

Строительные конструкции, здания и сооружения Structural units, buildings, structures

Научная статья
УДК 699.841:624.94.012.45:550.34
DOI: 10.14529/build260102

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ОКОЛО 7 БАЛЛОВ НА ОСТАТОЧНУЮ СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ПОЛНОСБОРНЫХ ЗДАНИЙ НА КАМЧАТКЕ

А.В. Соснин[✉]

Научно-исследовательская лаборатория оценки безопасности результатов проектирования и сейсмостойкости строительных конструкций (СейсмЭстимЛаб), Смоленск, Россия
[✉] seism.estim.lab@mail.ru

Аннотация. На примере сейсмических событий, произошедших вблизи полуострова Камчатка в период с 1971 г. по 2025 г., представлены положения по проведению расчетной оценки остаточной сейсмостойкости существующих зданий с учетом влияния прошлых умеренных землетрясений. Таковыми принимаются землетрясения, при которых в конструкциях образуются повреждения, не приводящие к полной потере эксплуатационных свойств зданием. Рассмотрены события, выразившиеся сейсмическим эффектом около 7 баллов в г. Петропавловске-Камчатском на площадках, сложенных средними грунтами. Принимается, что многие существующие полносборные здания в г. Петропавловске-Камчатском могли подвергаться воздействию не менее пяти подобных землетрясений. Уточнена математическая модель количественной оценки дефицита сейсмостойкости (I_d), ранее представленная автором (2023). Предложенная модель оценки I_d предусматривает проведение поверочных расчетов зданий нелинейным статическим методом. Приведены предпосылки и допущения, позволяющие применить формулу Байеса для проведения оценки I_d существующих зданий. Для проверки объективности предложенных уточнений представлены графические зависимости, отражающие изменение I_d в зависимости от срока эксплуатации здания (T_{ex}). Определено, что от указанных прошлых умеренных землетрясений в полносборных зданиях может формироваться дефицит сейсмостойкости, величина которого при прочих равных условиях превысит ожидаемую от 9-балльного сейсмического воздействия. Результаты расчетной оценки остаточной сейсмостойкости представлены на примере железобетонного каркаса из 4 этажей, принятого в качестве ближайшего аналога каркаса зданий серии КПС. Оценка I_d проводилась с применением записи сейсмических колебаний Шипунского землетрясения 17.08.2024 г., приведенной к значению пикового ускорения грунта 0,35g. Остаточная сейсмостойкость указанного каркаса в рассматриваемом примере определена равной 8,1 балла.

Ключевые слова: камчатские землетрясения 1971–2025 гг., накопление повреждений зданиями, дефицит сейсмостойкости, остаточная сейсмостойкость, полносборные железобетонные здания, здания каркасно-панельной серии КПС, нелинейный статический метод

Для цитирования. Соснин А.В. Учет влияния сейсмических воздействий интенсивностью около 7 баллов на остаточную сейсмостойкость полносборных зданий на Камчатке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2026. Т. 26, № 1. С. 18–30. DOI: 10.14529/build260102

Original article
DOI: 10.14529/build260102

ACCOUNT OF SEISMIC EFFECT WITH INTENSITY AT ABOUT 7 MACROSEISMIC SCALE POINTS ON RESIDUAL EARTHQUAKE-RESISTANCE OF FULL-PRECAST BUILDINGS IN THE KAMCHATKA PENINSULA

A. V. Sosnin[✉]

Scientific-Research Laboratory of Design Outcomes Safety Estimation and Earthquake-Resistance of Building Structures (Seism.estim.lab), Smolensk, Russia
[✉] seism.estim.lab@mail.ru

Abstract. Based on seismic events that occurred near the Kamchatka Peninsula between 1971 and 2025, the article presents guidelines for conducting a computational assessment of residual earthquake-resistance of existing buildings,

© Соснин А.В., 2026.

considering past moderate earthquakes. Moderate earthquakes are defined as seismic events that cause structural damage without leading to a complete loss of a building operational properties (serviceability). The study examines earthquakes with an intensity of approximately 7 points on the MSK earthquake-intensity scale in the city of Petropavlovsk-Kamchatsky on sites composed of medium soils. It is assumed that many existing full-precast buildings in Petropavlovsk-Kamchatsky may have been subjected to at least five similar earthquakes. A mathematical model for quantitative assessment of earthquake-resistance shortage (further I_d), previously presented by the author in 2023, are refined. The proposed I_d -model foresees check computational assessment of a building using Pushover Analysis. Assumptions and backgrounds which allowed using of the Bayes' formula for providing of the I_d assessment of existing buildings are presented. To verify objectivity of the proposed refinements, graphical dependencies reflecting relationship between I_d value and service life of a building (T_{ex}) are plotted. It has been determined that past moderate earthquakes may form in full-precast buildings a value of earthquake-resistance shortage which will exceed, under otherwise equal conditions, expected from a rare earthquake corresponding 9-points of the earthquake-intensity scale. The results of the residual earthquake-resistance assessment are presented on the example of a 4-story RC frame, adopted as a closest analogue of the KPS series buildings frame. The I_d assessment was conducted using earthquake motion record according to the Shipunsky Earthquake of August 17, 2024 scaled to a peak ground acceleration of 0.35g. In the considered example, the residual seismic-resistance of the analyzed frame is determined to be 8.1 seismic intensity points.

Keywords: Kamchatka Peninsula Earthquakes (1971–2025), damage accumulation in buildings, earthquake-resistance shortage, residual earthquake-resistance, full-precast concrete buildings, KPS-series frame-panel buildings, nonlinear static Pushover Analysis

For citation. Sosnin A.V. Account of seismic effect with intensity at about 7 macroseismic scale points on residual earthquake-resistance of full-precast buildings in the Kamchatka Peninsula. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2026;26(1):18–30. (in Russ.). DOI: 10.14529/build260102

Описание рассматриваемой проблемы.

Постановка задачи

В период с 20 июля по 04 ноября 2025 года вблизи п-ва Камчатка произошла большая серия землетрясений, на фоне которых выделялись события 20.07.2025 (с моментной магнитудой $M = 7,4$), 29(30).07.2025 ($M8.8$) и 18.09.2025 ($M7.8$). Основное землетрясение реализовалось в г. Петропавловске-Камчатском на средних грунтах с сейсмическим эффектом около 7 баллов (по самым осторожным оценкам). При этом известно [1–3], что землетрясения в северной части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны ранее также происходили в 1737 ($M8.0$), 1841 ($M8.4$), 1904 ($M8.3$), 1923 ($M8.5$), 1952 ($M8.5$), 1959 ($M8.0$), 1971 ($M7.2$, $M7.9$) и 2024 ($M7.3$) годах.

Первые полносборные здания на территории г. Петропавловска-Камчатского стали возводить после 1956 года. В настоящее время фактический срок эксплуатации преобладающего количества зданий жилого фонда и административно-социального блока составляет около 50 лет. Учитывая все прошлые основные сейсмические события с сопутствующими им сильными форшоками и афтершоками, не будет грубой ошибкой принять, что здания из крупных сборных элементов могли подвергаться воздействию не менее пяти землетрясений с сейсмическим эффектом около 7 баллов. При этом из результатов сейсмологических исследований [3–5] следует, что землетрясение интенсивностью 9 баллов на территории г. Петропавловска-Камчатского все же может произойти, если очаг будет находиться вблизи у береговой линии. Но вероятность последнего намного меньше, чем у событий с сейсмическим эффектом в 7 баллов, которые обуславливаются влиянием очагов вблизи глубоководного желоба.

В монографии [6] со ссылкой на исследование¹ отмечается эффект накопления повреждений в зданиях вследствие многократного воздействия на них землетрясений относительно небольшой силы и приводятся статистические данные о влиянии на здания многократных сейсмических воздействий интенсивностью 4–5 баллов. Опасность таких воздействий заключается в том, что они могут явиться причиной усталости материалов и уменьшением их прочности с течением времени. Указанная проблема особенно актуальна для зданий, в которых присутствуют стыки сборных железобетонных элементов. В таком случае снижение пространственной жесткости здания может происходить при отсутствии видимых повреждений конструкций за счет влияния скрытых расстройств его стыков и деталей, что подтверждается результатами натурных вибрационных экспериментов зданий, проведенных специалистами ЦНИИЭП жилища, например [7].

В рассматриваемых сейсмогеологических условиях г. Петропавловска-Камчатского низшие частоты собственных колебаний зданий массового строительства могут сдвинуться ближе к диапазону колебаний грунтов, генерируемых северной частью Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. В указанном исследовании² М.В. Федякова приводятся сведения, подтверждающие, что после землетрясения 24.11.1971 г. в Петропавловске-Камчатском многие здания получили повреждения

¹ Федяков М.В. Натурные исследования динамических параметров зданий типовой застройки. Экспериментальные исследования сейсмостойкости зданий и развитие теории сейсмостойкости // Сб. науч. тр. Госстрой СССР, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; под ред. С.В. Полякова. М.: ЦНИИСК, 1984. 159 с.

² Там же.

и период собственных колебаний таких зданий существенно изменился. Согласно другим исследованиям [5] последствий указанного Петропавловского землетрясения 1971 г. пики спектров, характеризующих неблагоприятную реакцию грунтов, выделяются в диапазоне 0,8–1,0 Гц, а также 1,67–5 Гц. Последнее четко идентифицируется на спектрах реакции и спектрах действия формата ADRS, полученных автором при обработке записей волновых форм Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. [8]. Результаты расчетов, выполненных нелинейным статическим (НСМ) и нелинейным динамическим (НДМ) методами, показывают, что обозначенные пики спектров будут определять дефицит сейсмостойкости зданий каркасно-панельной серии [9].

На территории Камчатского края с 2009 года для оценки дефицита сейсмостойкости зданий применяется Методика по обследованию зданий типовой застройки с целью определения их сейсмостойкости и необходимости сейсмоусиления [10] (далее в тексте – Методика). В пункте 8.1 Обоснования к Методике указано, что «...Для «старых» зданий, отслуживших 40÷50 лет, вероятность поражения расчетным землетрясением значительно снижается за счет уменьшения остаточного срока службы. В работе, разработанной специально для условий Камчатки и Сахалина, учитывается эффект снижения сейсмической нагрузки у «старых» зданий за счет снижения вероятности (обеспеченности) появления 9-балльного землетрясения за оставшийся срок службы здания. В результате предлагается производить снижение расчетной амплитуды по формуле...» (далее приводится формула со ссылкой на работу [11]). То есть при оценке дефицита сейсмостойкости зданий массового строительства Методикой предусматривается учитывать физический износ зданий путем снижения интенсивности расчетной сейсмической нагрузки, определяемой с учетом периода повторяемости расчетных землетрясений один раз в 500 лет. Это при том, что расчетные сейсмические нагрузки предварительно предусматривается определять с учетом понижающего коэффициента K_1 , интегрально учитывающего повреждения конструкций здания при расчетном землетрясении. Оценка дефицита сейсмостойкости по Методике проводится с учетом ожидания того, что 9-балльное событие не произойдет.

Инженерный анализ последствий прошлых сильных землетрясений свидетельствует о том, что железобетонные каркасные здания, запроектированные в соответствии с правилами проектирования, в условиях землетрясений расчетной интенсивности работают в существенно нелинейной стадии деформирования. Землетрясение 29(30).07.2025 г. подтвердило, что требуется переосмысление³ ряда расчетных положений, на кото-

³ Соснин А.В. Сильные камчатские землетрясения 2024–2025 г. и перспективы развития методики опреде-

рых базируется Методика [10]. Указанная Методика не может считаться завершенной, поскольку ее положениями не предусматривается возможность непосредственного учета неупругих деформаций несущих конструкций при сильном землетрясении и не учитываются особенности, указанные в наименовании настоящей статьи. Между тем важность учета таких особенностей может быть значительна. Для их учета в работе [12] была предложена математическая модель расчетной оценки дефицита сейсмостойкости (I_d), основанная на применении нелинейных процедур НСМ. Предложенная модель позволяет производить расчетную оценку более строго, с точностью до сотых значений балла. Несмотря на имеющиеся преимущества модели, указанные в [12], упомянутая летне-осенняя серия камчатских землетрясений четко дала понять, что модель расчетной оценки I_d нужно развивать дальше. Принято решение скорректировать предложенную модель так, чтобы ею учитывался накопительный эффект от влияния нескольких прошлых умеренных землетрясений. Уточнение математической модели проводилось с применением информации (в том числе на текстовых описаниях и фотоматериалах повреждений строительных конструкций зданий), которая была обработана и систематизирована автором в августе – октябре 2025 года.

Характеристика сейсмогеологической и макросейсмической подосновы исследования

Согласно сеймотектонической схеме Камчатско-Курильской зоны, составленной А.Е. Святловским (1954), г. Петропавловск-Камчатский относился к территории с сейсмическим эффектом до 8 баллов [1].

Повторяемость сильных землетрясений вдоль окраины Тихого океана вблизи п-ва Камчатка по данным многих исследователей составляет примерно одно событие в 100(±50) лет [4]. Отмечается⁴, что период повторяемости сейсмического события 29(30).07.2025 г. специалистами Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской

ления остаточной сейсмостойкости зданий на примере серии КПС. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов // Сб. тр. Десятой Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием). Петропавловск-Камчатский, 28 сентября – 04 октября 2025 г. / отв. ред. Д.В. Чебров. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 185–188.

⁴ Хитров В. Пять секунд на спасение: Чебров рассказал, когда на Камчатке ожидают новое мегаземлетрясение [ответы директора регионального филиала Единой геофизической службы РАН Даниила Чеброва на вопросы журналиста «Камчатского времени»]. Текст: непосредственный // Камчатское время, 2025, 27 августа (дата обращения 28.08.2025).

академии наук» определен равным один раз в 200 лет.

Известно, что предыдущее сильное землетрясение, произошедшее вблизи г. Петропавловска-Камчатского 24.11.1971 г., реализовалось на средних грунтах с сейсмическим эффектом 7 баллов по шкале MSK-64 [4].

На основании схемы прогноза, построенной в том числе с учетом последствий Кроноцкого землетрясения (05.12.1997, M7.5–8.0), А.В. Викулиным отмечалось [13], что расположение очага следующего сильнейшего землетрясения следует ожидать в Южно-Камчатском блоке. Ожидаемый интервал времени для обозначенного блока им был определен равным 2008(±10) лет с вероятностью около 70 % и 2008(±20) лет с вероятностью около 95 %. А.В. Викулин отмечал, что сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском при таком ожидаемом землетрясении на средних грунтах не будут превышать 7 баллов.

В геологическом отношении территория г. Петропавловска-Камчатского находится в пределах Петропавловского горста, сложенного смятыми в пологие складки метаморфизованными породами верхнего мела и палеогена, прикрытыми четвертичными лавами, пирокластическими пеплуфувовыми накоплениями и элювиально-делювиальными каменистыми покровными супесями, щебнями. Пирокластические отложения развиты в основном на севере города, делювиально-элювиальные покрывают восточную его часть, южная и западная части территории сложены коренными породами мелового и неогенового возраста. В пределах города мощность рыхлых отложений очень изменчива – от 0 до 500 м; часто резкие изменения мощности наблюдаются в пределах одного дома [14].

К средним грунтам по сейсмическим свойствам на территории г. Петропавловска-Камчатского отнесены грубообломочные и делювиально-элювиальные отложения и рыхлые пирокластические отложения большой мощности (более 100 м). В исследовании [15] рассмотрены несколько сейсмогеологических моделей среды (СГМ). Так, СГМ-1 представлена толщей делювиальных супесей и суглинков мощностью 12 м с включением обломочных пород на скальном основании (участок в центральной части города). СГМ-2 включает рыхлые пирокластические элювиально-делювиальные отложения мощностью 49 м с заполнителем в виде пеплового материала и суглинка. СГМ-3 состоит из мощных пирокластических отложений, представленных трехслойной средой из материалов различной плотности и цементированности (разрез характерен для одного из участков северной части города). Из макросейсмических данных инженерного анализа последствий Петропавловского землетрясения 24.11.1971 г. следует, что интенсивность сейсмического воздействия была близка к 7 баллам при всех указанных моделях

грунтовой среды. При этом для СГМ-1 интенсивность в среднем была менее 7 баллов, а для СГМ-2 и СГМ-3 составила 7 баллов и несколько выше.

Принимается, что сильные землетрясения на земном шаре с магнитудой более 7,7 распределяются, исходя из гипотезы о независимости числа землетрясений за некоторый период времени в непересекающихся объемах, что позволяет отнести их к случайным независимым событиям. При этом землетрясения отдельной сейсмогенной Курило-Камчатской зоны признаны взаимосвязанными событиями, поскольку закономерным образом размещаются в пределах указанной зоны и сгруппированы во времени [3]. Другой особенностью Камчатских землетрясений отмечается⁵ большая длительность сейсмических колебаний грунта, которая, например, при указанном Петропавловском землетрясении 24.11.1971 г. составляла около 40 секунд. В том же исследовании отмечается, что цуги такой длительности даже при невысоких значениях ускорений приводят к повреждениям конструкций зданий, как это и было отмечено при обследовании последствий упомянутого землетрясения в 1971 г.

По данным Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН сейсмический эффект от события 29(30).07.2025 г. на средних грунтах в Петропавловске предварительно определен равным 7 баллам (макросейсмическое обследование зданий в настоящее время еще проводится). Отмечаются следующие важные особенности указанного землетрясения [16]. Землетрясение, произошедшее 29(30).07.2025 г., признано сильнейшим событием в Камчатской сейсмофокальной зоне с начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 1961 г. и сильнейшим со времени Большого Камчатского землетрясения (1952). Очаг события 29(30).07.2025 г. расположился на континентальном склоне Камчатки, имеет типичный субдукционный взбросовый механизм. Очаговая область почти полностью повторяет очаг указанного землетрясения 1952 года. Интервал между двумя такими сильными событиями даже для всей сейсмофокальной зоны Камчатки признан крайне малым [16] – 73 года между двумя землетрясениями с магнитудой 8.8–9.0 балла в одном месте почти на порядок короче ожидаемого.

Самый короткий за всю историю наблюдений промежуток между мегаземлетрясениями на юге Камчатки объясняется⁶ низкой раздробленностью

⁵ Федякова С.Н. Экспериментальное исследование зависимости колебаний грунта и сооружений от интенсивности землетрясения и геологических условий г. Петропавловска-Камчатского: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.12. Москва, 1977. 176 с.

⁶ Лобковский Л.И. К вопросу об аномально коротком промежутке времени между очагами мегаземлетрясений 29.07.2025 и 04.11.1952 в Курило-Камчатской зоне субдукции / Материалы докладов Научного совета

(монолитностью) расположенного там блока фронтального клина, в котором относительно быстро накапливается предельная упругая энергия в процессе субдукции.

Из сообщений очевидцев Камчатского землетрясения 29(30).07.2025 г. и предоставленных ими фотоматериалов (в том числе из Telegram-канала <https://t.me/regiontv41>), обработанных и систематизированных автором в августе – октябре 2025 года, следует, что некоторые повреждения получили здания каркасно-панельной серии КПС, крупноблочные дома серии 1-306С, 1-307С и крупнопанельные здания серии 1-464АС. Последние три типа зданий получили незначительные повреждения, характеризующиеся проявлением признаков работы стыков сборных элементов. При этом крупноблочные дома серии 306С и крупнопанельные дома серии 1-138С и 1-138К проявили себя с лучшей стороны, практически без видимых повреждений. Не рассматривались здания со стенами из штучной кладки мелких блоков с железобетонными включениями и монолитными поясами, поскольку о поведении указанного типа зданий представлено мало статистической информации. При этом расчетные положения настоящей работы также в полной мере могут быть применены и к этим зданиям.

Видимые повреждения изучены в семи зданиях каркасно-панельной серии КПС и ее модификациях, среди которых одна поликлиника, два общежития, одно административное здание, два общественных (офисных) здания, одна школа. В некоторых из указанных зданий повредились внутренние перегородки, нарушилось заполнение антисейсмических швов между смежными динамически независимыми блоками (температурными отсеками), образовались трещины вдоль швов в месте примыкания конструкций перегородок и самонесущих стен к несущим конструкциям железобетонного каркаса. В одном из зданий в колоннах железобетонного каркаса были выявлены трещины, повторяющие положение продольной рабочей арматуры, а также трещины и отслоения защитного слоя бетона на участке установки поперечной арматуры в уровне сопряжения с ригелями и вблизи опорной части. Отмечалось, что некоторые повреждения образовались 20.07.2025 г. и стали явно выраженными после землетрясения 30.07.2025 г. Очевидцы прошедших землетрясений сообщали, что при малейших сейсмических точках в стенах слышался звук, похожий на хруст, а также щелчки и скрипы, после которых перестали нормально закрываться межкомнатные двери.

В терминах ГОСТ Р 57546–2017 исследованные повреждения указанных зданий принимались соответствующими не более второй степени. При этом важно учитывать, что в зданиях могут быть и

скрытые повреждения, которые практически не поддаются визуальному обследованию (в том числе и по той причине, что фасады многих зданий оказались защищены декоративным сайдингом).

В материалах работ, посвященных инженерному анализу последствий прошлых землетрясений, описание сейсмической реакции зданий каркасно-панельной серии КПС ранее не приводилось, поскольку такие здания стали возводить в г. Петропавловске-Камчатском только после 1972 года. Поэтому указанная в статье информация будет полезна для инженеров, которые в дальнейшем будут обследовать, эксплуатировать и усиливать такие здания.

Основные модели и методы

Результаты и выводы настоящей работы получены при уточнении математической модели I_d , представленной в работе [12]; там же приведены основные принятые предпосылки и допущения. Указанная модель предусматривает проведение расчетной оценки сейсмостойкости с применением расчетных процедур НСМ, в частности, процедуры Capacity Spectrum Method (пояснено в [9]). Базовое выражение указанной модели имеет следующий вид:

$$I_d = \text{round} \left[-1 \times \left[\log \left[\frac{1}{SF} \times \frac{1}{\left(\frac{T_{st} - T_t}{T_{st}} \right)^{0.333}}, i \right] \right], 2 \right], \quad (1)$$

где единичный множитель со знаком «минус» добавлен для удобства идентификации дефицита сейсмостойкости; SF – поправочный коэффициент к входному спектру действия примененной расчетной процедуры НСМ (значение 1,0 соответствует исходным расчетным параметрам записи сейсмического воздействия); T_{st} – расчетный срок службы здания (в годах); i – индекс в основании логарифма, зависящий от увеличения сейсмического эффекта с повышением интенсивности землетрясения на один балл макросейсмической шкалы; T_t – возраст здания (в годах), определяемый из выражения

$$T_t = T_{ex} (e^{-pt_w}), \quad (2)$$

где T_{ex} – период времени между окончанием работ по возведению здания и проведением расчетной оценки дефицита сейсмостойкости (в годах); e – число Эйлера; p – сейсмическая сотрясаемость территории, на которой расположено здание (в годах⁻¹); t_w – время ожидания (в годах).

Дополнительного пояснения к ранее указанным требует параметр SF . Рассмотрим для примера результаты расчетов по НСМ для железобетонного каркаса здания из 4 этажей [9]. На рис. 1 представлены графические результаты НСМ при учете записи колебаний компоненты e_w Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. (Шипунское-1) [17], зарегистрированной на с.с. Дачная (DCH), при значении пикового ускорения 0,28 g. Параметр SF соответствует положению точки, характери-

по проблемам цунами, Петропавловск-Камчатский, 04.12.2025 г.

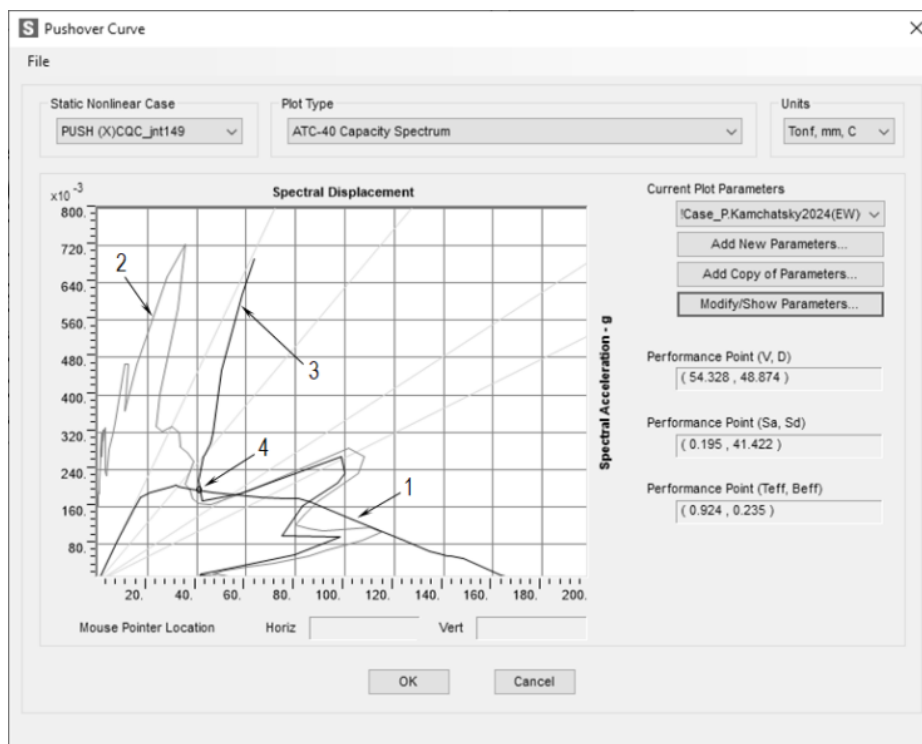


Рис. 1. Графические результаты расчетов исследуемого каркаса по HCM в SAP2000 при $SF = 0,8$ для категории уязвимости «В» (в формате ADRS)

Примечание. На рис. 1 приведены следующие цифровые обозначения: 1 – спектр несущей способности исследуемого железобетонного каркаса; 2 – расчетный (редуцированный) спектр действия выбранной компоненты; 3 – траектория поиска контрольной точки; 4 – первое пересечение спектра несущей способности изучаемой системы с траекторией поиска 3 (контрольная точка)

зующей упруго-пластические свойства изучаемой системы (контрольная точка обозначена цифрой 4 на рис. 1), на ее кривой равновесных состояний (кривая 1 на рис. 1). Определяется SF относительно положения редуцированного спектра (кривая 2 на рис. 1), полученного с учетом способности изучаемой системы к рассеянию энергии колебаний за счет гистерезисного поведения. Переход от одного представления редуцированного спектра к другому через применение SF осуществляется в зависимости от уровня допускаемых повреждений [18]. Проводимым исследованием предусматривается, что получаемое значение SF контролируется совместными расчетами здания с применением нелинейного статического и нелинейного динамического методов [8, 9]. Важно отметить, что под величиной SF кроется результат большой предварительной работы по обработке, подготовке записей сейсмических колебаний и формированию расчетной динамической модели здания.

Предложенная математическая модель оценки I_d , в отличие от указанной в Методике [10], позволяет: (а) учесть интенсивность сейсмических сил без понижающих коэффициентов вследствие особенностей нелинейного деформирования несущих конструкций; (б) применить записи сейсмических колебаний региональных землетрясений; (в) учесть особенности демпфирования колебаний

здания и гистерезисное поведение в зонах пластичности конструкций; (г) учесть способность системы к пластическому деформированию при сильном землетрясении, (д) учесть ожидание сильного расчетного землетрясения. Все указанные перечисления в конечном итоге солидарно определяют величину SF .

Основные предпосылки и допущения

Для уточнения модели оценки I_d в настоящей работе дополнительно рассмотрены следующие основные предпосылки и допущения. Срок службы⁷ для всех рассматриваемых типов зданий принимался равным 100 годам. Медианное значение срока эксплуатации зданий принималось равным 50 годам. В качестве умеренных принимаются землетрясения, при которых в конструкциях зданий образуются повреждения, не приводящие к полной потере эксплуатационных свойств зданием (соответствуют уровню повреждений Immediate Occurance; уровни повреждений пояснены в [18]).

⁷ Средние нормативные сроки службы основных фондов учреждений и организаций, состоящих на государственном бюджете (для определения износа при переоценке основных фондов по состоянию на 1 января 1973 г.) / Центральное статистическое управление при Совете Министров СССР. Апатиты: Статистика, 1972, 34 с.

Принималось, что перед проведением оценки I_d инженеру будет достоверно известно количество землетрясений, сейсмический эффект от которых на территории г. Петропавловска-Камчатского на средних грунтах выразился интенсивностью сейсмических воздействий около 7 баллов. Принималось, что некоторые крупнопанельные здания серии 1-464АС, крупноблочные здания серии 1-307с и серии 1-306с подверглись влиянию не менее пяти подобных сейсмических событий, а здания региональной каркасно-панельной серии КПС и ее модификаций прошли натурное испытание тремя такими землетрясениями. Форшоки и афтершоки, кроме специально оговоренных, пока будем считать условно фоновыми событиями (хотя и их влияние, по-хорошему, тоже нужно уметь учитывать), вызвавшими упругие колебания зданий.

Принималось, что предыдущие 6–7-балльные воздействия с определенной степенью повреждений сказались на остаточной сейсмостойкости зданий в г. Петропавловске-Камчатском. Учитывалось, что при проектировании существующих полносборных зданий на территории г. Петропавловска-Камчатского применялась преимущественно шкала MSK–64.

Учитывалось, что 9-балльное воздействие может реализоваться в г. Петропавловске-Камчатском и при магнитуде менее $M7.0$, если очаг землетрясения окажется вблизи береговой линии (долгосрочный прогноз по А.В. Викулину [4, 14]). Поэтому оценка поправки за возраст здания и ее влияние при оценке I_d производились в терминах сейсмического эффекта (реализовавшегося на площадках, сложенных средними грунтами), а не в терминах энергетических характеристик землетрясения. В этом заключается существенная особенность настоящей работы.

Принималось, что гипотеза о некоррелированности землетрясений в пространстве и во времени не всегда справедлива, поскольку не учитывает взаимосвязи землетрясений в близких пространственно-временных интервалах, а также проявлений этих зависимостей в виде форшоков и афтершоков [19].

На основании инженерного анализа последствий прошлых землетрясений принималось, что при сейсмическом воздействии, соответствующем 7 баллам шкалы MSK–64, в здании средней этажности (4–5 этажей) с железобетонным остовом, относящемся к категории зданий массового строительства (рассчитанном с применением только ЛСМ на действие расчетных сейсмических нагрузок, соответствующих 8–9 баллам шкалы MSK–64), могут реализоваться повреждения, приводящие к частичной потере эксплуатационных свойств. Принималось, что Шипунское-1 (17.08.2024) и Камчатское (30.07.2025) землетрясения обладают схожими частотными характеристиками.

При уточнении модели оценки I_d автор придерживался гипотезы, что если повреждения от принятого умеренного землетрясения (которое может повториться несколько раз за срок службы здания) связаны со сроком его эксплуатации, то последний можно использовать для более точной оценки вероятности образования таких повреждений (в сравнении с оценкой вероятности образования повреждения, проведенной без учета этого предположения).

При оценке объективности всех рассмотренных предпосылок дополнительно учитывались положения теории перспектив, изложенной в работах Д. Канемана и А. Тверски (1979, 1992) [20, 21]. Согласно указанной теории может происходить когнитивное искажение вероятности, когда люди оценивают возможные результаты не в абсолютных значениях, а относительно субъективной точки отсчета, которая определяется текущей ситуацией и ожиданиями. При этом может происходить нелинейное восприятие вероятностей, характеризующееся тем, что люди склонны переоценивать маловероятные события и недооценивать высоковероятные.

Одним из существенных допущений при проведении интерпретации результатов настоящей работы следует признать неизменность величины периода собственных колебаний здания, соответствующего его текущему техническому состоянию, при итерационном переборе n_0 количества прошедших умеренных землетрясений. Компенсируется такое допущение в каждом конкретном случае тем, что перед применением предложенной модели I_d предусматривается идентификация расчетной динамической модели здания на основе результатов обследования технического состояния и (или) анализа результатов известных натуральных экспериментов.

Также важно напомнить о незначительном расхождении (здесь – около 2 %) в оценках макросейсмического эффекта, указанных в современных сейсмологических исследованиях, и оценках, основанных на результатах исследований, примененных в качестве подосновы для настоящей работы. Указанное расхождение обуславливается особенностями определения средних значений пикового ускорения по шкале ШСИ–17 и шкале MSK–64.

Положения по применению формулы Байеса

Для реализации сформулированных предпосылок и допущений принято решение применить положения, которые позволяли бы количественно определить вероятность реализации события на основе информации, полученной из прошлых подобных землетрясений. Для такого случая может быть применена [22] формула Байеса, также называемая формулой вероятности гипотез. В работе [23] отмечается, что первым Байесовскую статистическую модель к исследованию проблемы возникновения землетрясений применил Д. Бенджа-

мин⁸ (Benjamin J.R.) в 1968 году. Потом Байесовский подход в исследованиях по картированию сейсмической опасности применили С.Р. Mortgat, Н.С. Shah (1979) [24] и К.В. Campbell (1982 и 1983) [25, 26].

Согласно теореме Байеса вероятность некоторого случайного события H , как правило, изменяется, если уже известно, что произошло некоторое другое случайное событие A . Вероятность H при условии, что A уже произошло с вероятностью $P(H) \neq 0$, называется условной вероятностью H при условии A (обозначается $P(H|A)$). Вероятности $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$, ..., $P(H_n)$ называются априорными, то есть назначенными до проведения случайного эксперимента (события). Принимается, что после получения дополнительной информации в ходе проведения случайного эксперимента вероятности меняются. Последнее требует вычисления новых вероятностей $P(H_i|A)$, при условии того, что произошло некоторое событие A . Вероятность $P(H_i|A)$ называется апостериорной, то есть полученной в результате опыта. Если $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ есть полная система событий, а вероятность события A не равна нулю, то применяется формула

$$P(H_i|A) = \frac{P(H_i) P(A|H_i)}{\sum_{j=1}^n P(A|H_j) P(H_j)}. \quad (3)$$

Для целей определения средней частоты проявления землетрясений Д. Бенджамин получил упрощенное выражение

$$-vT = \ln \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{T}{t}\right)^{n+1}} \right], \quad (4)$$

где v – число землетрясений на единицу времени, T – период наблюдений, n – число землетрясений, происходящих в интервале времени t . Указанное выражение сейчас применяется в правилах JCSS Probabilistic Model Code.

Т.М. Tsapanos, G.A. Papadopoulos и O.Ch. Galanis (2003) [27], принимая за основу исследования Д. Бенджамина, для оценки апостериорной вероятности n сейсмических событий, происходящих в течение t лет, получили выражение

$$P''(n, t) = \frac{(n + n_0)!}{(n! + n_0!)} \frac{\left(\frac{t}{t_0}\right)^n}{\left(1 + \frac{1}{t_0}\right)^{n+n_0+1}}, \quad (5)$$

где n_0 – число землетрясений, произошедших за время t_0 (по сути, здесь временная протяженность каталога прошлых землетрясений). При апостериорной вероятности отсутствия событий в течение t лет выражение (5) в работе [27] преобразуется к виду

$$P(0, t) = \left(1 + \frac{t}{t_0}\right)^{-n_0-1}. \quad (6)$$

Для учета вероятности превышения выбранной нижней величины магнитуды M_0 , соответствующей вероятности того, что в течение следующих t лет произойдет хотя бы одно событие с магнитудой M , превышающей M_0 , выражение (6) в исследовании [27] приводится к виду

$$\bar{P}(0, t) = 1 - \left(1 + \frac{t}{t_0}\right)^{-n_0-1}. \quad (7)$$

В настоящей работе автора интересует оценка, зависящая не от количества землетрясений с магнитудой более 7,5, а оценка, определяемая сейсмическими событиями, которые выразились сейсмическим эффектом около 7 баллов на средних грунтах в г. Петропавловске-Камчатском.

Принимая выражение под знаком натурального логарифма в правой части равенства (4) тождественным правому множителю в выражении (2), выражение для учета изменения возраста здания T_t в процессе его эксплуатации приведем к виду

$$T_t = T_{ex} \left[1 - \left(1 + \frac{T}{t_w}\right)^{-n_0-1} \right], \quad (8)$$

где T_{ex} и t_w – то же, что в (2); T – то же, что в (4); n_0 – количество умеренных землетрясений, ранее наблюдаемых до проведения оценки дефицита сейсмостойкости здания. При этом период наблюдения будем принимать равным расчетному сроку службы здания, а время ожидания – фактическому сроку его эксплуатации. Выражение (8) позволяет учесть, что за срок службы здания может реализоваться сейсмическое событие с сейсмическим эффектом, превышающим 7 баллов. Последнее согласуется с предпосылками, принятыми при формировании выражения (2).

Выражением (8) интегрально формируется поправка за возраст здания, которая является здесь функцией частоты повторения умеренных землетрясений. Указанная поправка призвана придать обоснованный консерватизм оценке коэффициента SF по аналогии с тем, как на значение SF влияет коэффициент κ (Каппа), качественно учитывающий форму сдвигания гистерезиса в расчетной процедуре Capacity Spectrum Method. Поправка за возраст представляется здесь как мера ограничения протяженности пологого участка диаграммы деформирования изучаемой системы (кривая 1 на рис. 1), отвечающего за оценку его живучести. Выражение (8) для целей уточнения модели I_d интегрируется в выражение (1).

Основные результаты исследования и их интерпретация

Заключительным этапом работы будет визуализация графиков зависимости $I_d(T_{ex})$, при построении которой будем использовать все ранее полученные результаты. На рис. 2 в полулогарифмическом масштабе представлены графики функции $I_d(T_{ex})$, нормированные к величине SF = 1 (при $i = 2$).

⁸ Benjamin J.R. Probabilistic Models for Seismic Force Design. Journal of the Structural Division (ASCE). 1968. Vol. 94. ST5, pp. 1174–1195. DOI: 10.1061/jsdeag.0001950 (указанную статью не удалось найти в открытом доступе).

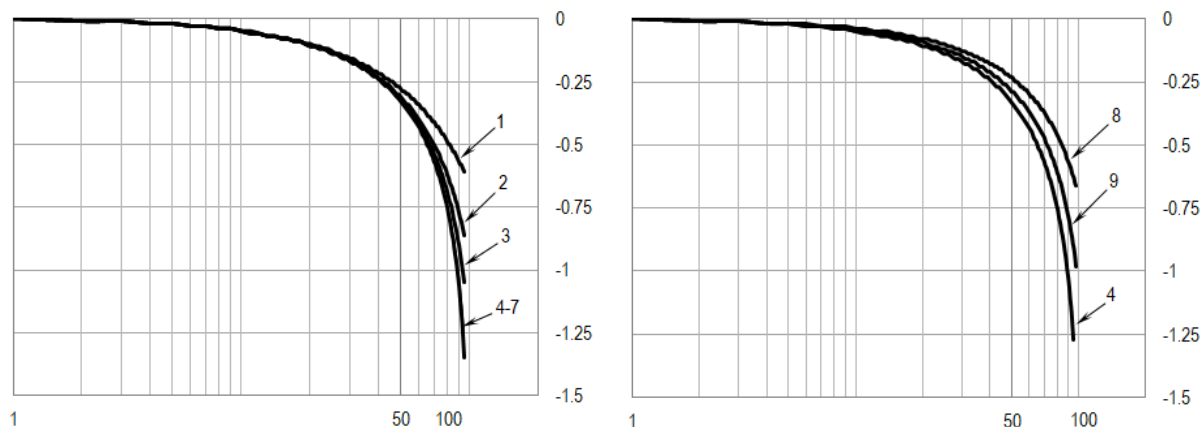


Рис. 2. Сопоставление графиков функции $I_d(T_{ex})$

Примечание. На графиках приведены следующие цифровые обозначения: 1 – кривая, полученная с применением выражений (1) и (8) при $n_0 = 1$; 2 – по той же функции, что и 1 при $n_0 = 2$; 3 – по той же функции, что и кривая 1, при $n_0 = 3$; 4–7 – семейство кривых по той же функции, что и кривая 1, при n_0 равном 5, 7 и 9 соответственно; 8 – кривая, полученная с применением формулы (13) [12] при учете повторяемости землетрясений один раз в 200 лет; 9 – кривая, полученная с применением той же формулы, что и кривая 8, при учете повторяемости землетрясений один раз в 500 лет.

Графики, представленные на рис. 2, интерпретированы автором следующим образом. Влияние трех прошлых землетрясений, выразившихся в г. Петропавловске-Камчатском на средних грунтах сейсмическим эффектом 7 баллов, может сказаться на накоплении дефицита сейсмостойкости того или иного существующего здания более значительно, чем ожидание одного расчетного землетрясения интенсивностью в 9 баллов. После учета пяти прошлых умеренных землетрясений влияние последующих подобных сейсмических событий практически не приводит к приросту дефицита сейсмостойкости, обусловленному поправкой за возраст здания. Может оказаться так, что в процессе эксплуатации здания в ожидании 9-балльного землетрясения ближе к концу срока службы только за счет 7-балльных сейсмических воздействий может накопиться дефицит сейсмостойкости около одного балла.

Представляется объективным заключить, что надбавка к дефициту сейсмостойкости существующих зданий на Камчатке, обусловленная сроком их эксплуатации, может накапливаться быстрее, чем у подобных зданий в других сейсмических регионах, не подверженных частому воздействию умеренных землетрясений. Указанную особенность важно учитывать, поскольку недостаточно только определить величину дефицита сейсмостойкости здания; нужно потом еще расчетами обосновать достаточность мероприятий по сейсмоусилению, предусматриваемых для компенсации полученного дефицита сейсмостойкости.

Обратимся к ранее указанному примеру. В работе [9] для 4-этажного железобетонного каркаса здания определено, что при расчетном землетрясении, характеризующемся пиковым значением ускорения колебаний $0,28 g$, с вероятностью $0,0952$

возможного превышения расчетных максимальных значений интенсивности сейсмических воздействий в течение 50 лет, при фактическом сроке эксплуатации 54 года, с расчетным сроком службы здания 100 лет, при повреждениях конструкций, соответствующих полной потере эксплуатационных свойств, для случая размещения каркаса на площадке со средними грунтовыми условиями остаточная сейсмостойкость в дробных значениях балла определяется равной $8,14$. При указанных параметрах с применением выражений (1) и (8) при $n_0 = 3$ остаточная сейсмостойкость каркаса определяется равной $8,09$ балла. Если же допустить оценку остаточной сейсмостойкости каркаса на стадии «перед обрушением» (англ. Near Collapse), то значение остаточной сейсмостойкости в дробных значениях балла определяется равным $8,46$ и $8,42$ соответственно.

Сейсмостойкость каркаса здания серии КПС из 4 этажей в Обосновании к Методике [10] для уровня 2009 года (что соответствует сроку эксплуатации 37 лет) определена равной $7,8$ балла. Отличие последнего от значений, полученных в настоящей работе, следует объяснять тем, что расчеты проведены на ближайшем аналоге каркаса с учетом особенностей нелинейного деформирования (повреждения) несущих конструкций, с применением региональных записей сейсмических колебаний (в частности, записей Шипунского землетрясения 17.08.2024 г.), с учетом параметров затухания, полученных по результатам натурного эксперимента. Получается, что результаты оценки остаточной сейсмостойкости, полученные в настоящей работе, менее консервативны, несмотря на то, что получены для уровня 2025 года. Насколько существенны выявленные различия? Ответ можно получить лишь только после проведе-

ния расчетов указанного каркаса с учетом параметров сейсмоусиления несущих конструкций, позволяющих привести сейсмостойкость каркаса при указанной остаточной сейсмостойкости к уровню, соответствующему 9 баллам.

Основные выводы

1. Серия умеренных землетрясений может послужить катализатором преждевременного физического износа существующих зданий массового строительства. Влияние сейсмических воздействий, которые реализовались на средних грунтах в г. Петропавловске-Камчатском сейсмическим эффектом около 7 баллов, следует обязательно учитывать при выборе антисейсмических мероприятий при проектировании, эксплуатации и сейсмоусилении зданий (сооружений). При этом к расчетам зданий на Камчатке следует предъявлять более строгие требования (в сравнении со зданиями в других сейсмических районах): (а) пересмотреть требования к малоцикловой усталости материалов и конструкций в стыках сборных железобетонных элементов и в ожидаемых зонах пластичности; (б) не допускать проведение поверочной оценки уровня сейсмостойкости существующих зданий с применением только линейно-спектрального метода; (в) при оценке дефицита сейсмостойкости существующих зданий учитывать влияние накопления ими повреждений от прошлых землетрясений; (г) разработать и внедрить в виде приложений к СП 14.13330.2018 региональную модель сейсмического воздействия (в терминах спектров реакции) по типу представленной в [15], уточненной с применением параметров землетрясения 29(30).07.2025 г., и пакет региональных записей сейсмических колебаний, проработанных как, например, в [28].

2. Математическая модель оценки дефицита сейсмостойкости, предложенная в [12], в настоящей работе уточнена с применением формулы Байеса (в интерпретации Д. Бенджамина, 1968) для целей учета накопления повреждений от землетрясений, выразившихся сейсмическим эффектом около 7 баллов для территории г. Петропавловска-Камчатского в период с 1971 г. по 2025 г. Предложенная математическая модель оценки I_d позволяет: (а) согласовать результаты инженерного расчетного анализа зданий с известной сейсмологической обстановкой; (б) проводить прогнозную оценку величины дефицита сейсмостойкости здания с применением пологого участка его диаграммы деформирования, соответствующего предельному состоянию перед обрушением; (в) учитывать влияние скрытых повреждений и других сложных для физического определения факторов, которые практически сложно выявить достоверно при проведении обследования технического состояния. Отметим, что при проведении обследования здания проводится оценка его динамических характеристик только при малых деформациях, что

в лучшем случае позволит идентифицировать только восходящий участок его диаграммы деформирования (пояснено в работе [9]). Указанные особенности солидарно позволяют подойти к вопросу оценки остаточной сейсмостойкости зданий менее консервативно, в сравнении с моделью, на которой основана Методика (2009) [10].

3. Полученные результаты можно применять в качестве первых оценок влияния прошлых умеренных землетрясений на величину дефицита сейсмостойкости существующих зданий на территории Камчатки. Ценность применения положений формулы Байеса в настоящем исследовании определяется следующими особенностями. Во-первых, позволяет показать, что 3–5 прошлых умеренных сейсмических воздействий при прочих равных условиях к 50 годам эксплуатации здания могут отразиться на величине дефицита сейсмостойкости практически таким же образом, как ожидание одного события с периодом повторяемости один раз в 500 лет. Во-вторых, позволяет более объективно определить величину дефицита сейсмостойкости для существующего здания, поскольку учитывает реализацию сейсмического события в терминах сейсмического эффекта, схожего с уже известными прошедшими землетрясениями (здесь важно отметить, что упомянутой Методикой предусматривается учет вероятности реализации расчетного землетрясения, которое еще не происходило). В-третьих, позволяет спрогнозировать дефицит сейсмостойкости здания в дробных значениях балла (с точностью до сотых) для согласования с результатами работ по сейсмическому микрорайонированию, что может иметь решающее значение при оценке допускаемых повреждений в предельном состоянии, характеризующемся полной потерей эксплуатационных свойств зданием, и, в конечном итоге, повлиять на выбор способа сейсмоусиления.

4. Несмотря на почтенный возраст некоторых результатов сейсмологических исследований, изученных при проведении настоящей работы, пожалуй, впервые удалось их применить для оценки дефицита сейсмостойкости существующих зданий на Камчатке. В случае применения представленной математической модели рекомендуется в составе выражения (1) применить выражение (8) с учетом n_0 , равного 5.

Работа выполнена в инициативном порядке без грантового и другого подотчетного финансирования непосредственно автором с использованием данных, полученных на УНУ (<http://www.gsras.ru/unu/>) и предоставленных Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». Материалы хранятся в Научно-исследовательской лаборатории «СейсмЭстимЛаб», 214000, г. Смоленск, ул. Ленина, д. 13А, seism.estim.lab@mail.ru.

Список литературы

1. Святловский А.Е. Землетрясения и особенности тектонического строения Курило-Камчатской области // *Бюллетень Совета по Сейсмологии Академии наук СССР*. 1956. № 2. С. 31–34.
2. Аптекман Ж.Я., Захарова А.И., Зобин В.М., Левшин А.Л. и др. Очаги сильных камчатских землетрясений 1971 г. // *Физика Земли. Известия Академии наук СССР*. 1979. № 1. С. 37–56.
3. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
4. Викулин А.В., Дроздюк В.Н., Семенец Н.В., Широков В.А. К землетрясению без риска. Петропавловск-Камчатский: Изд. Центр типографии СЭТО-СТ, 1997. 120 с.
5. Штейнберг В.В. Оценка спектров сотрясений для территории с определенными сеймотектоническими и грунтово-геологическими условиями // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1971. № 14. С. 30–49.
6. Золотков А.С. Сейсмостойкость монолитных зданий. Кишинев: Картя Молдовой, 2000. 284 с.
7. Ашкинадзе Г.Н., Симон Ю.А. Вибрационные испытания крупнопанельного жилого 8-этажного дома в Алма-Ате // *Сборник трудов ЦНИИЭП жилища «Исследование работы конструкций жилых зданий»*. 1974. Вып. 5. С. 35–46.
8. Соснин А.В., Белостоцкий А.М. Сопоставительные расчеты железобетонного каркаса здания из 4 этажей нелинейным статическим и динамическим методами с применением записей Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. *Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии*: Коллективная монография под ред. В.Б. Заалишвили, В.И. Голик. Владикавказ. ГФИ ВНИЦ РАН, 2024. С. 408–416. DOI: 10.33580/9785904868307_408. EDN: MFFMOP
9. Соснин А.В. Прогнозная оценка сейсмостойкости зданий региональной камчатской каркасно-панельной серии КПС // *Жилищное строительство*. 2025. № 10. С. 57–68. DOI: 10.31659/0044-4472-2025-10-57-68. EDN: KREYWT
10. Методика по обследованию зданий типовой застройки с целью определения их сейсмостойкости и необходимости сейсмоусиления (объект 4431/2008); утв. пр. Министерства строительства Камчатского края от 30.06.2009 г. № 43, разработ. ГУП «Камчатскгражданпроект». Петропавловск-Камчатский. 2009.
11. Штанько Л.Ф. Вероятностные оценки расчетных сейсмических ускорений в зависимости от срока службы сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2001. № 1. С. 37–39.
12. Соснин А.В. Обоснование формулы для количественной оценки дефицита сейсмостойкости зданий нелинейным статическим методом в SAP2000 // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2023. Т. 23, № 2. С. 15–24. DOI: 10.14529/build230202, EDN: XHMTHR
13. Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
14. Борисова Н.С., Ершов И.А., Константинова Т.Г., Федякова С.Н., Шумилина Л.С. Макросейсмическое обследование последствий землетрясения 24(25) ноября 1971 г. в Петропавловске-Камчатском и сопоставление результатов с сейсмическим микрорайонированием // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1975. № 17. С. 71–86.
15. Штейнберг В.В., Ершов И.А., Дарбинян С.С. Колебания грунта и сейсмический эффект в Петропавловске-Камчатском при сильном землетрясении 24 ноября 1971 г. // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1975. № 17. С. 20–33.
16. Чебров Д.В. Камчатское мегаземлетрясение 29 июля 2025 г. ($M_w = 8.8$) // *Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле*. 2025. Вып. 67. № 3. С. 113–117. DOI: 10.31431/1816-5524-2025-3-67-113-117
17. Chebrov D.V., Matveenko E.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Lander A.V., Mityushkina S.V., Pavlov V.M., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Senyukov S.L., Titkov N.N. The M_w 7.0 Shipunsky earthquake of August 17, 2024 of the East Coast of Kamchatka // *Journal Volcanology and Seismology*. 2025. Vol. 19, pp. 271–280. DOI: 10.1134/S0742046325700101
18. Соснин А.В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K_1 и его согласованности с концепцией редукации сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 1(60). С. 92–114. EDN: YGRWUZ
19. Айзенберг Я.М., Нейман А.И., Абакаров А.Д., Деглина М.М., Чачуа Т.Л. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. М.: Наука, 1978. 248 с.
20. Kahneman D., Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk // *Econometrica*. 1979. Vol. 47, no. 2, pp. 313–327.
21. Tversky A., Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty // *Journal of Risk and Uncertainty*. 1992. Vol. 5, no. 4, pp. 297–232. DOI: 10.1007/BF00122574
22. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 447 с.
23. Tsapanos T.M., Lyubushin A.A., Pisarenko V.F. Application of a Bayesian approach for estimation of seismic hazard parameters in some regions of the Circum-Pacific belt // *Pure and Applied Geophysics*. 2001. No. 158 (5), pp. 859–875. DOI:10.1007/PL00001210

24. Mortgat C.P., Shah H.C. A Bayesian model for seismic hazard mapping // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1979. Vol. 69 (4), pp. 1237–1251.
25. Campbell K.W. Bayesian analysis of extreme earthquake occurrences. Part I. Probabilistic hazard model // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1982. Vol. 72 (5), pp. 1689–1705.
26. Campbell K.W. Bayesian analysis of extreme earthquake occurrences. Part II. Application to the San Jacinto fault zone of southern California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1983. Vol. 73 (3), pp. 1099–1115.
27. Tsapanos T.M., Papadopoulos G.A., Galanis O.Ch. Time independent seismic hazard analysis of Greece deduced from Bayesian statistics // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. Vol. 3 (1), pp. 129–134.
28. Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // *Вестник отделения наук о Земле РАН*. 2005. № 1(23). С. 1–22.

References

1. Svyatlovskii A.E. Earthquakes and Features of Tectonic Structure of the Kuril-Kamchatka Territory. *Byulleten Soveta po Seismologii Akademii nauk SSSR*. 1956. No. 2, pp. 31–34. (in Russ.).
2. Aptekman Zh.Ya., Zakharova A.I., Zobin V.M., Levshin A.L., et al. Focal Points of Strong Kamchatka Earthquakes in 1971. *Fizika Zemli. Izvestiya Akademii nauk SSSR*. 1979. No. 1, pp. 37–56. (in Russ.).
3. Fedotov S.A. *Dolgosrochnii seismicheskii prognoz dlya Kurilo-Kamchatskoi dugi* [Long-Term Seismic Prediction for the Kuril-Kamchatka Islands Arc]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 302 p. (in Russ.).
4. Vikulin A.V., Drozdyuk V.N., Semenev N.V., Shirokov V.A. *K zemletryasenyu bez riska* [To an Earthquake Without a Risk]. Petropavlovsk-Kamchatsky: SETO-ST Publ., 1997. 120 p. (in Russ.).
5. Steinberg V.V. Assessment of Earthquake Spectra for a Territory with Certain Seismotectonic and Geological Conditions. *Voprosi Inzhenernoi Seismologii*. 1971. Vol. 14, pp. 30–49. (in Russ.).
6. Zolotkov A.S. *Seismostoikost' monolitnikh zdaniy* [Earthquake Resistance Reinforced Concrete Buildings]. Kishinev: Kartya Moldovey Publ., 2000. 284 p. (in Russ.).
7. Ashkinadze G.N., Simon Yu.A. Vibration Tests of a Large-Panel Residential 8-storey Building in Alma-Ata City. Proceedings of TsNIIEP zhilishcha “*Issledovanie raboti konstruksii zhilikh zdaniy*”. 1974. Vol. 5, pp. 35–46. (in Russ.).
8. Sosnin A.V., Belostotsky A.M. Comparative Computational Assessment of a RC Frame of a 4-storey Building using Nonlinear Pushover Analysis and Time History Analysis using the 17.08.2024 Shipunsky Earthquake Motion Records. *Dangerous Natural and Man-Made Processes in Mountain Regions: Models, Systems, Technologies: Collective monograph edited by V.B. Zaalishvili, Vladikavkaz. GFI VNC RAS*; 2024, pp. 408–416. DOI: 10.33580/9785904868307_408, EDN: MFFMOP. (in Russ.).
9. Sosnin A.V. A Predictive Assessment of Earthquake-Resistance of Frame-Panel Buildings KPS Series on the Kamchatka Territory. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2025. No. 10, pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2025-10-57-68> (in Russ.). EDN: KREYWT
10. Metodika po obsledovaniyu zdaniy tipovoy zastroyki s tsel'yu opredeleniya ikh seysmostoykosti i neobkhodimosti seysmousileniya (ob'yeht 4431/2008), utverzhdena prikazom Ministerstva stroitel'stva Kamchatskogo kraya ot 30.06.2009g., razrabotana GUP Kamchatskogo kraya “Kamchatskgrazhdanproyekt” (rassmotrena i rekomendovana k utverzhdeniyu na Mezhhvedomstvennom nauchno-tekhnicheskom ekspertnom sovete po seysmostoykomu stroitel'stvu i seysmicheskoy opasnosti v Kamchatskom kraye ot 15.06.2009 g.) [A Standard Technique for Surveying of Typical Buildings in Order to Determine their Earthquake-Resistance and Retrofitting Necessity (Object 4431/2008), Approved by an Order Dated 06.30.2009 No. 43 of Ministry of Construction of the Kamchatka Territory, was developed by “Kamchatskgrazhdanproekt”]. Petropavlovsk-Kamchatskiy. 2009.
11. Shtan'ko L.F. Probabilistic Estimates of Computational Seismic Accelerations Depending on Service Life of Structures. *Seysmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2001. No. 1, pp. 37–39. (in Russ.).
12. Sosnin A.V. Argumentation of a Formula for Numerical Assessment of Insufficient Earthquake Resistance of Buildings using Nonlinear Static Pushover Analysis in SAP2000. *Bulletin of the South Ural State University. Construction Engineering and Architecture Series*. 2023. Vol. 23(2), pp. 15–24. DOI: 10.14529/build230202, EDN: XHMTHR. (in Russ.).
13. Vikulin A.V. *Mir vikhrevikh dvizhenii* [World of Vortex Movements]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamchatGTU Publ., 2008. 230 p.
14. Borisova N.S., Ershov I.A., Konstantinova T.G., Fedyakova S.N., Shumilina L.S. Macro seismic Survey of Consequences of the November 24(25), 1971 Petropavlovsk-Kamchatsky Earthquake and Comparison of Seismic Microzoning Results. *Voprosi inzhenernoi seismologii*. 1975. Vol. 17, pp. 71–86. (in Russ.).
15. Steinberg V.V., Ershov I.A., Darbinyan S.S. Ground Motions and Response Site Effect in Petropavlovsk-Kamchatskiy during The November 24, 1971 Earthquake. *Voprosi inzhenernoi seismologii*. 1975. Vol. 17, pp. 20–33. (in Russ.).

16. Chebrov D.V. The Mw 8.8 Kamchatka Megathrust Earthquake of July 29, 2025. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2025. No. 3. Vol. 67, pp. 113–117. DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-3-67-113-117>. (in Russ.).
17. Chebrov D.V., Matveenko E.A., Abubakirov I.R. et al. The Mw 7.0 Shipunsky Earthquake of August 17, 2024 of the East Coast of Kamchatka. *Journal Volcanology and Seismology*. 2025. Vol. 19, pp. 271–280. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046325700101>
18. Sosnin A.V. About Refinement of Seismic-Force-Reduction Factor (K_1) and its Coherence with the Concept of Seismic Response Modification in Formulation of the Spectrum Method (in Order of a Discussion). *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 1(60), pp. 92–114, EDN YGRWUZ. (in Russ.).
19. Ayzenberg Ya.M., Neyman A.I., Abakarov A.D., Deglina M.M., Chachua T.L. *Adaptivnye sistemy seismicheskoy zashchity sooruzheniy [Adaptive Systems of Seismic Protection of Structures]*. Moscow: Nauka Publ., 1978. 248 p. (in Russ.).
20. Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*. 1979. Vol. 47. No. 2, pp. 313–327.
21. Tversky A., Kahneman D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*. 1992. No. 5. pp. 297–332. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00122574>
22. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostei [Probability Theory Course]*. 6th ed. revised and expanded. Moscow: Nauka Publ., 1988. 447 p. (in Russ.).
23. Tsapanos T.M., Lyubushin A.A., Pisarenko V.F. Application of a Bayesian Approach for Estimation of Seismic Hazard Parameters in Some Regions of the Circum-Pacific Belt. *Pure and Applied Geophysics*. 2001. No. 158, pp. 859–875. DOI: 10.1007/PL00001210
24. Mortgat C.P., Shah H.C. A Bayesian Model for Seismic Hazard Mapping. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1979. Vol. 69, pp. 1237–1251.
25. Campbell K.W. Bayesian Analysis of Extreme Earthquake Occurrences, Part I. Probabilistic hazard model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1982. Vol. 72, pp. 1689–1705.
26. Campbell K.W. Bayesian Analysis of Extreme Earthquake Occurrences, Part II. Application to the San Jacinto fault zone of southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1983. Vol. 73, pp. 1099–1115.
27. Tsapanos T.M., Papadopoulos G.A., Galanis O.Ch. Time Independent Seismic Hazard Analysis of Greece Deduced from Bayesian Statistics. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. Vol. 3, pp. 129–134.
28. Gusev A.A., Shumilina L.S., Akatova K.N. About Seismic Hazard Assessment for Petropavlovsk-Kamchatsky Based on an Earthquakes Scenario Set. *Vestnik otdeleniya nauk o Zemle RAN*. 2005. No. 1(23)'. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf. (in Russ.).

Информация об авторе:

Соснин Алексей Викторович, руководитель Научно-исследовательской лаборатории оценки безопасности результатов проектирования и сейсмостойкости строительных конструкций (СейсмЭстимЛаб), Смоленск, Россия; seism.estim.lab@mail.ru

Information about the author:

Aleksey V. Sosnin, Head of the Scientific-Research Laboratory of Design Outcomes Safety Estimation and Earthquake-Resistance of Building Structures (Seism.estim.lab), Smolensk, Russia; seism.estim.lab@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.12.2025, принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 10.12.2025, approved after reviewing 15.12.2025.