^I, \quad (14)$$

где A_{\max} – среднее максимальное ускорение, см/с²; I – максимальная интенсивность, балл.

Анализ инструментальных и исторических данных о землетрясениях ВЕП и САП и результатов моделирования прогнозных графиков повторяемости магнитуд показал, что график повторяемости магнитуд, являющийся интегральной характеристикой сейсмического процесса, не линеен. Наклон графика b определяется условиями деформирования: при всестороннем деформировании $b \sim -1,3$, а при одноосном $b \sim -0,6$. Уровень сейсмической активности определяется отношением упругого предела к скорости деформации среды. В условиях одноосного деформирования уровень сейсмической активности для сильных землетрясений может на несколько порядков превышать уровень сейсмической активности для аналогичных землетрясений в условиях всестороннего деформирования. Это определяется соотношением области деформирования в условиях всестороннего и одноосного деформирования и изменением упругого предела в потенциальной зоне ВОЗ в процессе длительного накопления напряжений и деформаций.

Графики сейсмической опасности, выраженные в баллах (линии 3, 4 на рисунке) и максимальных ускорениях (линии 5, 6 на рисунке), рассчитаны на

основании прогнозных графиков для условий всестороннего и одноосного деформирования. Они отражают долговременную и текущую сейсмическую опасность и показывают актуальность учета условий деформирования и характера разрушения среды в пределах исследуемой территории и конкретной зоны ВОЗ.

Обсуждение полученных результатов

Принятая модель позволяет на основании геологических и сейсмотектонических данных получать прогнозные пределы и прогнозные графики повторяемости магнитуд с учетом условий деформирования и характера разрушения среды. Непротиворечивость прогнозных и наблюдаемых графиков повторяемости магнитуд подтверждает достоверность полученных прогнозных оценок и позволяет понять природу нелинейности наблюдаемых графиков повторяемости.

При прочих равных условиях наклон графика повторяемости магнитуд определяется условиями деформирования среды (в условиях всестороннего деформирования наклон близок к $-1,0$, а в условиях одноосного деформирования он стремится к $-0,5$). При этом уровень сейсмической активности определяется упругим пределом и скоростью деформации в зоне ВОЗ. Повышение уровня сейсмической активности контролируется снижением упругого предела и/или увеличением скорости деформации. Это может быть обусловлено консолидацией межблокового пространства, что приводит к уменьшению упругого предела, и/или уменьшению ширины зоны деформирования, что определяет увеличение скорости деформации. Последнее указывает не только на актуальность выявления потенциально опасных зон ВОЗ и определения их геометрических характеристик, но и на необходимость контроля стабильности их положения и изменения условий и скорости деформирования во времени.

Следует отметить, что принятая при ОСР-97 и нашедшая отражение в РБ-019-01 оценка $M_{\max} = M_{\max \text{ наб}} + 0,5$ с учетом максимальной наблюдаемой магнитуды $M_{\max \text{ наб}}$ и расчленения зоны ВОЗ на составные элементы предполагает, что величина предельного землетрясения меняется от района к району. Однако еще в начале 50-х гг. Г.А. Гамбургцев отмечал, что «вопрос о том, существует ли для каждого сейсмического района своя максимальная сила землетрясений или же отличия между районами состоят лишь в частоте возникновения землетрясений при одинаковой балльности наиболее сильных

землетрясений» остается открытым [24]. Согласно методологии ОСР-97, в настоящее время первая точка зрения представляется более правдоподобной, хотя Г.А. Гамбурцев не исключал, что в действительности правдоподобной может оказаться вторая. Подтверждением этому могут служить Нью-Мадридские землетрясения с $M=8,1$, сильнейшие землетрясения с M до 8,0 на Китайской платформе, три Газлийских землетрясения с $M_s \geq 7,0$, возникшие в районе, который до 1976 г. считался практически асейсмичным.

Для успешного прогноза места, силы и повторяемости сильных землетрясений важно установить факторы, которые определяют условия подготовки катастрофических землетрясений, и критерии, которые могут ограничить величину M_{\max} в том или ином районе, если этот район не мал и не изолирован полностью от остальной части активной зоны.

Совместный анализ частоты проявления активизированных структур рассматриваемой территории, скорости потока элементов модели соответствующих рангов, прогнозных и наблюдаемых графиков повторяемости магнитуд позволяет получить представление об условиях подготовки и проявления катастрофических землетрясений, а также оценивать магнитуды и размеры очагов для различных условий деформирования и характера разрушения.

Критерием подготовки катастрофического землетрясения может служить выход наблюдаемого графика повторяемости за пределы области, ограниченной прогнозным пределом, контролируемым соотношением (9), характеризующим уровень вероятных магнитуд M_v при хрупко-пластическом разрушении в условиях всестороннего деформирования. Данный критерий рекомендуется учитывать при контроле стабильности параметров проектной основы по результатам мониторинговых сейсмологических наблюдений при сооружении и эксплуатации ОИАЭ.

Выводы

Предлагаемая модель позволяет:

- получить прогнозные графики повторяемости магнитуд с учетом условий деформирования и характера разрушения для дальнейшей оценки кривых сейсмической опасности и определения параметров ПЗ и МРЗ;
- определить контролируемые параметры сейсмического режима;
- установить критические величины контролируемых параметров, при достижении которых могут выдаваться рекомендации на реализацию организационных и технических мер обеспечения безопасности.

Предпосылками подготовки катастрофического землетрясения могут являться:

- консолидация микроблоков в блоки и блоков в мезоблоки;
- снижение упругого предела и/или увеличение скорости деформации в зоне ВОЗ;
- увеличение форшоковой сейсмической активности на несколько порядков по сравнению с фоновой (рассеянной) сейсмичностью;
- выполаживание графика повторяемости и увеличение его уровня.

Формализованная оценка сейсмической опасности в условиях отсутствия представительной статистики землетрясений позволяет устранить противоречия в оценке параметров ПЗ и МРЗ на основе детерминистического и вероятностного подходов и может способствовать дальнейшему совершенствованию риск-ориентированных подходов к регулированию безопасности.

Статья подготовлена в рамках работ по теме № 318.3-2015-2015 «Разработка методики для оценки прогнозных графиков повторяемости магнитуд землетрясений по геологическим данным района размещения объектов использования атомной энергии».

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 19.10.2001 № 9.
2. 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.
3. Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. Избранные труды. М., Изд-во Академии горных наук, 1997.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-032-01: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 8.11.2001 № 10.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.12.2005 № 16.
6. Уломов В.И. Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. – ОИФЗ РАН, 1999.
7. Shebalin N.V., Trifonov V.G., Kozhurin A.I., Ulomov V.I., Tatevossian R.E. and Ioffe A.I. A Unified Seismotectonic Zonation Northtrn Eurasia. *Journal of Earthquake Prediction Research* 8 (2000).
8. Руководство по безопасности в области использования 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.
9. Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б. Полнота реализации нормативных требований при обосновании сейсмической безопасности атомных электрических станций и хранилищ отработанного ядерного топлива. *Ядерная и радиационная безопасность*, № 3 (77), 2015.
10. Бугаев Е.Г. Оценка пределов изменения графиков повторяемости магнитуд для развития риск-ориентированного регулирования безопасности атомных станций (на примере районов Восточно-Европейской и Северо-американской платформ). *Вопросы инженерной сейсмологии*. ISSN 0132 – 2826. М., 2014. Т. 41. № 3.
11. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород. *ДАН СССР*, Т. 247. № 4, 1979.
12. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М., Недра. 1986.
13. Родионов В.Н. Сейсмический режим и блочное строение земной коры. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. Вып. 3, 1994.
14. Бугаев Е.Г., Спивак А.А. Оценка эффективных деформационных и прочностных характеристик среды в очагах землетрясений. Сборник научных трудов «Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений)». М., 2002.
15. Бугаев Е.Г. О структурированной и рассеянной сейсмичности, жесткости очагов землетрясений и нелинейности графиков повторяемости магнитуд. *Геодинамика и тектонофизика*. Вып. 2, № 3, 2011.
16. Кочарян Г. Г. Масштабный эффект в сейсмотектонике. *Geodynamics & Tectonophysics* 2014, Volume 5, Issue 2. doi:10.5800 /GT2014520133.
17. Штейнберг В.В., Пономарева О.Н. О размерах сильных землетрясений. Сильные землетрясения и сейсмические воздействия. Сб. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 28. М., Наука, 1987.
18. Бугаев Е.Г. Взаимосвязь напряженного состояния земной коры с сейсмическим режимом на глобальном, региональном и локальном уровне. *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле*. Третья тектонофизическая конференция. Материалы докладов конференции 8 – 12 октября 2012 г., Москва, ИФЗ РАН, 2012.
19. Раутиан Т.Г. Определение параметров субочагов землетрясений и их интерпретация. Исследования по сейсмической опасности, Сб. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. № 29, 1988.
20. Бугаев Е.Г. Методика оценки максимального потенциала платформенных землетрясений (на примере условий размещения площадки Калининской АЭС). Сб. *Физика Земли*, № 2, М., 1999.

21. Резниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М., Наука, 1985.
22. Руководство по безопасности в области использования атомной энергии. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. РБ-006-98: утверждено постановлением Госатомнадзора России от 29.12.1998 № 3.
23. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М., Наука, 1977.
24. Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. Бюллетень Совета по сейсмологии, 1955, № 1.

References

1. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Seismic design standards for nuclear power plants. NP-031-01, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 9 of 19.10.2001.
2. 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.
3. N.V. Shebalin. Strong earthquakes. Selectas. Moscow, publishing house of Mining Science Academy, 1997.
4. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Siting of nuclear power plants. Basic safety criteria and requirements. NP-032-01, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 10 of 8.11.2001.
5. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Consideration of natural and human-induced external impacts on nuclear facilities. NP-064-05, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 16 of 20.12.2005.
6. V.I. Ulomov, L.S. Shumilina. Challenges in the seismic zoning of Russian territory. OIFZ RAS, 1999.
7. N.V. Shebalin, V.G. Trifonov, A.I. Kozhurin, V.I. Ulomov, R.E. Tatevossian, and A.I. Ioffe. Unified seismotectonic zonation of Northern Eurasia. Journal of Earthquake Prediction Research № 8, 2000.
8. Safety guide in the field of the use of atomic energy. Geodynamic assessment of the seismic hazard of sites with hazardous radiological and nuclear facilities. RB-019-01, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 16 of 28.12.2001.
9. Ye.G. Bugaev, S.B. Kishkina. Adequate implementation of regulatory requirements in seismic safety cases for nuclear power plants and spent fuel storage facilities. Nuclear and radiation safety. Quarterly academic and research periodical of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service, 3 (77), 2015.
10. 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). Issues of engineering seismology. ISSN 0132 - 2826. Moscow, 2014. v. 41, № 3.
11. M.A. Sadovskiy. Natural lumpiness of rock formations. DAN USSR, v. 247, №4, 1979.
12. V.N. Rodionov, I.A. Sizov, V.M. Tsvetkov. Fundamentals of geomechanics. Moscow, Nedra. 1986.
13. V.N. Rodionov. Seismic setting and block structure of the Earth's crust. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 3, 1994.
14. 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)", Moscow, 2002.
15. Ye.G. Bugaev. Structured and diffuse seismicity, earthquake focus impedance, and non-linearity of magnitude recurrence curves. Geodynamics and Tectonophysics. Issue 2, № 3, 2011.
16. A.G. Kocharyan. Scale effect in seismotectonics. Geodynamics and Tectonophysics 2014, volume 5, issue 2, doi:10.5800 /GT2014520133.

17. V.V. Shteinberg, O.N. Ponomareva. Scale of strong earthquakes. Strong earthquakes and seismic impacts. Compilation. Issues of engineering seismology. Issue 28. Moscow, Nauka, 1987.
18. Ye.G. Bugaev. Interrelation of the strain state of the Earth's crust and seismic setting at global, regional and local levels. Tectonophysics and topical issues of geoscience. Third tectonophysics conference. Conference proceedings, October 8-12, 2012, Moscow, Geophysics Institute with RAS, 2012.
19. T.G. Rautian. Identification and interpretation of earthquake subfocus parameters. Seismic hazard investigations. Compilation. Issues of engineering seismology. Issue № 29, 1988.
20. Ye.G. Bugaev. Methodology for assessing maximum potential of platform earthquakes (exemplified by the conditions of the Kalinin NPP site). Compilation Geophysics, № 2, Moscow, 1999.
21. Yu.V. Reznichenko. Selectas. Seismology challenges. Moscow, Nauka, 1985.
22. 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.
23. New catalogue of strong earthquakes at the USSR territory. Moscow, Nauka, 1977.
24. G.A.S. Gamburtsev. Status and prospects of earthquake predictions. Seismology Board Bulletin, 1955, № 1.

