

12. Finkelshteyn M. I., Karpukhin V. I., Kutev V. A., Metelkin V. N. *Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya* [Subsurface radar], Moscow, 1994. 216 p.

13. Sheremetov I. M. Monitoring osnovaniya samopodemnykh burovnykh ustanovok geofizicheskimi metodami [Monitoring of the base of jack-up drilling rigs by geophysical methods]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2014, no. 1, pp. 49–59.

14. Sheremetov I. M., Kurdyuk A. Yu., Serebryakov O. I., Serebryakova V. I. Ispolzovanie metoda georadiolokatsii dlya tseley seysmicheskogo mikrorayonirovaniya v neftegazonosnykh regionakh Nizhnego Povolzhya i Severnogo Kaspiya [Using the georadiolocation method for seismic microzoning in the oil and gas regions of the Lower Volga and Northern Caspian]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2015, no. 1, pp. 83–92.

СЕЙСМОМИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ ГОРОДА ЖЕЛЕЗНОГОРСКА

Сеелев Игорь Николаевич, директор, Изотопно-химический завод (ИХЗ) ФГУП «Горно-химического комбината», 662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Ленина, 53, e-mail: atom-link@mcc.krasnoyarsk.su

Леонцев Алексей Валентинович, заместитель главного инженера, Изотопно-химический завод (ИХЗ) ФГУП «Горно-химического комбината», 662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Ленина, 53, e-mail: atom-link@mcc.krasnoyarsk.su

Хафизов Роберт Рафаэлевич, директор, ООО «Геолком», 662974, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, п. Додоново, ул. Луговая, 10, e-mail: geolkom@yandex.ru

Перетокин Сергей Александрович, главный инженер, ООО «Геолком», 662974, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железнодорожск, п. Додоново, ул. Луговая, 10, e-mail: geolkom@yandex.ru

Панасенко Николай Никитович, доктор технических наук, профессор, директор, ООО «Подъемные сооружения», 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16ж, оф. 36, e-mail: psastr@mail.ru

Синельщиков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 414056, Российская Федерация, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, e-mail: laex@bk.ru

Яковлев Павел Викторович, доктор технических наук, профессор, директор, ООО «Подъемные сооружения», 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16ж, оф. 36, e-mail: astral37@mail.ru

В основу сейсмомикрорайонирования строительной площадки ОИАЭ г. Железнодорожска положено взаимодействие двух моделей – модели сейсмических источников землетрясений и модели сейсмического эффекта, основанного на повторяемости землетрясений в рассматриваемом регионе, определяющих пространственное и временное распределение сейсмичности. Вероятностный анализ сейсмической опасности в регионе сводится к созданию синтезированного каталога землетрясений за наперед заданный период времени с установленной повторяемостью в зависимости от удаления объекта от источника с шагом по магнитуде. Расчет сейсмической интенсивности осуществлен на основе геологической и сейсмологической информации об объекте, а также грунтах по 3D-модели с использованием метода сейсмических жесткостей. Синтезированный каталог землетрясений построен для нормативных периодов повторяемости 1000 лет (ПЗ) и 10000 лет (МРЗ) на основе площадных и линейных зон ВОЗ и

набора статистики по количеству сотрясений разной интенсивности и повторяемости, определивших расчетные пиковые ускорения и амплитуды обобщенных спектров реакции при различных периодах повторяемости. Установлено соотношение расчетной интенсивности и длительности сейсмических колебаний на площадке на средних грунтах. Синтезированная модельная исходная 3-компонентная акселерограмма, соответствующая синтезированному каталогу землетрясений, построена по методике РБ-006-98. Численное моделирование реакции грунта на сейсмические воздействия определены программой (Win-Shake) для различных уровней от 7 до 8 баллов МРЗ MSK-64 в виде акселерограмм, велосиограмм и сейсмограмм.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая интенсивность, вероятностный анализ, сейсмическая опасность, сейсмическое районирование, синтезированный каталог землетрясений, программно-математическое обеспечение, акселерограмма, сейсмограмма, сейсмические волны, баллы, проектное землетрясение, максимальное расчетное землетрясение, грунты, период повторяемости

SEISMIC MICROUNDERING OF THE CONSTRUCTION SITE OF ZHELEZNOGORSK CITY

Seleev Igor N., Director, Isotope-Chemical Plant FSUE "Mining and Chemical Combine", 53 Lenin st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation, e-mail: atom-link@mcc.krasnoyarsk.su

Lekontsev Alexey V., Deputy of Chief Engineer, Isotope-Chemical Plant FSUE "Mining and Chemical Combine", 53 Lenin st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation, e-mail: atom-link@mcc.krasnoyarsk.su

Khafizov Robert R., Director, LLC "Geolkom", 10 Lugovaya st., Dodonovo village, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662974, Russian Federation, e-mail: geolkom@yandex.ru

Peretokin Sergey A., Chief Engineer, LLC "Geolkom", 10 Lugovaya st., Dodonovo village, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662974, Russian Federation, e-mail: geolkom@yandex.ru

Panasenko Nikolai N., D.Sc. in Engineering, Professor, Director, LLC "Lifting structures", 16zh, oph. 364 Tatishchev st., Astrakhan, 14056, Russian Federation, e-mail: psastr@mail.ru

Sinelshchikov Alexey V., C.Sc. in Engineering, Associate Professor, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 18 Tatishchev st., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: laex@bk.ru

Yakovlev Pavel V., D.Sc. in Engineering, Professor, Director, LLC "Lifting structures", 16zh, oph. 364 Tatishchev st., Astrakhan, 14056, Russian Federation, e-mail: astral37@mail.ru

The basis of seismic micro-zoning of the construction site of the Zheleznogorsk OIAE is the interaction of two models – a model of seismic sources of earthquakes and a model of the seismic effect based on the frequency of earthquakes in the region under consideration, which determine the spatial and temporal distribution of seismicity. Probabilistic analysis of seismic hazard in the region reduces to the creation of a synthesized catalog of earthquakes for a predetermined period of time with a fixed repeatability, depending on the removal of the object from the source in increments of magnitude. The calculation of seismic intensity was carried out on the basis of geological and seismological information about the object, as well as soils on the 3D model using the seismic rigidity method. The synthesized catalog of earthquakes is constructed for the standard periods of recurrence of 1000 years (PZ) and 10,000 years (MW) based on WHO area and linear zones and a set of statistics on the number of concussions of different intensity and frequency that determined the calcu-

lated peak accelerations and amplitudes of the generalized reaction spectra for different periods of recurrence. The correlation of the calculated intensity and duration of seismic oscillations at the site on medium soils is established. The synthesized model initial 3-part accelerogram corresponding to the synthesized earth-shaking catalog was constructed according to the RB-006-98 technique, the numerical modeling of the ground reaction to seismic actions was determined by the program (WinShake) for different levels from 7 to 8 MBK MSK-64 points in vid de accelerograms, bicycles and seismograms.

Keywords: earthquake, seismic intensity, probabilistic analysis, seismic hazard, seismic zoning, synthesized catalog of earthquakes, software-mathematical support, accelerogram, seismogram, seismic waves, balloons, project earthquake, maximum estimated earthquake, soils, period of recurrence

Принятые сокращения:

ВАСО – вероятностный анализ сейсмической опасности
ОСР (ДСР) – общее (детальное) сейсмическое районирование (района)
ВОЗ – (зона) возможного очага землетрясения
СМР – сейсмическое микрорайонирование (площадки)
УСО – уточнение сейсмической опасности
УОСР – уточнение оценок общего сейсмического районирования
ОИАЭ – объекты использования атомной энергии
ПМО – программно-математическое обеспечение
ЗАО – закрытое акционерное общество
ИГЭ – инженерно-геологический элемент
ИГС – инженерно-геологический слой
КМПВ – корреляционный метод преломленных волн
ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование
ПЗ – проектное землетрясение
МРЗ – максимальное расчетное землетрясение

1. Общие положения ВАСО при сейсмомикрорайонировании. В 1991–1997 гг. авторы работ [1–3] выполнили специальные исследования по общему сейсмическому районированию территории страны и сопредельных регионов и создали комплект вероятностных карт – ОСР-97.

Комплект ОСР-97 состоит из четырех карт: ОСР-97А, ОСР-97В, ОСР-97С, ОСР-97Д, характеризующих разный уровень вероятности превышения сейсмической интенсивности, указанной в баллах шкалы MSK-64 на каждой из карт. Так, карта А соответствует 10%-й, карта В – 5%-й, карта С – 1%-й, карта Д – 0,5%-й вероятности возможного превышения или, соответственно, 90 %, 95 %, 99 % и 99,5 % непревышения в течение 50 лет расчетной сейсмической интенсивности. Все это соответствует повторяемости сейсмического эффекта на земной поверхности в среднем один раз в 500, 1000, 5000 и 10000 лет.

При построении вероятностных карт ОСР-97 было положено взаимодействие двух моделей – модели сейсмических источников землетрясений и модели сейсмического эффекта, основанного на повторяемости землетрясений в рассматриваемом регионе. Модели сейсмических источников характеризуются зонами возникновения протяженных землетрясений (зонами ВОЗ), состоящих из линеаментов, отражающих структурированную сейсмичность, доменов, как квазигомогенной геологической среды, характеризующейся рассеянной сейсмичностью и очагов землетрясений, обозначающих наиболее опасные сейсмические источники линеаментов. В соответствии с моделью зон ВОЗ на картах ОСР-97 землетрясения с магнитудой $M \geq 6,0$ и выше принадлежат линеаментным структурам, а с $M \leq 5,5$ более крупного масштаба

исследований, чем принято на картах ОСР-97 (1 : 8 × 106), и повышения детальности построений при уточнении сейсмической опасности (УСО) методами сейсмического микрорайонирования (СМР) должны быть выявлены и более мелкие структуры, а нижний порог используемых для расчетов магнитуд землетрясений в линеаментах может быть понижен до $2,5 \pm 0,2$.

Расчетная сейсмическая интенсивность I_t , выраженная в баллах шкалы MSK-64 и ожидаемая на заданной площадке с повторяемостью в среднем один раз за T лет, определялась как вероятность P возможного превышения величины I_t в течение t лет и вычислялась по формуле:

$$P = 1 - \exp(1 / T).$$

Так, при $T = 500$ лет и $t = 50$ лет величина P составляет $\approx 10\%$ (точное значение – 9,52). При $T = 1000$ лет и $t = 50$ лет – $P \approx 5\%$ (точное значение – 4,88). При $T = 5000$ лет и $t = 50$ лет – $P \approx 1\%$, при $T = 10000$ лет и $t = 50$ лет – $P \approx 0,5\%$, что и отражено на картах ОСР-97 А, В, С и D для средних грунтов II категории по СНиП II-7-81* [4,5] для территории РФ. Таким образом, методику ОСР-97 можно представить как совокупность моделей, определяющих пространственное и временное распределение сейсмичности, правила их параметризации и программно-алгоритмический аппарат, реализующий расчетные процедуры вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) [6].

При проведении работ по оценке сейсмической опасности для конкретных объектов или построении карт и схем сейсмической опасности крупных масштабов нормативными документами [7–9] предусматривается так называемая стадия детального сейсмического микрорайонирования (ДСР). Здесь под ДСР следует понимать уточнение оценок общего сейсмического районирования (УОСР) или более кратко – уточнение сейсмической опасности (УСО). В связи с этим ДСР, УСО или УОСР принимаются близкими по смыслу.

Как уже отмечалось, в методике ОСР-97 заложены два типа моделируемой сейсмичности: рассеянная и структурированная. В первом случае выделяются объемы геологической среды (домены), для которых задаются графики повторяемости землетрясений с магнитудами $M_{lh} \leq 5,7$ и равной вероятностью возникновения землетрясений в любом месте выделенного блока. Во втором – линейные зоны, соответствующие активным разломам, к которым приурочены землетрясения с $M_{lh} \geq 5,8$ и их повторяемость.

Основная задача УОСР методами СМР – это обоснованная детализация моделей, закладываемых далее в процедуры ВАСО. Первый шаг при детализации модели зон ВОЗ – понижение пороговой магнитуды между рассеянной и структурированной сейсмичностью. При исследованиях по УОСР этот порог понижается в соответствии с уровнем изученности региона.

Принципиальным отличием ВАСО от детерминистских методов является обязательный учет поправок, зависящих от вероятностного разброса значений параметров моделей. Это касается как пространственных параметров зон ВОЗ, так и характеристик модели затухания.

При подготовке моделей общего сейсмического районирования и СМР величину поправок во многом определял генерализованный характер построений. При переходе к моделям СМР на стадии УОСР величина поправок определяется степенью изученности территории и полнотой статистики по каждому конкретному примеру.

Принцип работы процедур ВАСО для общего и СМР сводится к созданию модельного либо синтезированного каталога землетрясений за большой

период времени и к расчету статистики сейсмического эффекта от модельной сейсмической истории для каждого узла опросной сетки. Для этого рекомендуется использовать программно-математическое обеспечение (ПМО) PRB-60, разработанное в рамках работ по созданию ОСР-97 Гусевым А.А., Павловым В.М., Шумиловой Л.С. Оно позволяет автоматизировать расчеты [1, 10].

Здесь укажем, что возможности, заложенные в ПМО PRB-60 [6, 11], позволяют в задачах УОСР учесть индивидуальные особенности зон ВОЗ, которые в моделях ОСР-97 скрадываются за счет генерализованности построений. В частности, в методике ОСР-97 разброс землетрясений вокруг оси линеамента определяется одной среднестатистической зависимостью σ (M_{max} , M_{lh}), а при построении моделей СМР в рамках УСО для каждой зоны ВОЗ эта зависимость может задаваться индивидуально. Кроме того, заложенный в ПМО PRB-60 метод Монте-Карло, позволяет учесть при моделировании любую информацию о свойствах и пространственной структуре очагов [6].

В качестве заключения укажем, что получаемая в результате процедур ВА-СО интенсивность сейсмических сотрясений – это совокупная опасность от потенциальных землетрясений различных магнитуд, происходящих на разных расстояниях от источника. Поэтому при исследованиях на стадии СМР необходимо знать наиболее вероятную магнитуду землетрясения M и расстояние источник – пункт R . Для решения этой задачи в ПМО PRB-60 внедрена возможность деагрегационного анализа, позволяющего уточнить распределение условной вероятности события с параметрами M и R . Кроме того, при том условии, что нормативная интенсивность превышает в данном пункте. Результатом деагрегационного анализа являются таблицы распределения условной вероятности превышения расчетной интенсивности от событий синтезированного каталога землетрясений с шагом по магнитуде и по гипоцентральному расстоянию.

2. 3D-модель инженерно-геологической среды строительной площадки. В Российской Федерации исторически сложилась двуступенчатая схема оценки сейсмической опасности – оценка исходной сейсмичности для средних грунтов II категории по СНиП II-7-81* [4, 5] и последующая корректировка оценок с учетом реальных грунтовых условий строительной площадки [12–14]. Аналогичная постановка задачи возникла для целей расчетного анализа комплекса зданий ОИАЭ г. Железнодорожска на волновое сейсмическое воздействие (СВ), предусматривающее оценку взаимодействия и взаимовлияния отдельных зданий комплекса друг на друга на сейсмической волне, заданной сейсмограммой расчетного землетрясения. Оценка инженерно-геологических условий площадки строительства проводилась ИГЭ РАН [15], представлена в технических отчетах ЗАО «ГЕЯ» (2009–2010), №№ 112-8124, 112-8128, 113-8194, 114-8359 в 2012–2014 гг., результаты которых представлены в работе [16].

Методику проведения СМР, следуя опыту создания карт ОСР-97, можно разделить, в частном случае, на четыре этапа. Первый этап (подготовительный) включает в себя сбор геологической, сейсмологической, геофизической и топографической информации. На основании этих данных строится 3D-модель исследуемой площадки (второй этап). Третий этап – расчет в каждой точке модели сейсмической интенсивности с использованием различных расчетных методов [13], в том числе методом сейсмических жесткостей [14].

Геологическое строение строительной площадки (генплан инженерно-геологических скважин – см. рис. 1) по совокупным данным изысканий прошлых лет изучено на глубину 100,0 м. В строении геологического разреза принимают участие четвертичные аллювиально-делювиальные отложения, кора

выветривания мезо-кайнозойских образований и скальные грунты протерозойского возраста.

В верхней части аллювиально-делювиальной толщи под насыпными грунтами, следуя сведениям скважин (см. рис. 1), залегают суглинки легкие бурые, макропористые, ожелезненные, в основном мягко- и текучепластичные, реже тугопластичные и полутвердые, с прослоями суглинков с включением органических веществ.



Рис. 1. Первичная визуализация распределения инженерно-геологических скважин по изысканиям прошлого десятилетия лет на территории строительной площадки г. Железногорска: 1, 2, 3, 4 – комплекс взаимодействующих промышленных зданий

В центральной части (с глубины ~ 6–10 м) четвертичных аллювиально-делювиальных грунтов развит слой серых, зеленовато-серых, мягкопластичных, текучепластичных и текучих, заиленных суглинков легких, с прослойками и линзами супесей мощностью до 1,6 м. Мощность слоя заиленных текучих, текучепластичных и реже мягкопластичных суглинков изменяется от 1,9 до 5,0 м.

Ниже, с глубины ~ 13–15 м, залегают суглинки более тяжелые пылеватые бурые и коричневые, реже темно-серые, тугопластичные, с прослоями и линзами мягкопластичных. Мощность слоя от 1,5 до 5,7 м.

С глубины 15,0–21,6 м залегает слой тяжелых пылеватых коричневых суглинков полутвердой консистенции с единичными включениями дресвы. Мощность слоя от 0,3 м до 5,2 м.

Элювиально-делювиальные отложения представлены преимущественно глинами с прослоями и линзами глинистых песков. Глубина залегания по данным бурения изменяется от 16,6 до 25,4 м.

Ниже элювиально-делювиальных отложений на глубинах 34,4–40,9 м (абсолютные высоты 237,6–244,3 м) залегает древняя (неперемещенная) кора выветривания раннемезозойского возраста подзона песчаных или пылевато-глинистых продуктов выветривания (eMZ).

Скальные грунты протерозойского возраста развиты повсеместно, слагая основание геологического разреза площадки, залегают с глубины 41,9–57,6 м (абсолютная высота 218,8–226,4 м). Гнейсы зеленовато-серого, серого и темно-серого цвета, неравномерно-зернистые и окварцованные имеют гранобластовую структуру, слаботрещиноватые трещины в основном закрытого типа. В верхней части гнейсы очень низкой прочности, преимущественно рыхлые, сильновыветрелые до состояния рухляков, с глубины 87,5–89,5 средней прочности, плотные и очень плотные, слабыветрелые.

На рисунке 1 показана схема распределения инженерно-геологических скважин на территории строительной площадки, а далее на рисунке 3 – полупространство грунта.

По сейсмическим свойствам инженерно-геологические элементы (ИГЭ), выделенные в пределах строительной площадки, разделены на восемь инженерно-геологических слоев (ИГС) (см. табл. 1).

Таблица 1

**Средние параметры инженерно-геологических слоев грунта
 строительной площадки**

ИГС	Описание	Плотность грунта, г / см ³	Коэффициент пористости, д.ед	Природная влажность, %	Влажн. на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести	Показатель консистенции	Категория грунта
1	Грунты вертикальной планировки подсыпкой и грунты обратной засыпки	1,97	0,76	24,55	20,45	9,88		0,42	III
2	Супесь текучая, супесь пластичная	2,01	0,69	24,04	20,64	5,28	0,53	0,57	III
3	Суглинок легкий тугопластичный (верхний слой, средний)	1,95	0,73	26,13	20,64	9,79	0,65	0,59	II
4	Суглинок легкий полутвердый (нижний слой)	2,02	0,63	22,71	20,29	10,97	0,20	0,22	II

ИГС	Описание	Плотность грунта, г / см ³	Коэффициент пористости, д.ед	Природная влажность, %	Влажн. на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести	Показатель консистенции	Категория грунта
5	Глина твердая, легкая, с примесью органического вещества	1,97	0,70	24,79	28,21	24,23	–0,15	–0,14	II
6	Суглинок легкий твердый (алевролит низкой прочно- сти)	2,15	0,48	16,62	22,74	11,91	–0,57	–0,51	II
7	Суглинок тяжелый твердый	2,07	0,43	15,48	21,30	11,02	–0,55	–0,53	II
8	Гнейс слабывыветрелый	2,67	–	–	–	–	–	–	I

По результатам геофизических исследований КМПВ и ВСП [17] на территории строительной площадки [16] получены скоростные характеристики поперечных сейсмических волн инженерно-геологических слоев, представленные в таблице 2.

Таблица 2

**Скоростные характеристики сейсмических волн
в инженерно-геологических слоях грунта**

ИГС	1	2	3	4	5	6	7	8
Vs, м / с	160	205	219	249	303	375	463	1100

По данным 216 скважин глубиной 30 м и более (см. рис. 1), были получены границы залегания инженерно-геологических слоев 1–8 (см. табл. 1). На основе указанных границ построены инженерно-геологические 3D-модели площадки до глубины 100 м с шагом 25 м (рис. 2). В таблице 3 приведены модели грунта для зданий 1, 2, 3, 4 на уровне планировочных отметок.

Таблица 3

**Инженерно-геологическая модель грунта
под зданиями 1, 2, 3 и 4 строительной площадки**

№ слоя	Залегание слоев грунта, м											
	от	до	Мощ- ность	ИГС	От	до	Мощ- ность	ИГС	от	до	Мощ- ность	ИГС
	Здание 1				Здание 2				Здание 4			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	279	270	8,5	1	276	270	5,5	1	279	270	9	1
2.	270	269	1,5	3	270	255	15,5	4	270	264	6	3
3.	269	267	1,5	2	255	243	12	5	264	257	7	4
4.	267	264	3	3	243	228	14,5	6	257	234	22,5	5
5.	264	258	6,5	4	228	221	7	7	234	214	20,5	7
6.	258	239	19	5	221	–	–	8	214	–	–	8
7.	239	215	24	7	–	–	–	–	–	–	–	–
8.	215	–	–	8	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: инженерно-геологический слой (ИГС) – см. табл. 1.

В качестве заключения по процедуре сбора исходных данных укажем, что каждому слою грунта строительной площадки присваивается номер ИГЭ (табл. 1), за который принимают объем грунта одного и того же номенклатурного вида, однородного по свойствам и состоянию. На рисунке 3 представлено полупространство грунтового основания строительной площадки,

разделенное на восемь инженерно-геологических слоев, согласно таблице 1, с размерами в плане 490 × 490 × 32 м.

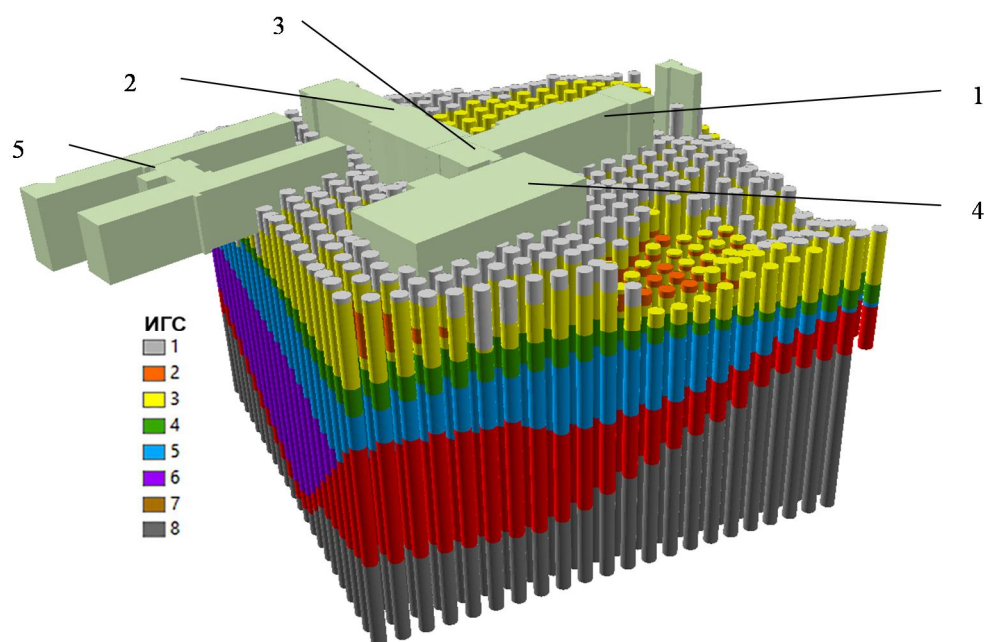


Рис. 2. 3D-модель инженерно-геологической строительной площадки до глубины 100 м с шагом 25 м: 1, 2, 3, 4 – промышленные здания комплекса, 5 – неконтролируемый объект

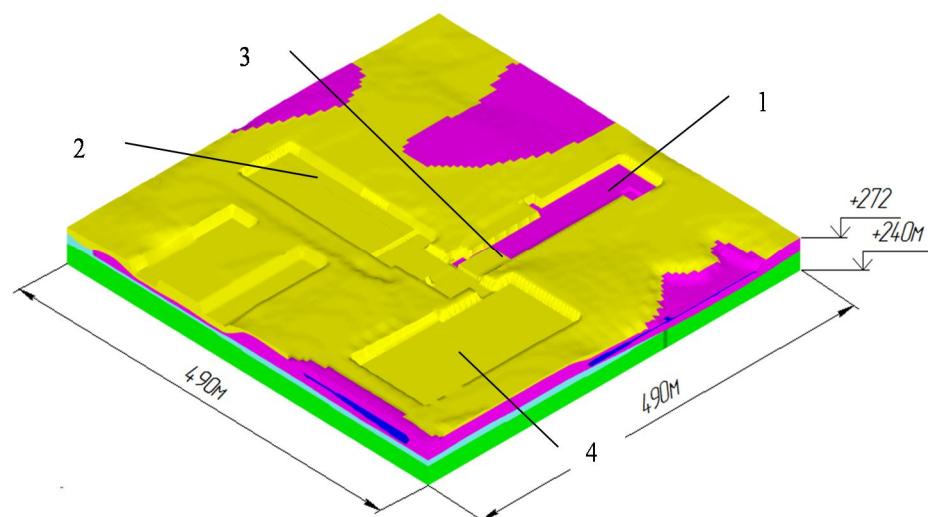


Рис. 3. Полупространство грунтового основания строительной площадки г. Железнодорожска, объединено в пять слоев (см. табл. 3)

В соответствии с номером ИГЭ каждому слою присваиваются физико-механические показатели (плотность, предельное сдвиговое напряжение и т.д.) и скорости распространения Р- и S-волн (см. табл. 2). Значения скоростей получают при обработке и интерпретации материалов сейсморазведоч-

ных работ (КМПВ, ВСП) [17]. Для дальнейшей работы в среде ГИС вышеуказанные данные должны быть представлены в виде базы данных или электронной таблицы (табл. 3).

Для дальнейшего численного моделирования реакции геологической среды на сейсмические воздействия на основе вышеизложенных данных выполняется построение 3D-модели геологической среды площадки с некоторым шагом (рис. 2).

3. Технология и результаты детального сейсмического микрорайонирования строительной площадки.

3.1. Синтезированный каталог землетрясений. Процедуру ВАСО строительной площадки, реализованную в методике ОСР-97, можно обобщенно разделить на два крупных этапа [10, 18, 19]:

1. На основе модели зон ВОЗ генерируется синтезированный каталог землетрясений для заданного периода времени T лет. Каждое землетрясение характеризуется набором параметров: магнитуда M_w ; длина и ширина площадки очага; азимут верхней кромки с координатами, задающий направление простирания очага; угол падения (угол между горизонтальной плоскостью и площадкой очага); географические координаты и глубина гипоцентра (см. рис. 7).

2. От каждого землетрясения, обозначенного в каталоге, вычисляется сейсмический эффект в расчетной точке на основе принятой макросейсмической модели затухания, и набирается статистика количества сотрясений разной интенсивности, которая переводится в кумулятивный вид. Таким образом, для расчетной точки получается количество (N) сотрясений большей или равной интенсивности с принятым шагом по шкале. Разделив T (интервал времени, для которого синтезирован каталог) на количество сотрясений N , получим значение интенсивности в баллах для определенного периода повторяемости. Таким образом, вычисляются величины балльности для нормативных периодов повторяемости 500, 1000 (ПЗ), 5000 и 10000 лет (МРЗ).

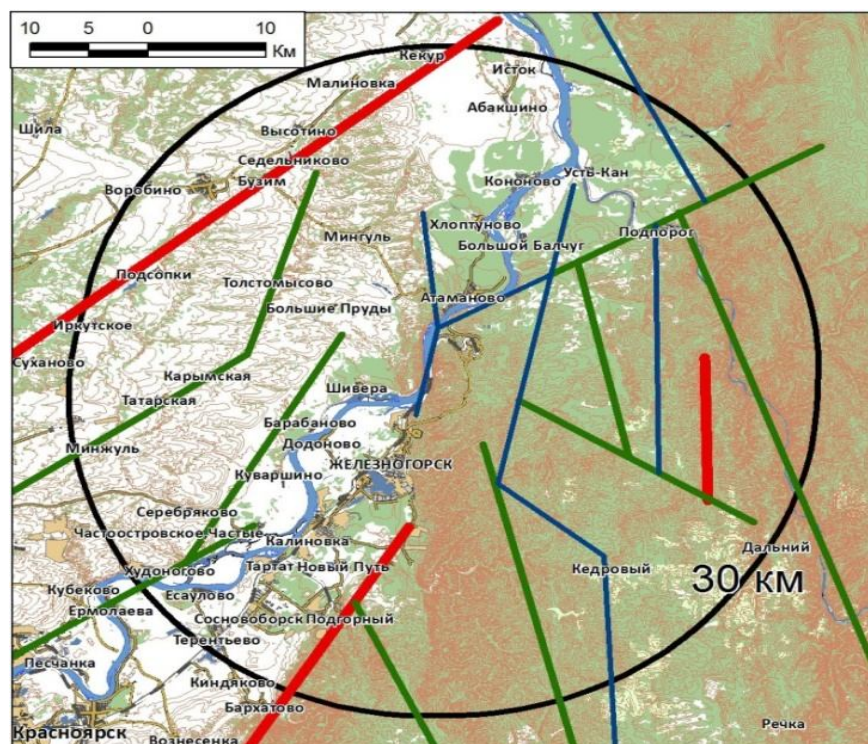
3.2. Региональная модель зон ВОЗ на основе полученной информации.

Для вероятностного метода оценки сейсмической опасности используем модель зон ВОЗ, полученных в [16]. На рисунке 4 приведены линеаментные структуры 30 км и 300 км зоны строительной площадки, а на рисунке 5 – графическая интерпретация параметров и повторяемости землетрясений синтезированного каталога (1 / год) с магнитудами $M_{lh} \leq 5,0 \pm 0,2$.

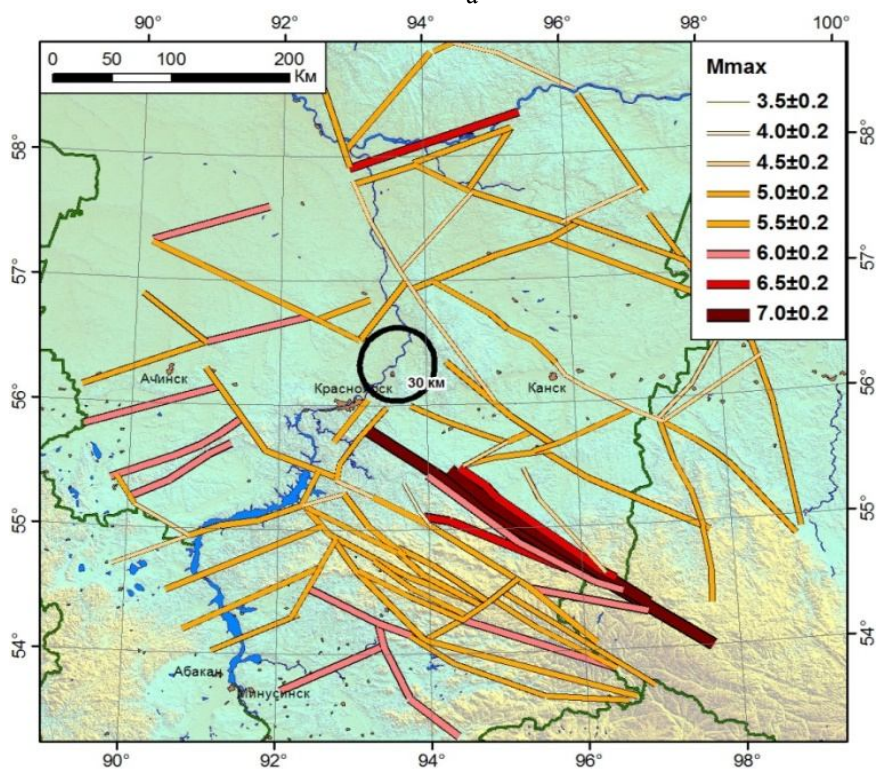
Рассеянная сейсмичность задана для 30-километровой зоны ВОЗ. С учетом структурированной по линеаментам сейсмичности для 30-километровой зоны к домену отнесены землетрясения с магнитудами меньше или равные 3,2; для 30–100-километровой зоны меньше или равные 5,2 (рис. 6). В таблице 4 приведены параметры домена.

Таблица 4

Параметры зон ВОЗ – домены								
Домен	$M_{\max}$	$S, \text{ км}^2$	Повторяемость землетрясений с M_{lh}					
			$5,0 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,2$
30	3	5,05	0	0	0	0	0,005923	0,016886



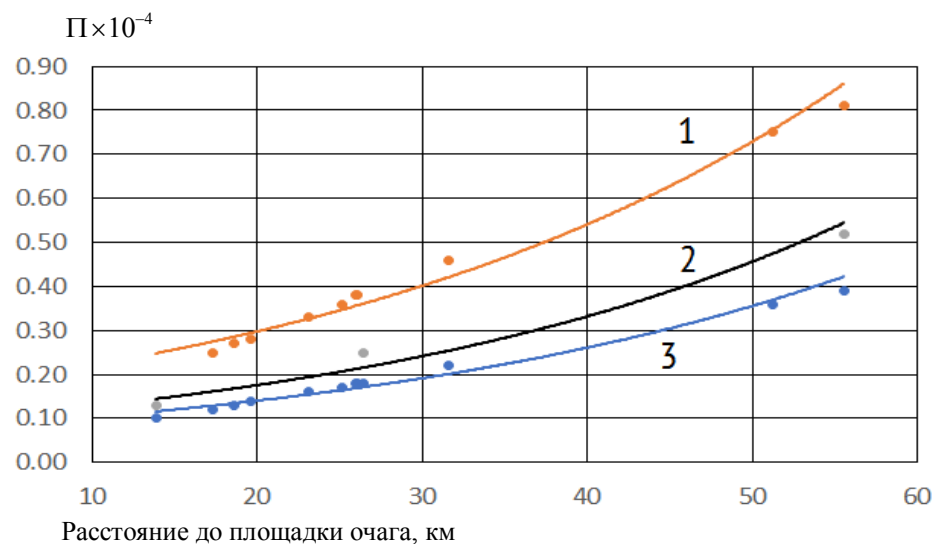
а



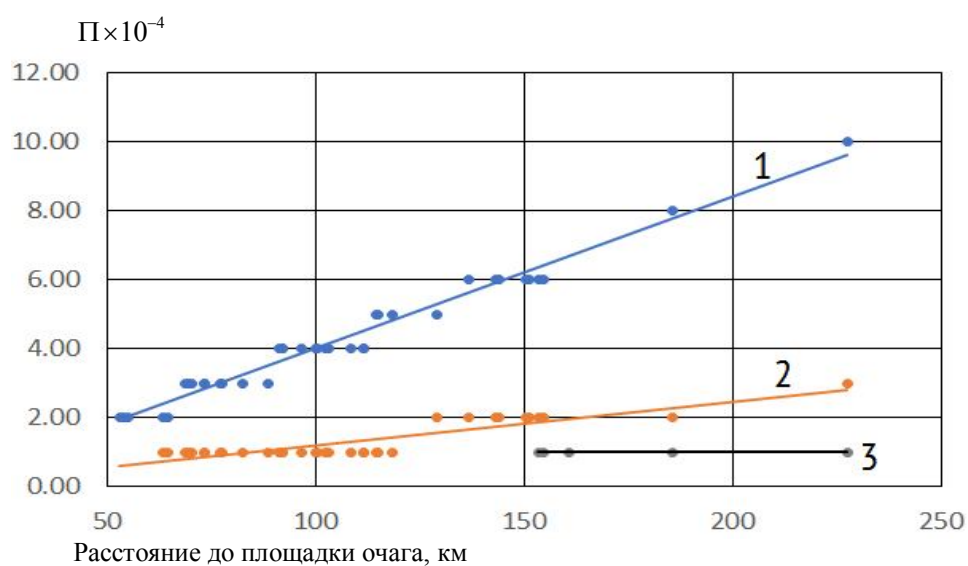
б

Рис. 4. Линеamentные структуры площадки исследований:
 а – 30-километровой зоны, б – 300-километровой зоны

3.3. Моделирование каталога сейсмических событий на основе моделей зон ВОЗ. Используемое для расчетов ПМО PRB-60 и Восток-2003 [6, 20] позволяет выполнить построение синтезированного каталога сейсмических событий на основе заданной модели зон ВОЗ на требуемый период времени: 100 лет для ПЗ и 1000 лет для МРЗ.



а)



б)

Рис. 5. Повторяемость (Π) землетрясений в год: а – ВОЗ 30 км зоны; б – ВОЗ 300 км зоны: 1 – магнитуда $M = 4,0 \pm 0,2$; 2 – $M = 4,5 \pm 0,2$; 3 – $M = 5,0 \pm 0,2$

Таким образом, в основу расчета повторяемости сейсмических воздействий различной интенсивности на изучаемой территории (см. рис. 5) и её сейсмического районирования положена виртуальная сейсмичность, полученная путем разыгрывания случайным образом гипотетических очагов землетрясений из продленного во времени синтезированного каталога и в соответствии с созданной моделью зон ВОЗ. При этом каждое событие в каталоге характеризуется моментной магнитудой, длиной, шириной, азимутом простирания и уг-

лом падения площадки очага, а также географическими координатами и глубиной гипоцентра.

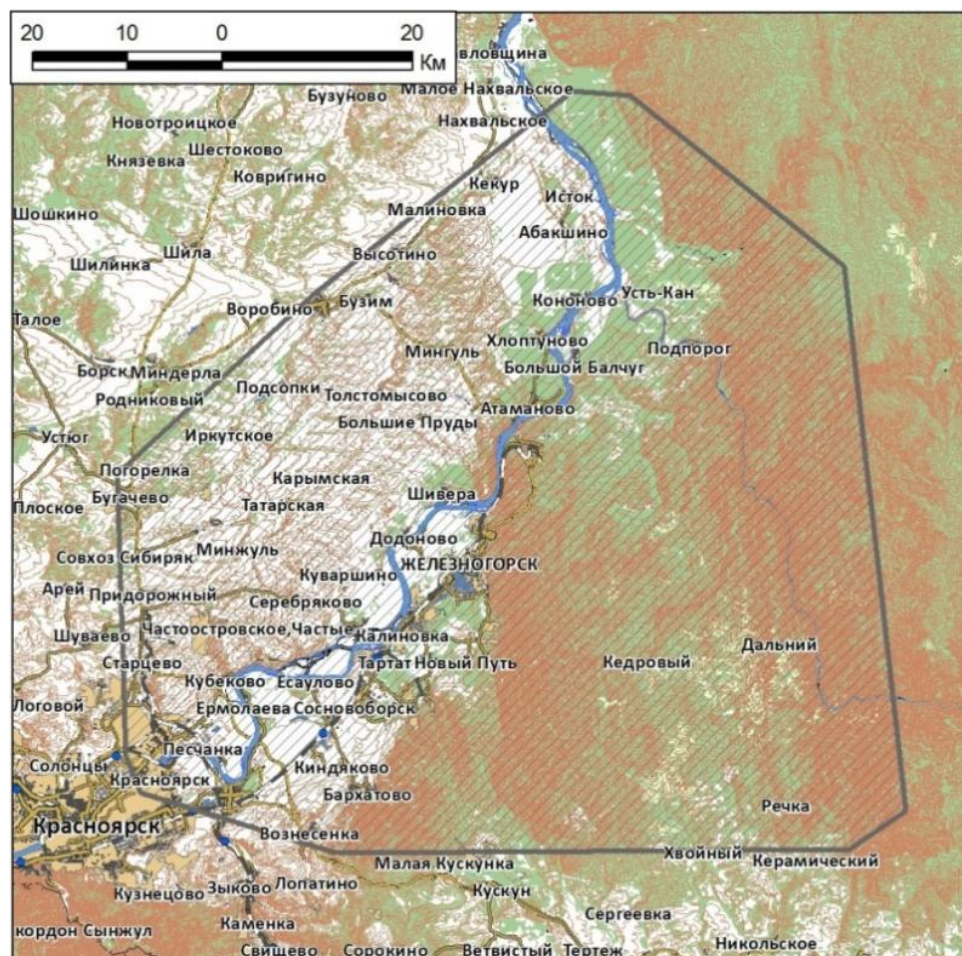


Рис. 6. Доменная структура 100-км зоны площадки строительства

С модельным синтезированным каталогом можно работать так же, как и с обычным наблюдаемым каталогом: строить графики повторяемости, карты проекций площадок очагов на поверхность (аналог карты реальных очагов), вертикальные разрезы очаговых зон и т.п.

На рисунке 8 приведен синтезированный каталог за период 10 000 лет для фоновой и структурированной сейсмичности. Длинные и короткие оси эллипсов соответствуют расчетным значениям L (длины площадки очага) и W (ширины площадки очага). Здесь также отметим, что благодаря соответствующей сейсмологической параметризации линейно-доменных моделей зон ВОЗ и проигрыванию ее с помощью специального ПМО [20] стало возможным создавать синтетические карты сейсмичности на любой обоснованный интервал времени и изучать сейсмический эффект, создаваемый виртуальными очагами на земной поверхности. На основе такой технологии, с учетом затухания сейсмического эффекта с удалением от источников землетрясений, авторский коллектив работ [18, 19, 21–23] выполнил расчеты и построил карты ОСР-97 А, В, С и D для различных периодов повторяемости сейсмических воздействий – 500, 1000, 5000 и 10000 лет.

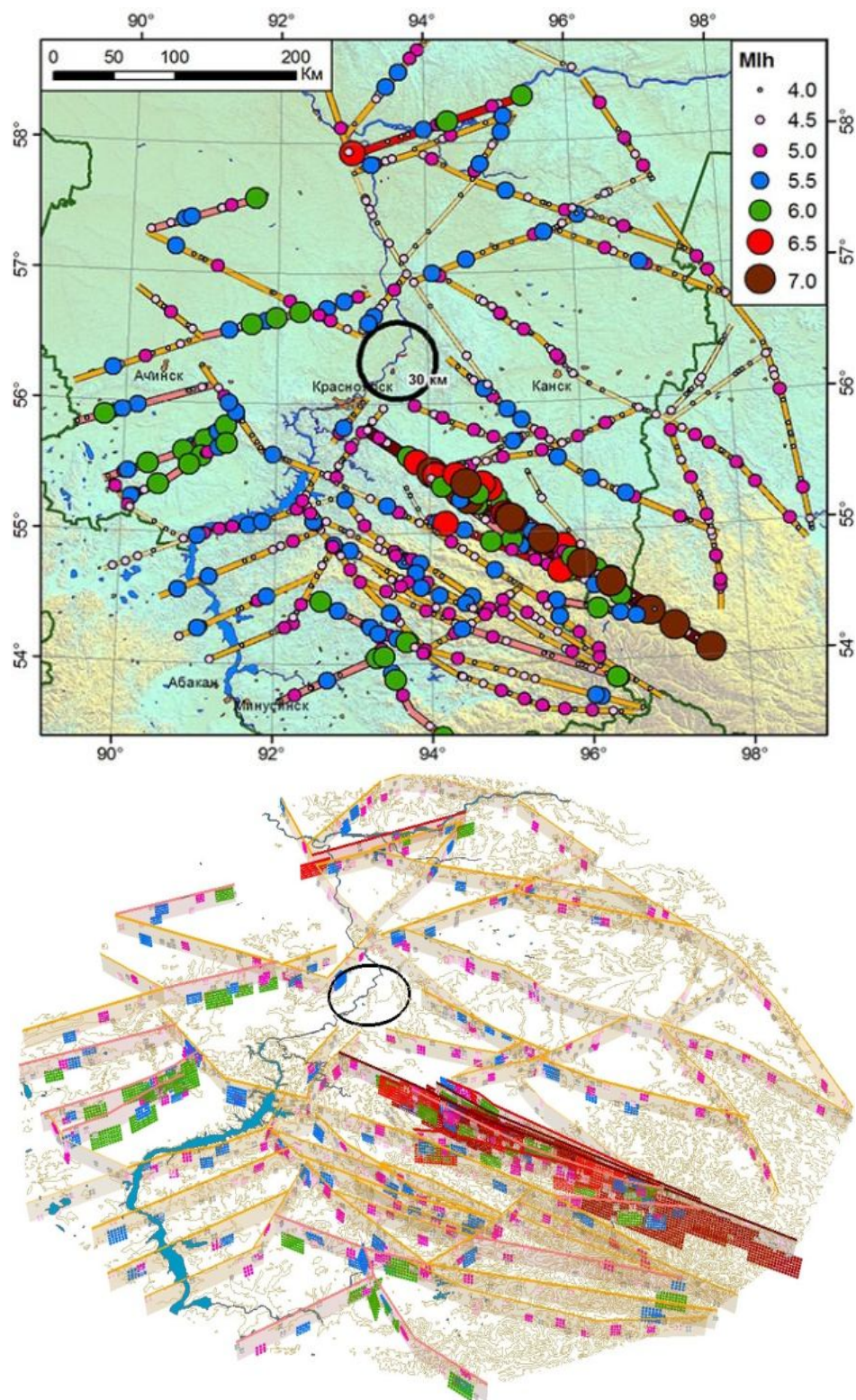


Рис. 7. Синтезированный каталог землетрясений на основе линейных зон ВОЗ
дальней 300-километровой зоны г. Железногорска за 10000 лет:
а – эпицентры землетрясений; б – площадки очагов землетрясений

3.4. Эмпирические уравнения затухания численных характеристик сейсмических колебаний. Для расчета спектров реакции β Ф.Ф. Аптикаевым [24], на основе эмпирических зависимостей, предложено использовать спектры, нормированные по спектральному уровню и преобладающей частоте f_0 (рис. 8).

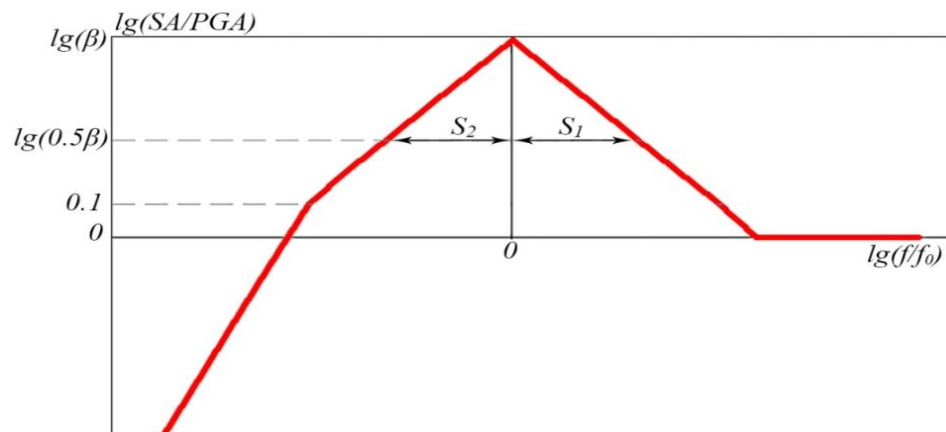


Рис. 8. Форма логарифмического сейсмического спектра реакции в нормированных ускорениях (логарифмического спектра коэффициентов динамичности SA / PGA). Обозначения: PGA – максимальное (пиковое) ускорение грунта; SA – амплитуда спектрального ускорения; f – частота колебаний; f_0 – преобладающая частота колебаний; β – максимальное значение спектрального коэффициента динамичности, $\beta = SA_{max} / PGA$; S_1 , S_2 – логарифмическая ширина высокочастотной и низкочастотной полосы спектра соответственно; S – полная логарифмическая ширина спектра, $S = S_2 + S_1$

Ширина S спектра реакции ($S_2 + S_1$) измеряется между значениями частот, при которых уровень спектра достиг половины его максимального значения (рис. 8). При этом ширина спектра S равна двум октавам со стандартным отклонением 0,20 десятичного логарифма $\lg(f / f_0)$:

$$S = 0,6 + C_1 + C_2 \pm 0,20, \quad (1)$$

где в зависимости от геологических условий принимаются: $C_1 = -0,05$ для взбросов; $C_1 = 0,0$ для сдвигов и $C_1 = 0,05$ для сбросов; $C_2 = -0,1$ для грунтов первой категории, $C_2 = 0,0$ для грунтов второй категории и $C_2 = 0,1$ для грунтов третьей категории СНиП II-7-81* [4, 5]; f – частота, Гц; f_0 – преобладающая частота, Гц.

Максимальное значение спектрального коэффициента динамического усиления β в безразмерном виде определяется следующим образом:

$$\lg(\beta) = 0,72 - 0,28 S + 0,07 \lg \tau \pm 0,07, \quad (2)$$

где преобладающая частота f_0 , Гц, находится по уравнению:

$$\lg(1 / f_0) = 0,15 \cdot Mlh + 0,25 \cdot \lg(R) + C_1 - 1,9 \pm 0,2, \quad (3)$$

в которых, в отличие от (1), постоянные принимаются: $C_1 = -0,10$ для взбросов, $C_1 = 0,00$ для сдвигов и $C_1 = 0,10$ для сбросов; Mlh (M_s) – магнитуда землетрясения на свободной поверхности, R – минимальное расстояние от выбранного места модельного землетрясения до соответствующей расчетной точки строительной площадки в км (см. рис. 6); τ – длительность расчётной фазы колебаний, с, предложенная Ф.Ф. Аптикаевым. Это интервал времени, во время кото-

рого амплитуда исследуемой акселерограммы превышает 50 % от максимального уровня.

Расчётный период колебаний $T_0 = 1 / f_0$ находят по следующей зависимости:

$$\lg T_0 = 0,15 Mlh + 0,25 \lg R + C_3 - 1,9 \pm 0,2, \quad (4)$$

где Mlh – магнитуа землетрясения, определяемая по сейсмическим волнам на свободной поверхности земли; R – минимальное расстояние от границы площадки расчётного модельного землетрясения до расчетной точки строительной площадки, км; константа $C_3 = -0,10$ для взбросов, $C_3 = 0,00$ для сдвигов и $C_3 = 0,10$ для сбросов аналогично (3).

Максимальная амплитуда расчётного спектра реакции во всем исследуемом диапазоне частот находится следующим образом (см. рис. 8):

$$SA_{\max} = \beta \cdot PGA,$$

где PGA (см / с²) – пиковые ускорения горизонтальных компонент рассчитываются по параметрам очага землетрясения с использованием известных решений Ф.Ф. Аптикаева и С.А. Перетоккина [24, 25] по зависимостям:

$$\lg(PGA) = \begin{cases} C_4 \cdot 0,9 + 2,23 \pm 0,16, & \text{при } R \leq (0,33 \cdot Mlh - 1,51), \\ C_4 \cdot (0,33 \cdot Mlh - 0,61 - \lg R) + 2,23 \pm 0,16, & \text{при } (0,33 \cdot Mlh - 1,51) < R \leq (0,33 \cdot Mlh - 1,61), \\ 0,634 \cdot Mlh - 1,92 \cdot \lg R + 1,076 \pm 0,18, & \text{при } R > (0,33 \cdot Mlh - 1,61), \end{cases} \quad (5)$$

где коэффициент C_4 принимается следующим образом: $C_4 = 0,467$ для сбросов, $C_4 = 0,550$ для сбросо-сдвигов, $C_4 = 0,633$ для сдвигов, $C_4 = 0,717$ для взбросо-сдвигов и $C_4 = 0,800$ для взбросов.

Особенностью ВАСО является обязательность вероятного подхода к разбросу величин параметров исследуемых моделей. Для проанализированных эмпирических зависимостей это выглядит как добавка к расчетным значениям $\lg(PGA)$, $\lg(1 / f_0)$, S , $\lg(\beta)$ случайных величин с обычно используемым нормальным распределением. При этом стандартное отклонение σ приводится со знаком $\pm$.

Так как используемый на первом этапе процедуры ВАСО синтезированный каталог насчитывает сотни тысяч землетрясений, предложенные независимые случайные добавки позволяют получить диапазон PGA , f_0 , S , β . Он схож с реально наблюдаемым в статистике, который и заложен в основу приведенных эмпирических зависимостей (5).

Таким образом, чем более длительный период сейсмических воздействий подвергается исследованию, тем выше вероятность существенных отклонений от имеющихся средних зависимостей. Данное явление иллюстрируется тем, что оценки сейсмической опасности для длительных периодов повторяемости ($T = 10000$ лет) на вероятностных картах ОСР-97 выше, чем полученные детерминистскими методами (по средним зависимостям) [26].

На втором этапе процедуры ВАСО для исследуемой расчетной точки строительной площадки требуется получить набор спектров реакции от всех используемых для анализа модельных землетрясений. Для этого статистика выбирается как для расчетной интенсивности, так и для PGA , а также амплитуд реакции на фиксированных периодах: 0,1; 0,2, 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 с. В результате расчётного анализа получены обобщенные спектры реакции для периодов повторяемости ПЗ и МРЗ (рис. 9, табл. 5).

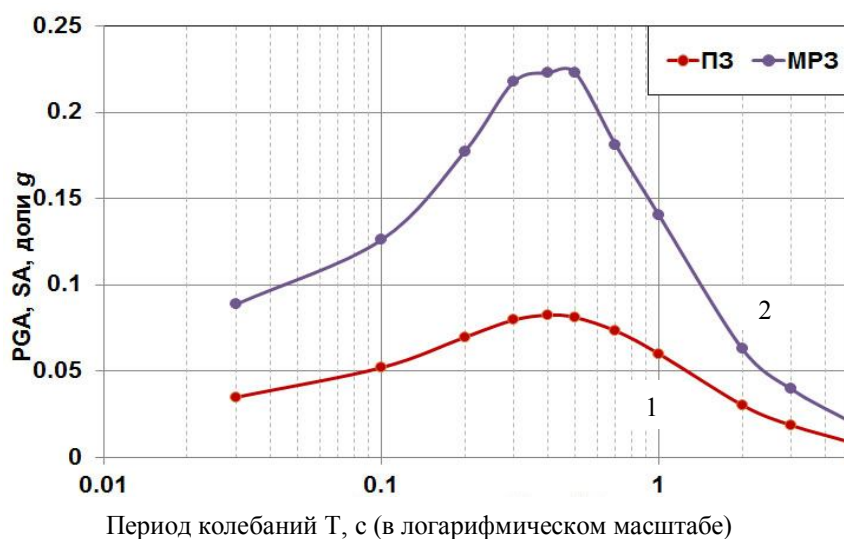


Рис. 9. Обобщенные сейсмические спектры реакции для периодов повторяемости ПЗ и МРЗ строительной площадки г. Железнодорожника: 1 – ПЗ; 2 – МРЗ

Таблица 5

Расчетные пиковые ускорения и амплитуды обобщенных спектров реакции при разных периодах повторяемости

Период повторяемости T, лет	Пиковое ускорение PGA, см / с ²	Амплитуды обобщенных спектров реакции SA, доли g*, на периодах колебаний T, с									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	5,0
1000 (ПЗ)	0,035	0,052	0,070	0,080	0,082	0,081	0,073	0,060	0,030	0,019	0,009
10000 (МРЗ)	0,089	0,126	0,177	0,218	0,223	0,223	0,181	0,141	0,063	0,040	0,020

3.5. Пересчет макросейсмической балльности в амплитудные параметры сейсмических ускорений. В период с 1960 по 2000 г. большинство стран, в том числе и Россия, перешли к сейсмическому районированию в вопросах расчёта сейсмической устойчивости зданий и сооружений. При этом нормируются следующие параметры колебаний: максимальные ускорения, максимальные скорости или уровни спектра реакции (амплитуды спектральных ускорений) [18, 19]. Карты ОСР являются основой комплекса нормативных документов, поэтому отражённые картографические данные напрямую увязаны с принятой методикой расчёта сейсмических нагрузок на здания и сооружения при проектировании.

Преимущества и недостатки принятых для нормативных расчётов амплитудных параметров и макросейсмической интенсивности как исходных данных оценки сейсмических нагрузок в настоящее время широко обсуждаются. Большинство мнений авторов сводится к тому, что адекватно описывать сейсмическое воздействие возможно только с учетом комплекса данных, таких как амплитудные характеристики колебаний, их частотный состав и продолжительность воздействия.

Широко используемая макросейсмическая интенсивность в баллах отражает в первую очередь уровень повреждений типовых зданий с известной уязвимостью, являясь достаточно удобной системой оценки уязвимости зданий для слабоизученных территорий. Набрать статистику данных, базирующуюся на уровне конечных воздействий и необходимую для построения такой сейсмической модели проще, чем создавать базу данных сильных движений с записями реальных землетрясений [27, 28].

В настоящее время СП (СНиП) [4, 5] принята процедура перехода от нормативной балльности к нормативным ускорениям и сейсмическим спектрам реакции. Очевидно, что недостаток данных отразится на достоверности получаемых результатов. Ненадежность этого перехода предложено компенсировать повышающими коэффициентами.

Для особо ответственных сооружений нормативные документы ОИАЭ требуют указанной выше оценки сейсмических эффектов как в пиковых, так и в спектральных ускорениях [29–35]. Однако переход в расчётах от интенсивности к ускорениям, а тем более к сейсмическим спектрам реакции в условиях недостатка исходных параметров осложняет задачу, стоящую перед проектировщиками. Как отмечалось выше, необходимо учитывать, что шкала макросейсмической интенсивности MSK-64 является описательной шкалой повреждений типовых зданий и сооружений при сейсмических воздействиях. Каждому баллу в MSK-64 соответствует диапазон физических параметров воздействия или их сочетаний. Следует также учесть, что интервалы этих параметров для разных баллов пересекаются. Для устранения этого противоречия на практике применяют эмпирические соотношения, связывающие ускорение грунта и сейсмическую интенсивность и определяющие среднюю (с 50%-й обеспеченностью) зависимость между ними, а также оценивается вероятный разброс полученных значений. Для шкалы MSK-64 указанное соотношение имеет следующий вид:

$$\lg(PGA) = -0,1 + 0,3 I, \quad (6)$$

где PGA (peak ground acceleration) – максимальное (пиковое) ускорение колебаний грунта в пункте наблюдения в горизонтальной плоскости, см / с²; I – сейсмическая интенсивность, балл.

Ф.Ф. Аптикаевым было предложено несколько иное соотношение, дающее более высокие значения расчётных параметров в области сильных землетрясений. Данное соотношение увязывает физические параметры сейсмических воздействий (где PGA, см / с²; PGV, см / с; PGD, см, – пиковые ускорение, скорость и смещение грунта соответственно) и макросейсмическую балльность (I) [24], по которому средняя зависимость между PGA и I имеет вид:

$$\lg(PGA) = -0,755 + 0,4 I. \quad (7)$$

Примером указанного выше пересчета является международная карта глобальной сейсмической опасности (GSHMAP) [36, 37], для которой значения интенсивности, найденные по карте ОСП-97-А, пересчитывались в пиковые ускорения по зависимости В.И. Уломова. Эта зависимость дает значения, находящиеся в диапазоне между полученным по зависимостям (6) и (7) [21]:

$$\lg(PGA) = -0,222 + 0,333 I. \quad (8)$$

Очевидно, формулы (6), (7) и (8) позволяют получить лишь приблизительные оценки. По существу, пересчет вероятностных оценок балльности в ускорения по зависимостям (6) ÷ (8) равнозначен пересчету традиционной модели

сейсмического воздействия, что само по себе не вполне корректно. Кроме того, анализ результатов расчёта для землетрясений высоких балльности показывает, что пиковые ускорения по соотношениям (6) и (7) могут различаться между собой почти в два раза.

Компенсировать вероятный разброс значений PGA (6)–(8) относительно средних величин нормативными документами [8, 9] предлагается вводом в расчёт понятия «обеспеченность», т.е. существует вероятность превышения нормируемых расчётных значений. Для того введены понятия пиковых ускорений при 50-ти и 84%-й обеспеченности расчетной балльности [29]. Например, по зависимости (7) землетрясению интенсивностью 6 баллов соответствует среднее значение PGA, равное $44 \text{ см} / \text{с}^2$ при 50%-й обеспеченности и $78 \text{ см} / \text{с}^2$ при 84%-й. Как отмечалось выше, это представляется вынужденной мерой, позволяющей в определенной степени застраховаться от получения параметров реального землетрясения с большими значениями относительно нормативного. Такой подход позволяет сбалансировать между собой завышенные запасы прочности, сопровождающиеся высокой стоимостью объекта, но не решающей проблему как таковую с точки зрения достоверности расчёта. Кроме того, существуют объекты, расчёты которых требуют повышенного внимания к вопросам сейсмической безопасности. Так, оценка сейсмической опасности с вероятностью, равной 1,5 % и 10 % (а для атомных объектов – 0,5 %), использование зависимостей 50-ти или 84%-й обеспеченности (6) и (7) превышения полученных значений за 50 лет требует предосторожности.

Как показывает анализ результатов расчётов для значительных удалений от эпицентра землетрясения, приведённые выше расчётные зависимости дают сходные значения нагрузок. Рассмотрим графики затухания пикового сейсмического среднего значения ускорения колебаний грунта в зависимости от удаления площадки от очага (рис. 10). На графике представлены результаты расчёта по зависимостям (5)–(7) [18, 19, 24] из которых видно, что для $MS = 6,5$ на расстоянии 25 км кривые № 1 и № 3 практически совпадают, а график № 2 расположен существенно выше. Однако для $MS = 6,0$ (рис. 10а) на расстоянии 20 км совпадают кривые № 2 и № 3, а график № 1 проходит ниже. Учитывая, что землетрясения с $MS = 6,5$ на расстоянии более 25 км вносят наибольший вклад в статистику разрушений при сейсмических воздействиях, можно сделать вывод, что формула (6) при прямом пересчете I в PGA дает результат, близкий к результатам расчетов по приведённой зависимости (5).

Учитывая, что используемые модели ВОЗ и сейсмического эффекта принятые в [25], продемонстрировали приемлемую достоверность. Открывается возможность более корректного пересчета дробных значений баллов в PGA ($\text{см} / \text{с}^2$) по зависимостям (9), полученным путем линейной аппроксимации известного набора расчетных точек «пиковое ускорение – балльность» (9):

$$\lg(PGA) = \begin{cases} 0.72 + 0.12 \cdot I_0 \pm 0.03 & \text{при } 5.5 \leq I_0 < 6.5 \\ -2.19 + 0.57 \cdot I_0 \pm 0.06 & \text{при } 6.5 \leq I_0 < 7.5 \\ -0.90 + 0.40 \cdot I_0 \pm 0.05 & \text{при } 7.5 \leq I_0 < 8.5 \\ 0.27 + 0.26 \cdot I_0 \pm 0.02 & \text{при } 8.5 \leq I_0 < 9.5 \end{cases} \quad (9)$$

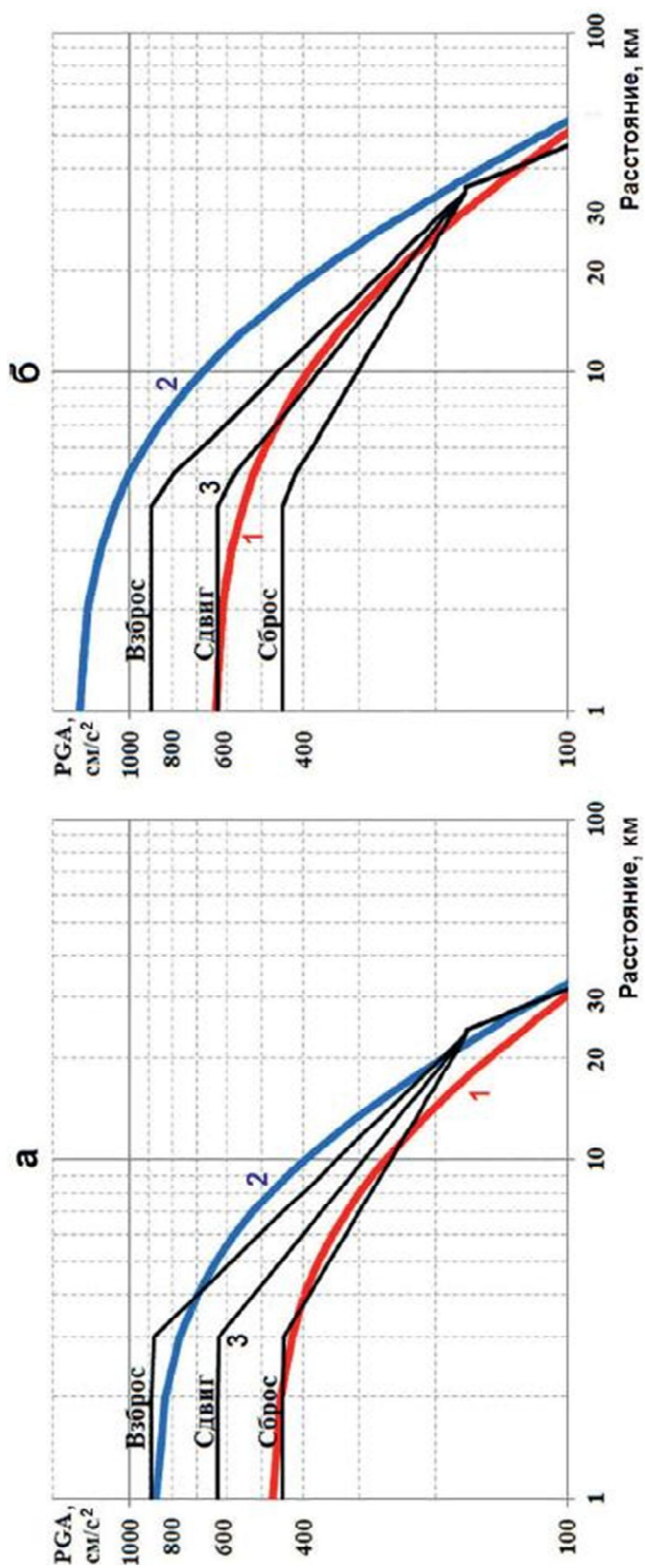


Рис. 10. Средние графики затухания пикового ускорения колебаний грунта PGA с расстоянием от площадки очага для магнитуды MS, равной 6,0 (а) и 6,5 (б), полученные по модели затухания А.А. Гусева [18, 19], пересчитанной по формулам (6) и (7) (см. (1) и (2)) и по модели затухания Ф. Ф. Аггикаева [24] по формулам (5) (см. (3))

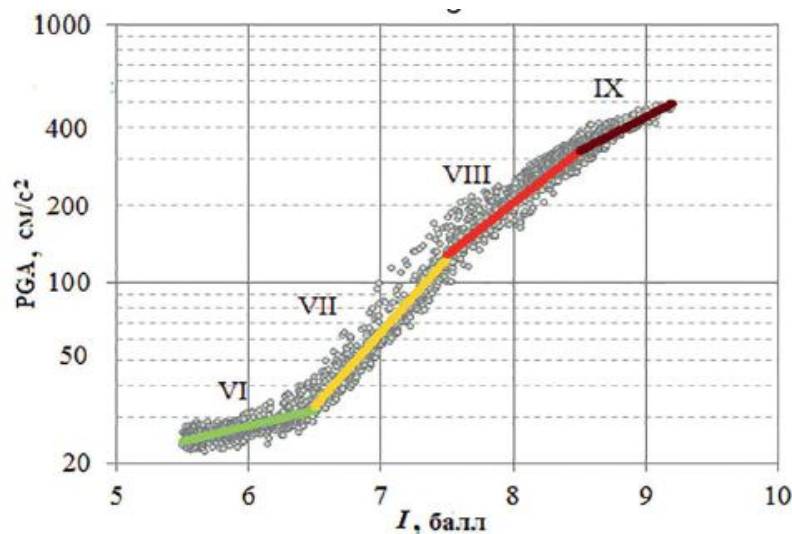


Рис. 11. Сопоставление результатов линейной аппроксимации (9) расчетной зависимости «PGA-I» (точки) по интервалам интенсивности 6, 7, 8 и 9 баллов с графиками, полученными по формулам (6) и (7)

Как отмечалось ранее, после знаков « $\pm$ » добавлены стандартные отклонения. На рисунке 11 представлен аппроксимирующий график, построенный по формулам (9), где выделенные отрезки соответствуют интенсивностям сейсмичности VI, VII, VIII и IX баллов [4, 5]. Можно добавить, что качественной особенностью обобщающего графика на рисунке 12 является непрерывность зависимости сейсмической интенсивности ($I + \Delta I$) от пиковых ускорений PGA ($\text{см} / \text{с}^2$) [27, 28] в отличие от дискретного набора расчётных линий (9).

3.6. Расчет сейсмической интенсивности. Расчет сейсмической интенсивности является важнейшим элементом получения реальной картины воздействия на здания и сооружения во время землетрясения и производится с применением метода сейсмических жесткостей и различных реализующих его программ, рассчитывающих параметры колебаний поверхности грунтовой толщи как один из наиболее распространённых вариантов на основе линейных уравнений [13] методом тонкослоистых сред по программе Grunt (ИФЗ РАН) либо методом передаточных функций, реализованном в программе WinShake (модификация SHAKE 91 [36]).

Е.В. Бодякиным [11] предложено, при использовании метода сейсмических жесткостей инструментальная оценивать скоростные свойства сейсмореализующего слоя земли рассматривать как базу для расчета приращений сейсмической интенсивности. В свою очередь, оценка по методу сейсмических жесткостей выполняется на основе расчёта скоростей распространения сейсмических волн в пропластках различной плотности и соответствующей им скорости распространения волны в верхней (10-метровой) толще изучаемого и эталонного грунта с учетом влияния обводненности грунта.

Расчеты выполняются по формуле:

$$J = J_0 + DJ_c + DJ_B, \quad (10)$$

где J – сейсмическая интенсивность в баллах с учетом конкретных пластовых условий; J_0 – исходная сейсмическая интенсивность в баллах в средних грунтовых условиях (в данном случае II категория по сейсмическим свойствам)

по данным УСО; DJ_c – приращение сейсмической интенсивности (интерференции) за счет различия акустических жесткостей пропластков на изучаемом и эталонном участке:

$$DJ_c = 1,67 \lg (V(p,s)p / V(p,s)p_i), \quad (11)$$

где $V(p,s)p$ и $V(p,s)p_i$ – средневзвешенные значения скоростей распространения продольных и поперечных волн для расчетной структуры пласта на изучаемом и эталонном участках; p и p_i – аналогично средневзвешенные значения плотностей на изучаемом и эталонном участке; DJ_B – приращения сейсмической интенсивности за счет изменения сейсмических свойств пласта при обводнении грунта [12, 13].

Для перерасчета пикового ускорения в интенсивность предложено использовать соотношение Ф.Ф. Аптикаева [24]:

$$I = 2,5 \lg(PGA, \text{ см / с}^2) + 1,25 \lg(d, \text{ с}) + 1,05. \quad (12)$$

3.7. Соотношение расчетной интенсивности и длительности колебаний. При использовании динамических методов расчета сооружений на сейсмостойкость широко используются синтезированные акселерограммы, набор требований к которым наиболее четко прописан в нормативно-методических документах [8, 9, 29, 38]. Важнейшими характеристиками синтезированной акселерограммы являются ее длительность и форма огибающей, и, к сожалению, рекомендации разных нормативных документов по их заданию существенно расходятся. В частности, в работе [24] предложена эмпирическая зависимость для оценки длительности колебаний на фиксированном расстоянии от эпицентра землетрясения с заданной магнитудой:

$$\lg \tau = 0,15 MS + 0,5 \lg R + C_5 + C_6 - 1,3 \pm \sigma, \quad (13)$$

где τ – длительность основной фазы колебаний, с, рассматриваемая как интервал времени, в течение которого амплитуда огибающей колебаний превышает 1/2 значения максимального уровня; константы $C_5 = -0,25$ для взбросов, $C_5 = -0,00$ для сдвигов и $C_5 = -0,25$ для сбросов; константа $C_6 = -0,15; 0,00; 0,4$ для грунтов 1-й, 2-й, 3-й категории соответственно; σ – стандартное отклонение: $\sigma = 0,3$.

Учитывая, что в нашем случае расчетное сейсмическое воздействие не имеет привязки к конкретному сочетанию магнитуда-расстояние (M_s, R), а представляет собой интегральное значение от всех возможных комбинаций (M_s, R) в рамках используемых моделей зон ВОЗ и сейсмического эффекта (см. рис. 5).

Учитывая, что в результате ВАСО получили параметры сейсмических воздействий с заданной обеспеченностью, разумно для оценки длительности (13) использовать тот же подход на основе деагрегационного анализа сейсмической опасности для строительной площадки:

1. Если землетрясение синтезированного каталога обеспечивает сотрясение на площадке, равное или большее чем расчетное (см. табл. 6 ПЗ = 5,5 и МРЗ = 6,8), то по формуле (13) рассчитывается длительность колебаний сотрясений $\tau(M_s, R)$ с учетом σ .

2. Из полученного набора длительностей набирается статистика количества землетрясений с шагом по τ . В результате этого для каждого интервала длительности получаем количество землетрясений, вызвавших на площадке сотрясение, равное или большее чем IT , где T – период повторяемости сейсмических воздействий.

3. После этого следует перевести статистику в процентное соответствие от общего количества сотрясений и преобразовать в кумулятивный вид по принципу меньшей и равной длительности.

В результате указанной процедуры (пп. 1–3) для интенсивности ИТ получаем соответствие длительности τ и ее процентной обеспеченности, то есть вероятности того, что длительность землетрясения $\geq$ ИТ не превысит τ . Все это позволяет получить для исследуемой площадки оценку длительности колебаний τ с той же вероятностью не превышения, что и оценку интенсивности (10) или амплитудных параметров (5). На рисунке 12 приведены графики оценки вероятной длительности колебаний τ для строительной площадки г. Железнодорожска для расчетной интенсивности сотрясений с периодами повторяемости T , равными 1000, 10000 лет, что соответствует $\sim 95\%$, $99,5\%$ вероятности не превышения в течение 50 лет.

Принимая для оценок длительности значения τ той же обеспеченности, что и расчетная интенсивность, получим вероятностные оценки параметров расчетных сейсмических воздействий, приведенных в таблице 6.

Таблица 6

**Вероятностные оценки сейсмической опасности
на средних грунтах строительной площадки г. Железнодорожска**

Параметр	ПЗ	МРЗ
Период повторяемости воздействий T , лет	1000	10000
Интенсивность на грунтах II категории, балл	5,5	6,8
Интенсивность на грунтах I категории, балл	4,5	5,8
PGA на грунтах II категории, см / с ² (см. табл. 4)	35	89
PGA на грунтах I категории, см / с ²	18	45
Продолжительность колебаний τ , с	7,6	22

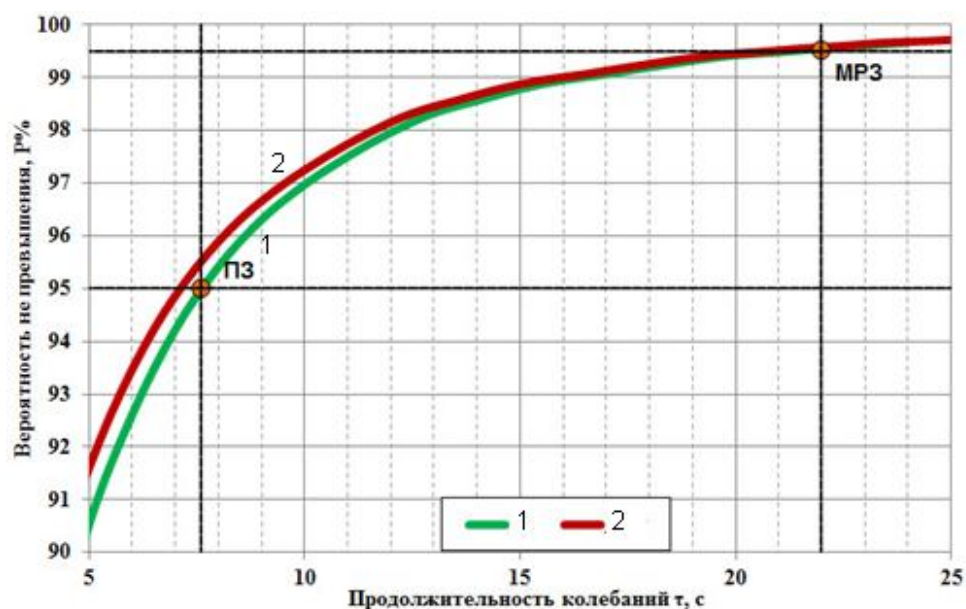


Рис. 12. Расчетные графики длительности сотрясений строительной площадки ОИАЭ г. Железнодорожска: 1 – ПЗ; 2 – МРЗ

4. Синтезированные акселерограммы. В соответствии с Приложением 3 РБ-006-98 [8] и требованиями МР1.5.2.05.999.0025-2011 [29], для строительной площадки были рассчитаны исходные трехкомпонентные акселерограммы уровней воздействия ПЗ и МРЗ, для генерации которых использовался метод, рекомендуемый Приложением 3 РБ-006-98 [8]. Акселерограмма, соответствующая спектру динамического ускорения, представленного на рисунке 10, имеет вид:

$$a_{\beta}^0(t) = A(t) \sum_{i=1}^{na} B_i \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (14)$$

где $A(t)$ – огибающая ($\max|A(t)| = 1$) единичной нормализованной акселерограммы, а фазовые углы φ представляют собой равномерно распределенные в интервале от 0 до 2π случайные величины с шагом $\Delta\omega$ по частоте. В качестве первого приближения для B_{i1} используются значения, непосредственно взятые с заданной кривой $\beta(T)$ (см. рис. 9) для соответствующих значений частот ω_i . Следующее приближение определяется по формуле:

$$B_{i2} = B_{i1} \frac{\beta(T)}{\beta_1(T)}, \quad (15)$$

в которой $\beta(T)$ принимается по обобщенному спектру динамического ускорения (см. рис. 9), а $\beta_1(T)$ – кривая, полученная на первом шаге итерации.

В результате на рисунке 13 приведена модельная исходная 3-компонентная интегрируемая акселерограмма уровня МРЗ MSK-64 на скальном основании. На рисунках 14–16 приведены соответственно ее 3-компонентные спектры ответа (ССО), безразмерные сейсмические коэффициенты динамичности и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Дополнительно укажем, что на СКД модельной акселерограммы (см. рис. 15) при затуханиях 2,4 % и 8 % наложен СКД СП [5], который характеризуется 7–8 % затуханием.

5. Численное моделирование реакции грунта на сейсмические воздействия. Моделирование реакции геологической среды на землетрясения выполняются в программах WinShake [36] и Deepsoil 6.1 [39], посредством пересчета акселерограммы (см. рис. 13) через сейсмогеологические модели на дневную поверхность. Алгоритм программ состоит в последовательной обработке опций, заданных в командном файле.

Грунтовый разрез описывается как совокупность перечисляемых и нумеруемых сверху вниз слоев (см. табл. 1, 3), включая полупространство (рис. 3), каждый из которых имеет свои механические параметры. Каждый слой может быть разбит на подслои одинаковой мощности с механическими параметрами своего слоя для выяснения свойств характера сейсмического движения на нужной глубине разреза, либо слои и подслои с близкими физико-механическими параметрами могут быть объединены в один с усредненными параметрами. В частности, в настоящей работе все слои объединены в пять, с усредненными физико-механическими параметрами, что и показано на рисунке 4.

Входное сейсмическое движение (рис. 13) считывается из форматного файла. Нелинейное и неупругое поведение грунта при нагрузках, вызванных сильными движениями, описывается изменением модулей упругости и затухания материалов слоев, отвечающими вызванной деформации. Их значения определяются итеративно посредством приведения максимальной деформации к некоторой однородной среде для слоя.

Для этих целей расчеты проводились для уровней воздействия на поверхности 7,0, 7,2, 7,4, 7,6, 7,8, 8,0 балла МРЗ MSK-64. По результатам расчетов получены расчетные трёхкомпонентные акселерограммы, велосигаммы, сейсмограммы для дневной поверхности, на уровнях фундаментов зданий 1, 2, 3 и 4 и на подошве полупространства грунта (рис. 3) на отм. + 240 м, PGA в долях $g = 9,81 \text{ м / с}^2$ которых приведены в таблицах 7–9.

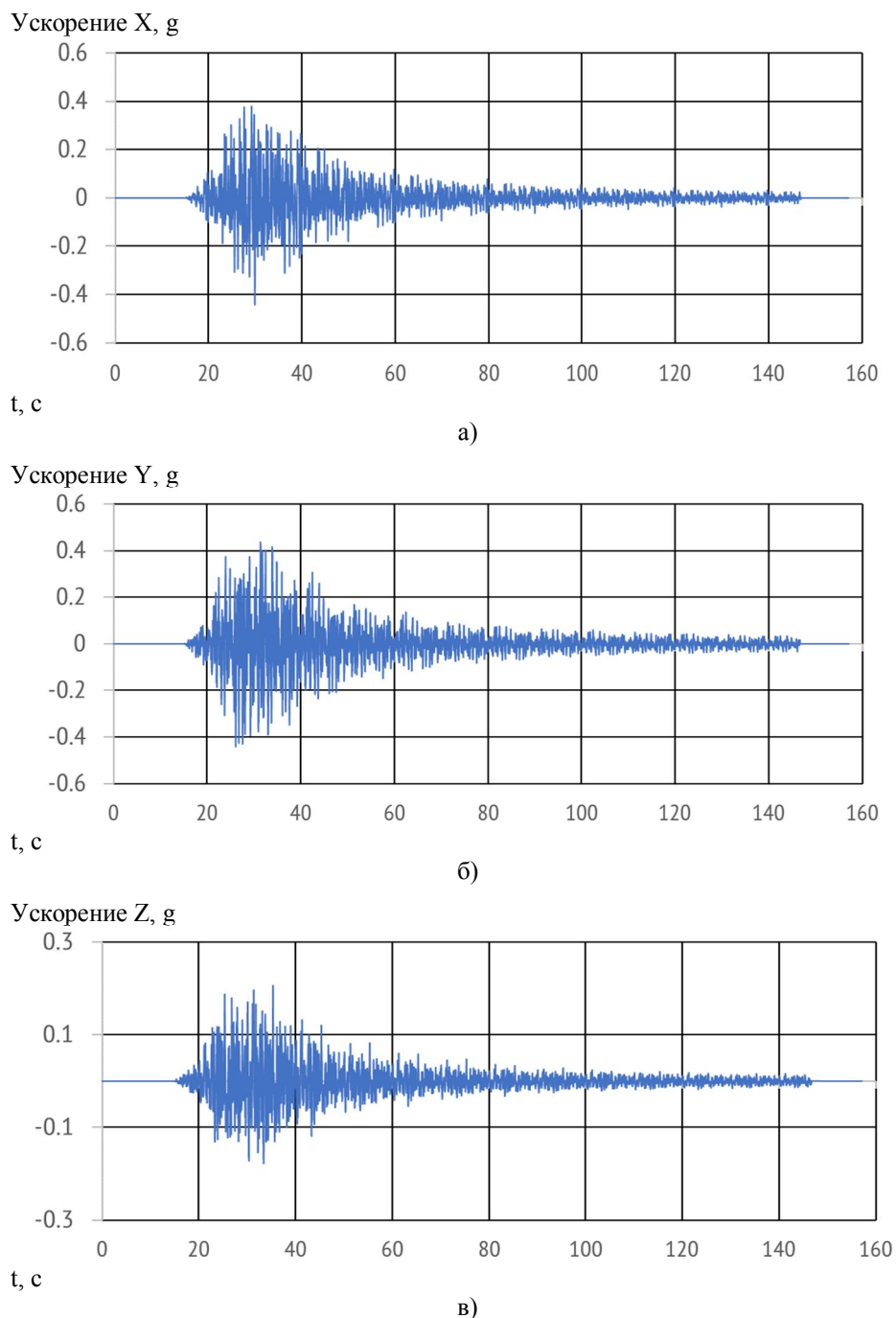
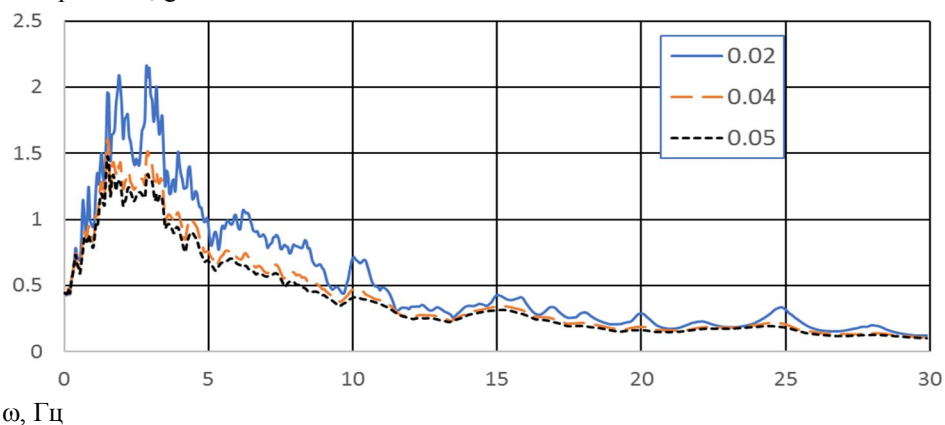


Рис. 13. Модельная исходная 3-х компонентная синтезированная акселерограмма уровня МРЗ MSK-64: а, б, в – компоненты X, Y и Z на скальном основании

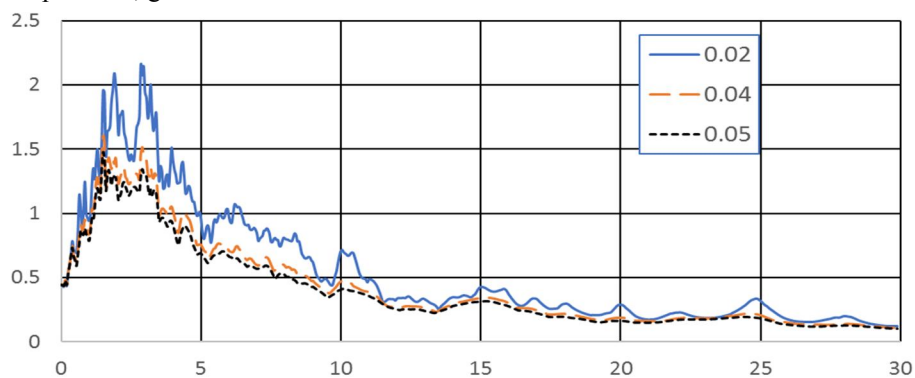
Ускорение X, g



ω , Гц

а)

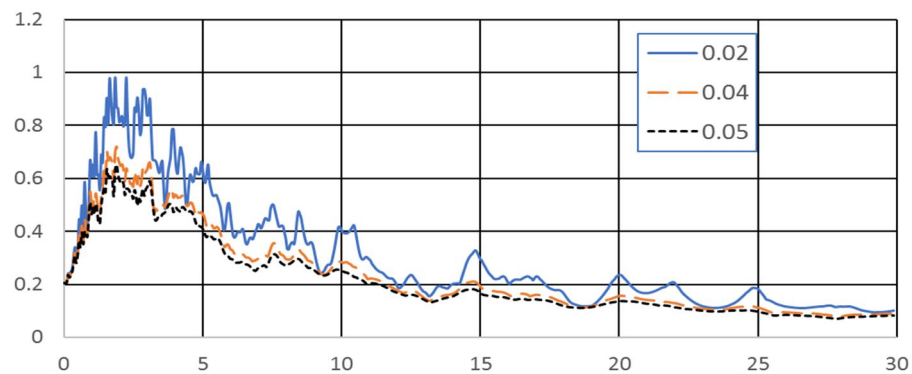
Ускорение Y, g



ω , Гц

б)

Ускорение Z, g

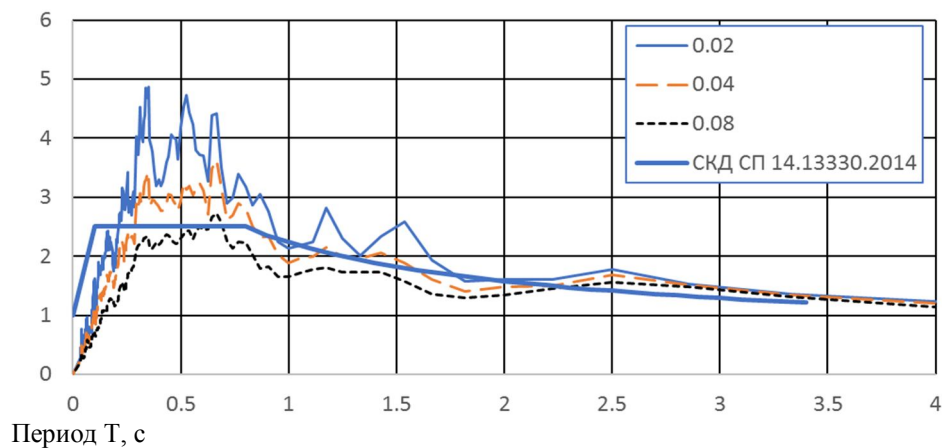


ω , Гц

в)

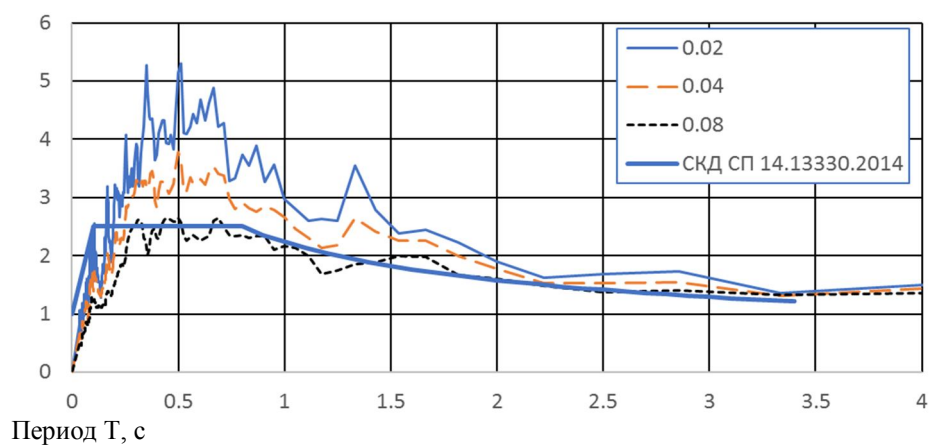
Рис. 14. ССО на частотной оси 3-х компонентной модельной синтезированной акселерограммы уровня МРЗ MSK-64 на скальном основании СП [5] при относительном затухании 2,4 и 5% (см. рис. 13): а, б, в – компоненты X, Y и Z

Компонента X



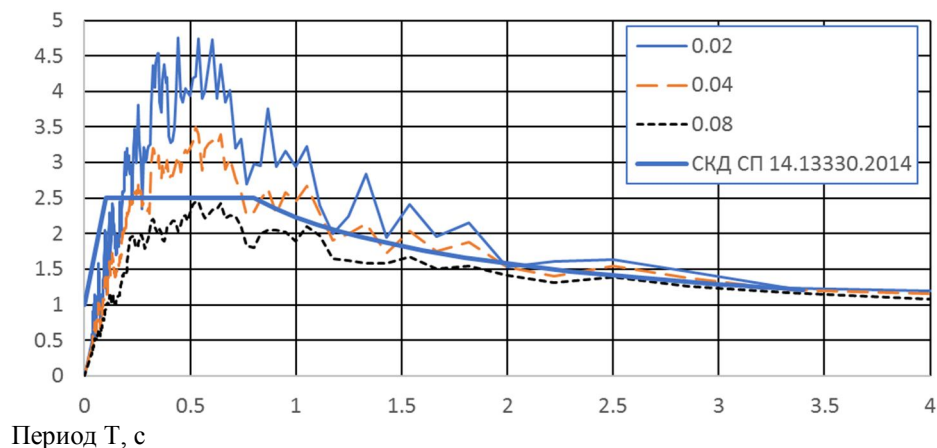
а)

Компонента Y



б)

Компонента Z



в)

Рис. 15. СКД модельной синтезированной акселерограммы уровня МРЗ MSK-64 на скальном основании при относительном затухании 2,4 и 8 % и СКД СП [5] на временной оси: а, б, в – компоненты X, Y и Z (см. рис. 14)

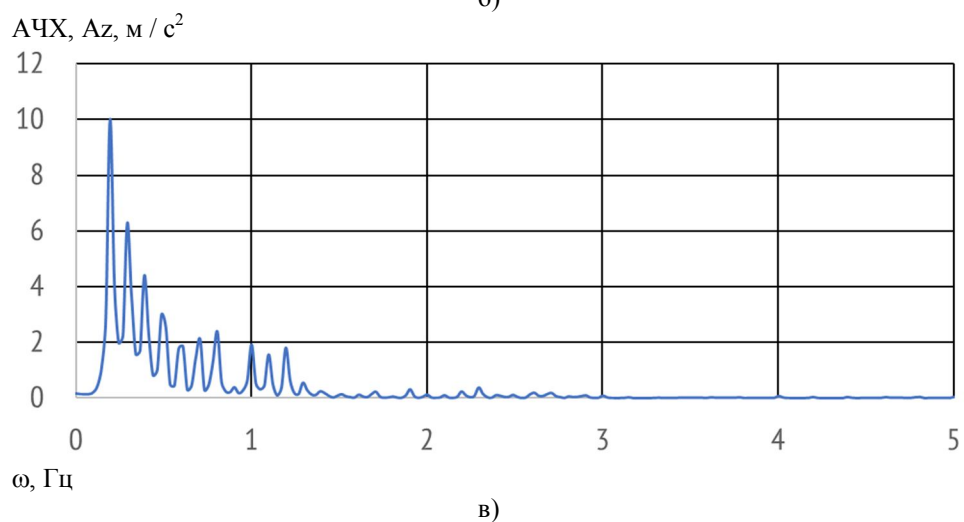
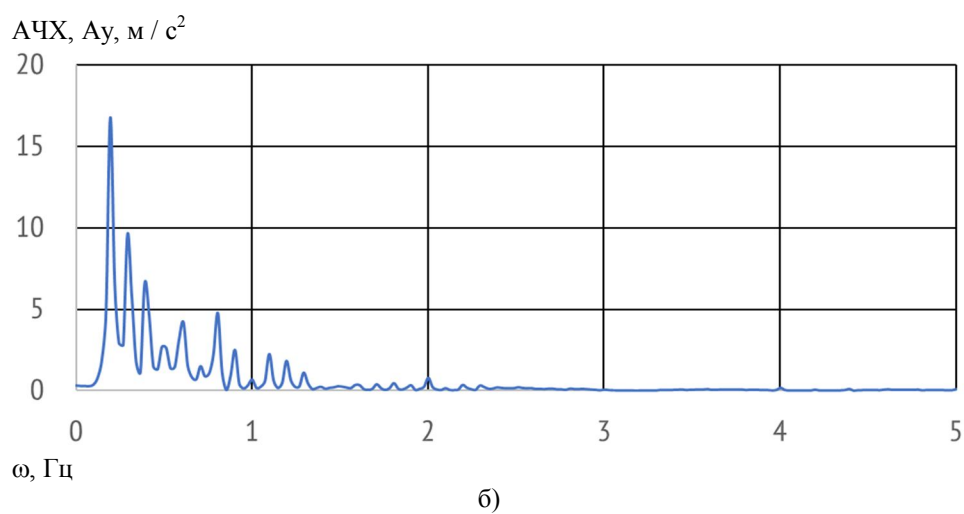
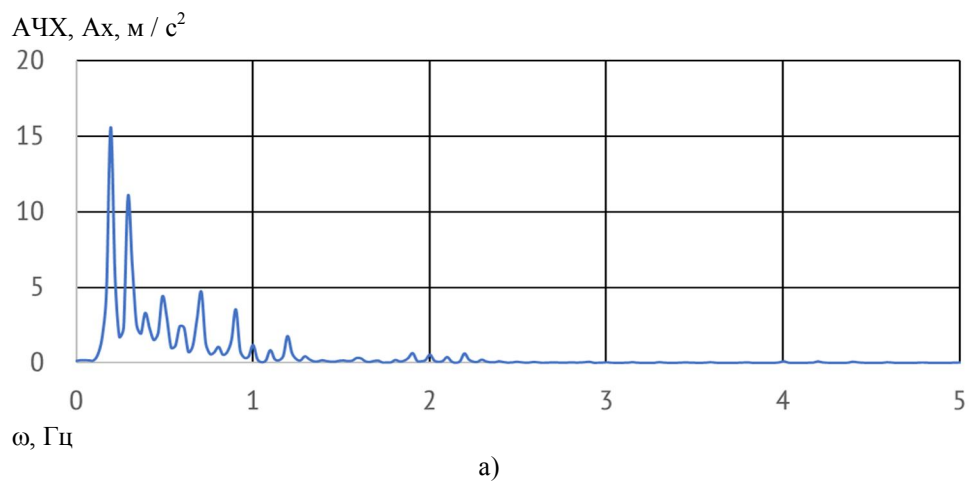


Рис. 16. АЧХ модельной синтезированной акселерограммы уровня МРЗ MSK-64 на скальном основании (см. рис. 13): а, б, в – компоненты X, Y и Z

Кроме значений пиковых ускорений (табл. 7), скоростей (табл. 8) и смещений (табл. 9) расчетных синтезированных 3-компонентных акселерограмм на рисунках 17–22 приведена соответственно графическая интерпретация на отметке + 240 м подошвы грунта (рис. 3):

- 3-компонентной акселерограммы МРЗ 7 баллов MSK-64;
- – её 3-компонентная сейсмограмма, в т.ч. её эффективная фаза 40 с;
- – далее, соответственно, ССО, СКД и АЧХ модельной акселерограммы 7 баллов MSK-64.

Таблица 7

Расчетные значения пиковых ускорений (PGA, в долях g)

Балл на поверхности	Компоненты	Поверхность	Уровень фундамента			Отметка +240 м
			зд. 1	зд. 4	зд. 2, 3	
7	x	0,096	0,086	0,062	0,055	0,043
	y	0,100	0,090	0,058	0,054	0,035
	z	0,074	0,070	0,043	0,036	0,028
7,2	x	0,113	0,102	0,070	0,062	0,052
	y	0,113	0,101	0,069	0,063	0,040
	z	0,087	0,082	0,048	0,042	0,033
7,4	x	0,133	0,120	0,077	0,067	0,060
	y	0,134	0,120	0,088	0,080	0,052
	z	0,100	0,094	0,054	0,049	0,038
7,6	x	0,153	0,139	0,084	0,077	0,065
	y	0,154	0,138	0,111	0,098	0,066
	z	0,111	0,104	0,060	0,053	0,044
7,8	x	0,172	0,157	0,094	0,093	0,070
	y	0,171	0,153	0,135	0,117	0,081
	z	0,121	0,113	0,067	0,058	0,050
8	x	0,200	0,186	0,124	0,121	0,077
	y	0,193	0,180	0,158	0,139	0,089
	z	0,140	0,131	0,078	0,065	0,063

Таблица 8

Расчетные значения пиковых скоростей (PGV, см / с)

Балл на поверхности	Компоненты	Поверхность	Уровень фундамента			Отметка +240 м
			зд. 1	зд. 4	зд. 2, 3	
7	x	10,02	9,62	7,46	7,14	5,20
	y	8,70	8,44	6,48	6,13	5,31
	z	7,13	6,95	5,35	4,96	3,66
7,2	x	11,78	11,32	9,05	8,48	6,25
	y	10,10	9,81	7,57	7,14	6,23
	z	8,54	8,34	6,39	5,93	4,25
7,4	x	13,39	12,93	10,57	9,76	7,44
	y	13,07	12,68	9,82	9,44	7,95
	z	10,21	9,95	7,62	7,07	5,00
7,6	x	15,04	14,60	11,91	10,79	8,73
	y	16,58	16,01	12,55	12,13	9,84
	z	11,57	11,24	8,65	8,01	5,82
7,8	x	17,18	16,71	13,04	12,19	9,89
	y	20,61	20,20	15,59	14,97	11,94
	z	12,91	12,56	9,63	8,90	6,67
8	x	20,72	20,26	15,55	15,00	11,57
	y	27,33	26,75	18,87	17,94	14,68
	z	15,59	15,14	11,44	10,48	8,39

Таблица 9

Расчетные значения пиковых смещений (PGD, см)

Балл на поверхности	Компоненты	Поверхность	Уровень фундамента			Отметка +240 м
			зд. 1	зд. 4	зд. 2, 3	
7	x	2,53	2,56	2,21	2,16	1,79
	y	1,94	1,92	1,68	1,74	1,62
	z	1,59	1,54	1,85	1,37	1,27
7,2	x	2,99	3,01	2,59	2,59	2,15
	y	2,38	2,26	1,98	2,45	1,94
	z	2,28	1,90	1,59	1,52	1,45
7,4	x	3,47	3,46	3,07	2,96	2,51
	y	3,02	2,96	2,62	2,61	2,51
	z	2,37	2,88	2,40	1,79	1,57
7,6	x	5,39	3,97	3,44	3,25	2,98
	y	6,66	4,48	3,26	3,33	3,14
	z	2,61	2,46	2,14	2,03	3,14
7,8	x	4,60	4,46	3,73	3,62	3,24
	y	4,92	4,90	4,16	4,10	3,94
	z	3,43	2,84	2,34	2,24	2,00
8	x	5,71	5,33	4,37	4,23	3,85
	y	6,39	6,34	5,25	5,12	4,87
	z	3,52	3,45	2,80	2,67	2,38

При необходимости, из 3-компонентной акселерограммы МРЗ 7 баллов MSK-64 можно получить СВ любой балльности с шагом 0,1 балла. С этой целью акселерограмма 7 баллов преобразуется в нормализованную акселерограмму единичного уровня. Временная реализация акселерограммы $A_m^{x,y,z}$ с шагом 0,1 балла определяется как функция нормализованной $A_n^{x,y}(t)$ (компоненты X, Y) и $A_n^z(t)$ (компонента Z) (14). После чего горизонтальные X, Y и вертикальная Z компоненты нормализованной акселерограммы $A_m^{x,y}(t)$ и $A_m^z(t)$ определяются по формулам:

$$A_m^{x,y}(t) = \frac{1}{1000} A_n^{x,y}(t) \cdot 10^{0,3b-0,1},$$

$$A_m^z(t) = \frac{1}{2} \frac{1}{1000} A_n^z(t) \cdot 10^{0,3b-0,1},$$
(14)

где $A_n^{x,y,z}(t)$ – нормализованная акселерограмма; b – балльность модифицированной акселерограммы; $A_m^{x,y,z}(t)$ – модифицированная акселерограмма.

Переходные коэффициенты от нормализованной к модифицированной акселерограммы балльностью от 7 до 8 баллов с шагом 0,1 приведены в таблице 10.

Таблица 10

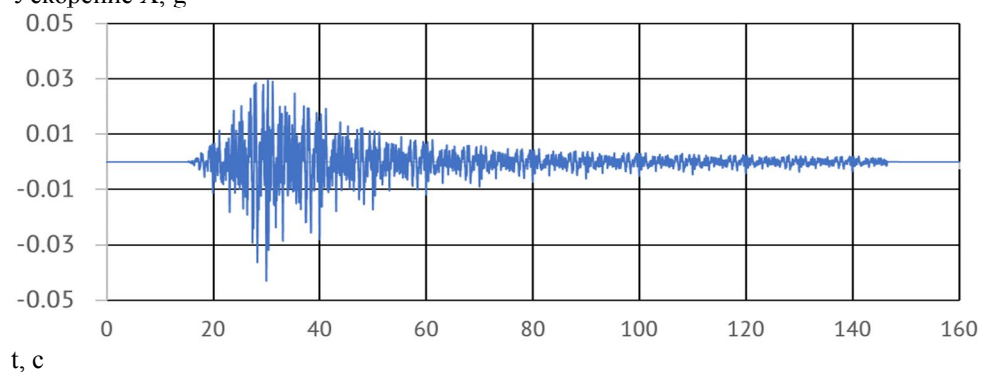
Переходные коэффициенты от нормализованной к модифицированной акселерограмме

Баллы модифицированной акселерограммы	Множитель нормализованной акселерограммы
7,0	0,10000
7,1	0,10715
7,2	0,11482
7,3	0,12303
7,4	0,13183
7,5	0,14125

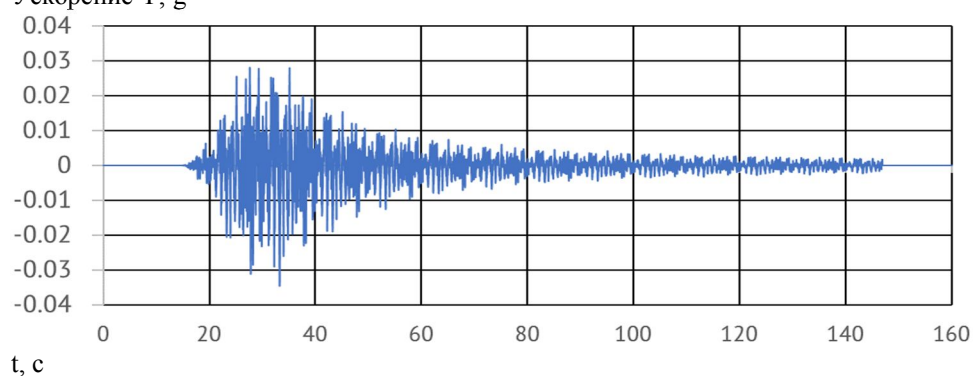
Баллы модифицированной акселерограммы	Множитель нормализованной акселерограммы
7,6	0,15136
7,7	0,16218
7,8	0,17378
7,9	0,18621
8,0	0,19953

Примечание: компонента Z дополнительно умножается на коэффициент 0,5.

Ускорение X, g



Ускорение Y, g



Ускорение Z, g

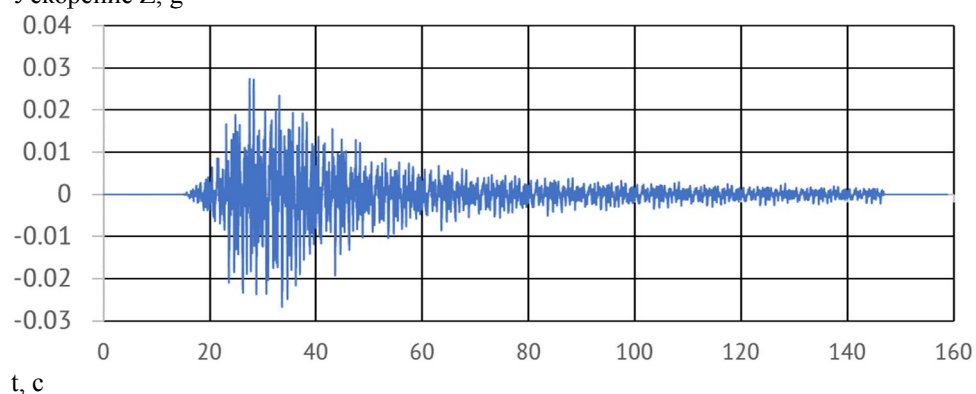
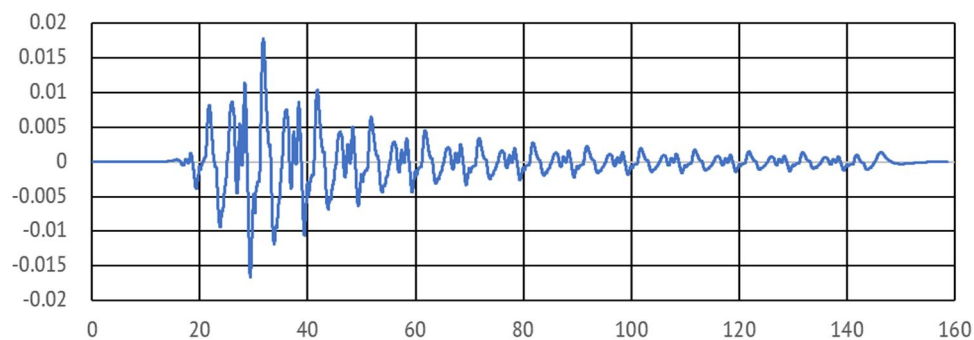


Рис. 17. Модельная исходная 3-х компонентная акселерограмма МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отм. +240 м подошвы грунта: а, б, в – компоненты X, Y и Z

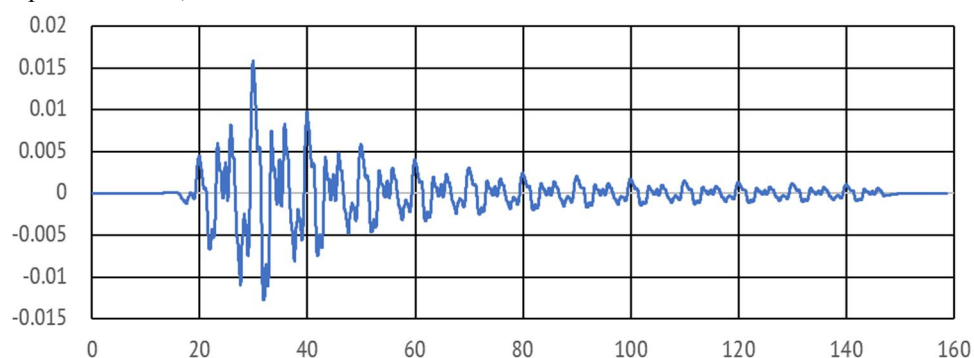
Перемещение X, м



t, c

а)

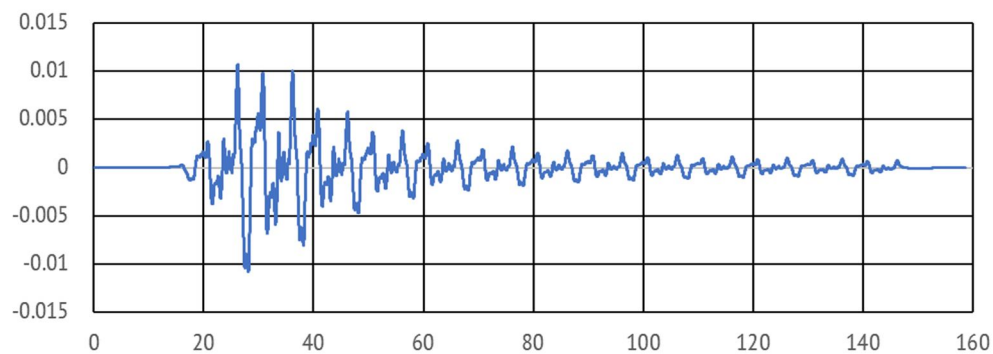
Перемещение Y, м



t, c

б)

Перемещение Z, м

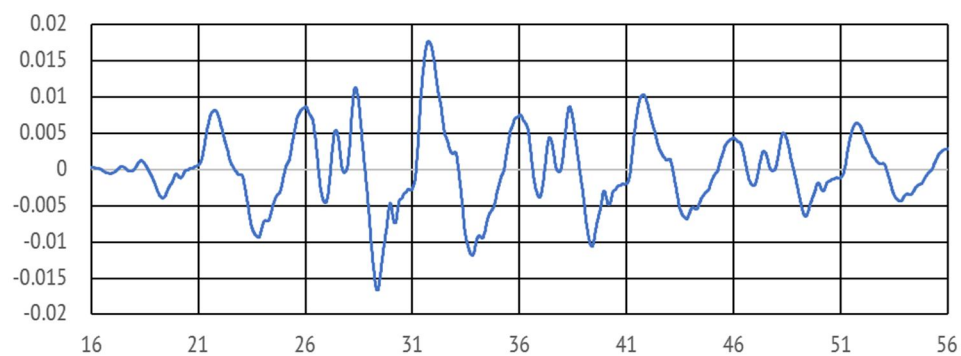


t, c

в)

Рис. 18. Модельная исходная 3-компонентная сейсмограмма МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отг. +240 м: а, б, в – компоненты X, Y и Z

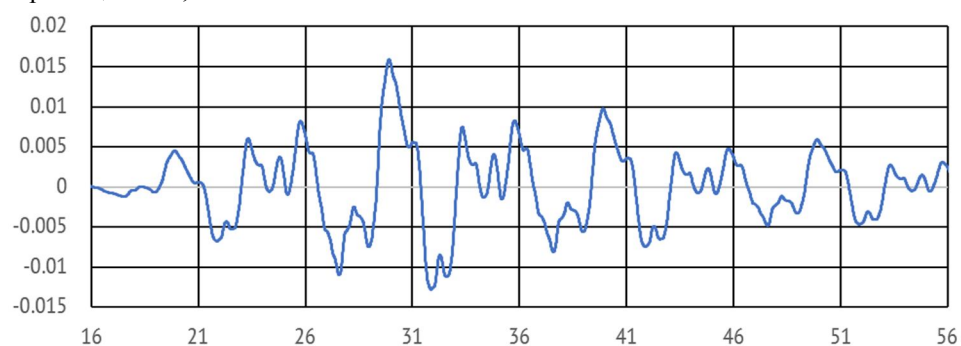
Перемещение X, м



t, c

a)

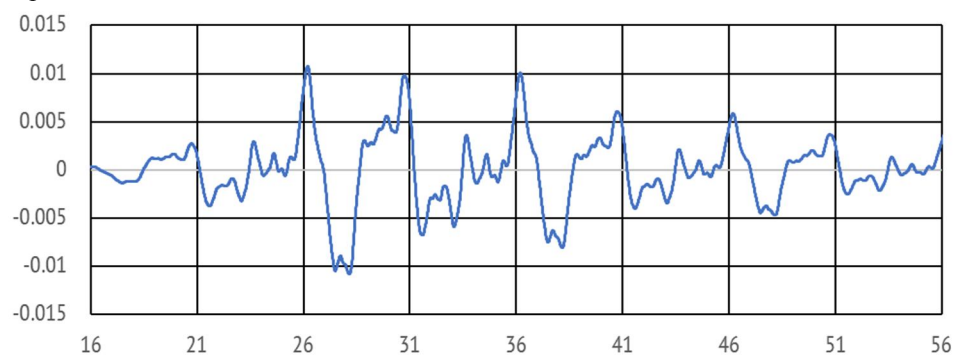
Перемещение Y, м



t, c

б)

Перемещение Z, м

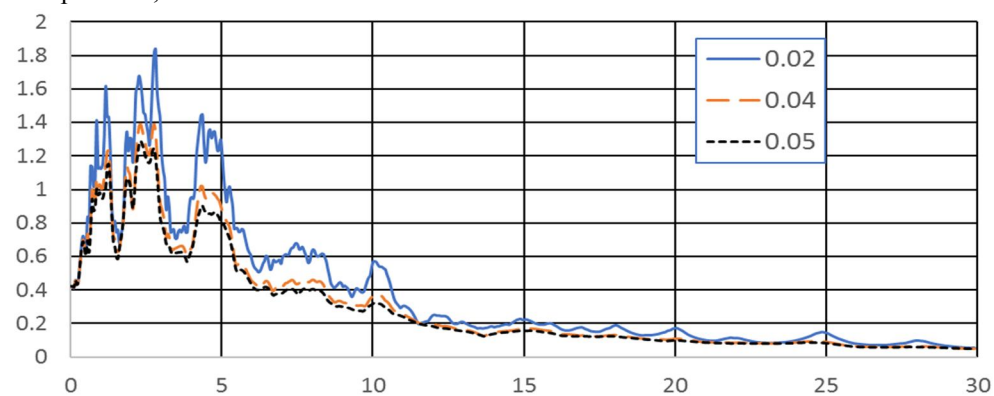


t, c

в)

Рис. 19. Эффективная фаза модельной исходной 3-х компонентной сейсмограммы МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отм. +240 м:
 а, б, в – компоненты X, Y и Z

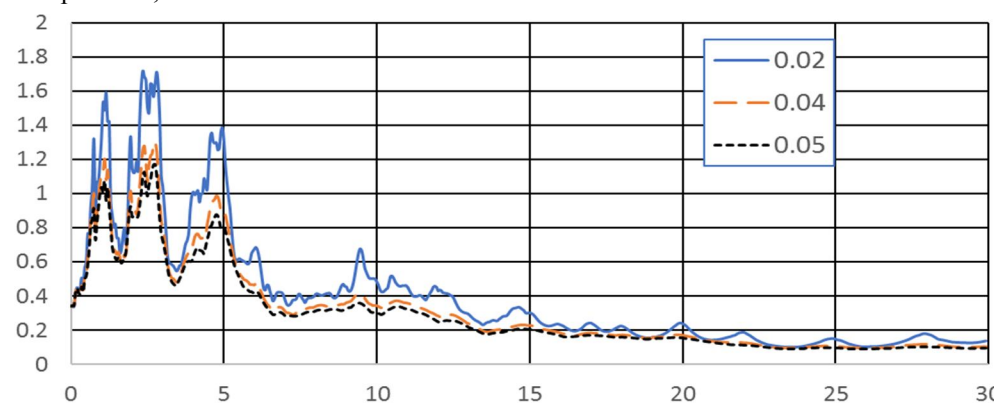
Ускорение X, $\text{м} / \text{с}^2$



Частота ω , Гц

а)

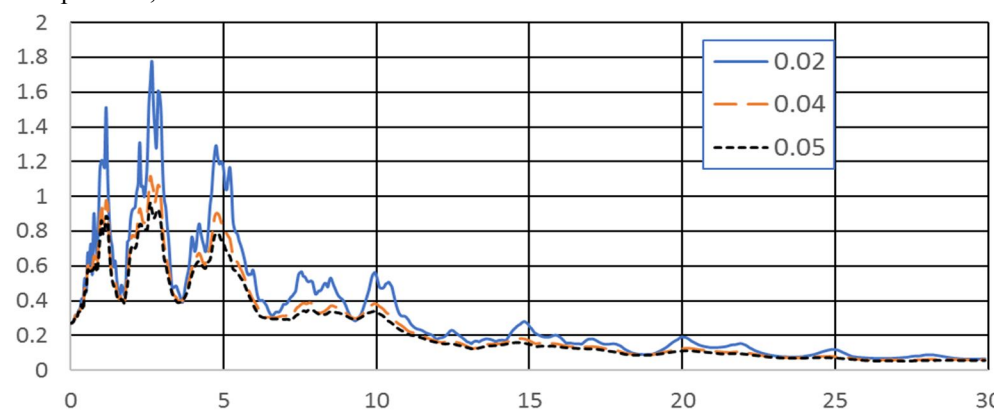
Ускорение Y, $\text{м} / \text{с}^2$



Частота ω , Гц

б)

Ускорение Z, $\text{м} / \text{с}^2$

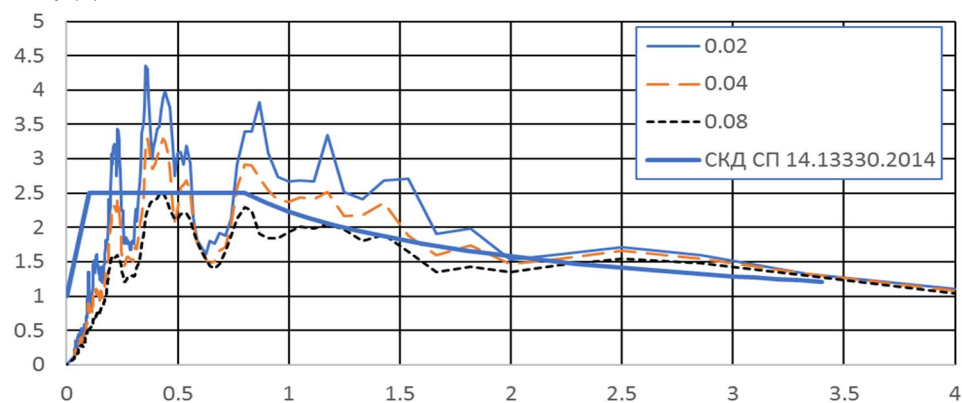


Частота ω , Гц

в)

Рис. 20. ССО модельной исходной 3-х компонентной акселерограммы МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отм. +240 м на частотной оси:
а, б, в – компоненты X, Y и Z

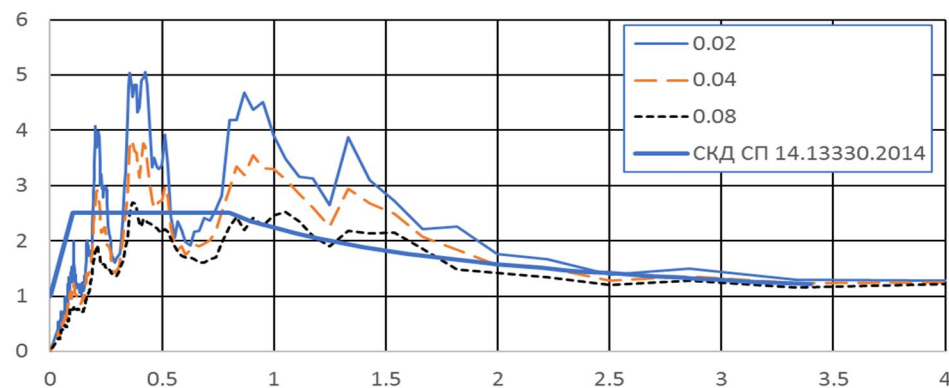
СКД $\beta(T)$, X



Период T, с

а)

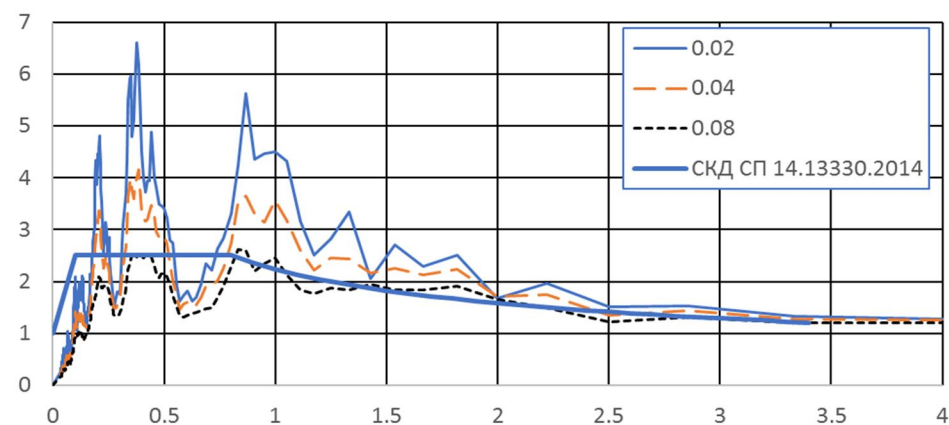
СКД $\beta(T)$, Y



Период T, с

б)

СКД $\beta(T)$, Z

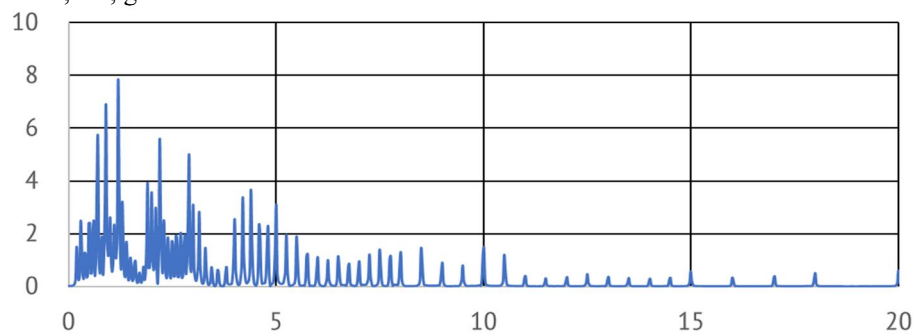


Период T, с

в)

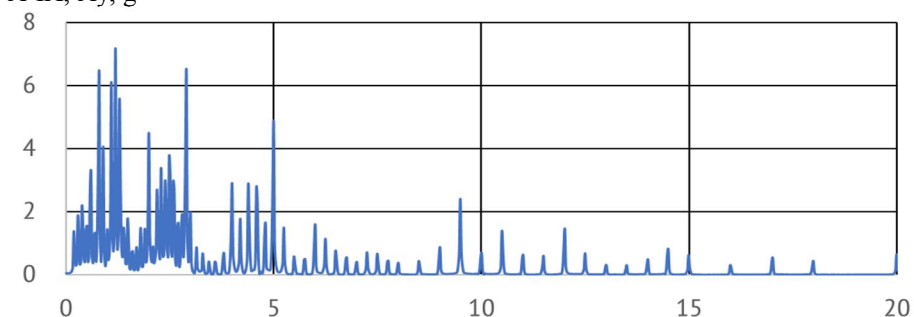
Рис. 21. СКД модельной исходной 3-х компонентной акселерограммы МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отм. +240 м на временной оси:
 а, б, в – компоненты X, Y и Z

АЧХ, Ах, g

Частота ω , Гц

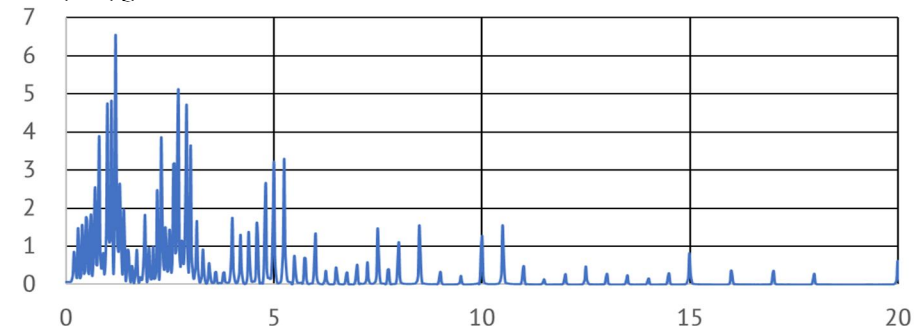
а)

АЧХ, Ау, g

Частота ω , Гц

б)

АЧХ, Аз, g

Частота ω , Гц

в)

Рис. 22. АЧХ синтезированной акселерограммы МРЗ 7 баллов MSK-64 на грунтах II категории на отм. + 240 м на частотной оси: а, б, в – компоненты X, Y и Z

Заключение

1. По статистическим данным, в мире ежегодно происходит более 300 тыс. землетрясений, в том числе 10-бальных – 3, 9-бальных – 11, 8-бальных – 80, 7-бальных – 400, 6-бальных – 1300. В СНГ к сейсмически активной относится 28 % территории и ежегодно регистрируется до 75 землетрясений, причем в среднем раз в три года происходит одно разрушительное землетрясение. При этом 7-бальные районы составляют 58,15 % этой площади, 8-бальные – 27,9 %, 9-бальные – 13,9 %. При классификации грунтов по сей-

смическим свойствам в соответствии с таблицей 1 главы 4 СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» [4, 5] грунты I категории занимают 8 %, II категории – 75 %, III категории – 17 % общей площади районов с сейсмической активностью 7–9 баллов [40].

2. Авторы учитывали, что проблема сейсмостойкости сооружений, в том числе зданий с крановыми нагрузками и технологическим оборудованием, еще носит на себе отпечаток новизны и ограниченности научной информации. Она способна обеспечить проектировщиков зданий, оборудованных грузоподъемными кранами, и приравняемого к ним по назначению оборудования платформ, манипуляторов, подъемников и других базовых знаний в области методов расчетного анализа. Он основан на принципах теории сейсмостойкости, как того требуют основополагающие нормы и правила, касающиеся сейсмической безопасности технологического оборудования.

3. Предложен опыт авторов по сейсмическому микрорайонированию площадок строительства ответственных объектов, основанный на методике построения карт ОСР-97 А, В, С и Д. В частности, для практических целей в цифровом виде получены волновые формы расчетных акселерограмм, виброграмм и сейсмограмм для зданий ОИАЭ г. Железнодорожска при сейсмических воздействиях от 7 до 8 баллов МРЗ MSK-64.

Список литературы

1. Гусев А. А. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования / А. А. Гусев, Л. С. Шумилина // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / под ред. В. И. Уломова. – Москва : ОИФЗ РАН, 1995. – Вып. 2–3. – С. 289–300.
2. Уломов В. И. Актуализация нормативного сейсмического районирования с составе Единой информационной системы «Сейсмобезопасность России» / В. И. Уломов // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – Т. 39, № 1. – С. 5–38.
3. Уломов В. И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОР-2012 / В. И. Уломов // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 5–20.
4. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. – Утверждены Постановлением Госстроя СССР от 15 июня 1981 № 94. – Москва : Госстрой РФ, 2000. – 69 с.
5. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 18 февраля 2014 г. № 60/пр. – Москва : Минрегионразвития, 2014. – 125 с.
6. Перетокин С. А. Использование программно-алгоритмического аппарата методики ОСР-97 в задачах детального сейсмического районирования / С. А. Перетокин / Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 1. – С. 61–64.
7. НП 031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – Утверждены Постановлением ГАН РФ от 19.10.2001 № 9. – Москва : Госатомнадзор РФ, 2001. – 28 с.
8. РБ 006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. – Утверждены Постановлением ГАН РФ от 29.12.1998 № 3. – Москва : Госатомнадзор РФ, 1998. – 41 с.
9. РБ 019-2001. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов на основании геодинамических данных. – Утверждены Постановлением ГАН РФ от 28.12.2001 № 16. – Москва : Госатомнадзор РФ, 2001. – 21 с.
10. Гусев А. А. Новый подход к расчетам повторяемости сейсмического воздействия с целью построения карт сейсмического районирования / А. А. Гусев, В. М. Павлов, Л. С. Шумилина // Современная сейсмология: достижения и проблемы : мат-лы науч. конф. РФФИ, НГК РФ, НС РАН по проблемам международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий, г. Москва, 7–9 октября 1998 г. – Москва, 1998. – 26 с.
11. Бодякин Е. В. Разработка элементов автоматизации сейсмического микрорайонирования с использованием ГИС технологии / Е. В. Бодякин // Молодой ученый. – 2015. – № 11 (91). – С. 15–18.
12. Симонов К. В. Мониторинг геодинамической опасности территории крупных ГЭС / К. В. Симонов, А. А. Кабанов, А. А. Бурцев, А. В. Денисенко // Информация и связь. – 2013. – № 2. – С. 104–106.

13. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территории городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / В. Б. Заалишвили ; отв. ред. А. В. Николаев // Центр геофизических исследований Владикавказского НЦ РАН. – Москва: Наука, 2009. – 350 с.
14. Руководство по безопасности № NS-G-3.6. Геотехнические аспекты оценки площадок и оснований АЭС. – Вена : МАГАТЭ, 2005. – 67 с.
15. Проведение комплексных инженерно-сейсмологических работ на площадке здания № 1 ХОЯТ ГХК : в 4 т. // Арх. № 5794 от 18.08.2006. – Москва : ИГЭ РАН, 2006. – Том 4: Сейсмическое районирование и разработка синтезированных акселерограмм с учетом характеристик грунтов в основании здания № 1 ХОЯТ. – 103 с.
16. Перетокин С. А. Инженерно-сейсмологические изыскания в рамках объекта «Создание опытно-демонстрационного центра по переработке отработавшего ядерного топлива на основе инновационных технологий федерального государственного унитарного предприятия «Горнохимический комбинат»» / С. А. Перетокин. – Красноярск : ЭЦ РОПР, 2016. – 217 с.
17. Бондарев В. И. Основы сейсморазведки / В. И. Бондарев. – Екатеринбург : УГГТА, 2003. – 332 с.
18. Гусев А. А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. Ч. 1 / А. А. Гусев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 10. – С. 20–29.
19. Гусев А. А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. Ч. 2 / А. А. Гусев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 66–77.
20. Уломов В. И. О программно-математическом обеспечении построения карт вероятностного сейсмического районирования по методологии ОСР-97 / В. И. Уломов // Геофизические исследования : сб. науч. тр. института физики Земли РАН. – Москва : ИФЗ РАН, 2007. – Вып. 7. – С. 29–52.
21. Уломов В. И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000 / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина // Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. – Москва : ОИФЗ, 1999. – 57 с.
22. Уломов В. И. Проблемы сейсмического районирования территории России / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина. – Москва : ВНИИГТИП Госстроя России, 1999. – 56 с.
23. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах / под ред. В. Н. Страхова, В. И. Уломов. – Москва : Текарт, 2000.
24. Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев. – Москва : Наука и образование, 2012. – 176 с.
25. Перетокин С. А. Некоторые аспекты вероятностной оценки сейсмической опасности с использованием эмпирических зависимостей / С. А. Перетокин // Инженерные изыскания. – 2016. – № 7. – С. 39–47.
26. Уломов В. И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений / В. И. Уломов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – № 4. – С. 60–68.
27. Хафизов Р. Р. Расчетные сейсмические воздействия на ОИАЭ г. Железногорска / Р. Р. Хафизов, С. А. Перетокин, Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков, П. В. Яковлев // Транспортные системы Сибири : сб. науч. трудов Межд. научно-практ. конф., 7–8 апреля 2016 г., г. Красноярск : в 2 ч. – Красноярск : Сиб. фед. ун-т, 2016. – Ч. 1. – С. 300–312.
28. Мацеля В. И. Вероятностно-статическая модель расчетного сейсмического воздействия на ОИАЭ г. Железногорска / В. И. Мацеля, И. Н. Сеелев, Е. С. Скурыдина, Р. Р. Хафизов, Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков, П. В. Яковлев // Механика XXI века : матер. XV науч.-техн. конф. – Братск : БрГУ, 2016. – № 15. – С. 263–277.
29. МР 1.5.2.05.999.0025-2011. Расчет и проектирование сейсмостойких атомных станций : методические рекомендации. – Москва : Концерн Росэнергоатом, 2011. – 92 с.
30. ИСО 6258-85. Атомные электростанции. Антисейсмическое проектирование. – Вена : Рег. № МАГАТЭ ИСО 6258-85. – 61 с.
31. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – Утверждены Постановлением Госатомнадзора России от 19.10.2001 № 9. – Москва : Госатомнадзор РФ, 2002. – 27 с.
32. НП-032-01. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. – Утверждены Постановлением Госатомнадзора России от 8.11.2001 № 10. – Москва : Госатомнадзор РФ, 2002. – 9 с.
33. Калиберда И. В. Некоторые итоги обеспечения сейсмостойкости АЭС в России / И. В. Калиберда, Е. Г. Бугаев, В. Г. Бедняков, И. М. Лавров, Л. М. Фихиева // Вестник Госатомнадзора России. – 2004. – № 2. – С. 7–15.

34. РТМ 108.020.37-81. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии. – Утвержден указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.06.81 № ЮК-002/4365. – Санкт-Петербург : Минэнергомаш, НПО ЦКТИ, 1981. – 37 с.
35. РД 24.090.83-87. Нормы расчета пространственных металлоконструкций грузоподъемных кранов атомных станций на эксплуатационные и сейсмические воздействия. – Утвержден указанием Министерства тяжелого и транспортного машиностроения от 27.03.1990 № В А-002-1-3279. – Москва : Минтяжмаш, 1988. – 264 с.
36. Idriss I. M. SHAKE 91 – A computer program for conduction equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soils / I. M. Idriss, J. I. Sun // CGM research report. – UC Davis, 1992.
37. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992–1999 // Ann. di Geofis. – 1999. – Vol. 42, № 6. – P. 955–1230.
38. Boore D. M. SMSIM – Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: version 2.0 – A Revision of OFR 96-80-A.U.S. Geological Survey Open-File Rep., 00-509, 2000. – Режим доступа: <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-fe/of00-509>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
39. Хашащ Ю. М. А. DEEPSOIL 6.1, Руководство пользователя / Ю. М. А. Хашащ, М. И. Масгроув, Дж. А. Хармон, Д. Р. Гроховски, К. А. Филиппс, Д. Парк // Нелинейный и эквивалентный линейный анализ отклика грунта в одномерных грунтовых колонках. – Режим доступа: www.illinois.edu/~deepsoil, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
40. Ставицкер Л. Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов : монография / Л. Р. Ставицкер. – Москва : Ассоциация строительных вузов, 2010. – 448 с.

References

1. Gusev A. A., Shumilina L. S. Nekotorye voprosy metodiki obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya [Some questions of the technique of general seismic zoning]. *Seysmichnost i seysmicheskoe rayonirovanie Severnoy Yevrazii* [Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia], Moscow, Joint Institute of Earth Physics named O.Yu. Shmidt, Russian Academy of Sciences Publ. House, 1995, issue 2–3, pp. 289–300.
2. Ulomov V. I. Aktualizatsiya normativnogo seysmicheskogo rayonirovaniya s sostave Yedino informatsionnoy sistemy «Seysmbezopasnost Rossii» [Actualization of normative seismic zoning with the composition of the Unified Information System "Seismic safety of Russia"]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii* [Problems of Engineering Seismology], 2012, vol. 39, no. 1, pp. 5–38.
3. Ulomov V. I. Obshchee seysmicheskoe rayonirovanie territorii Rossiyskoy Federatsii – OR-2012 [General seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OR-2012]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii* [Problems of Engineering Seismology], 2013, vol. 49, no. 4, pp. 5–20.
4. SNIP II-7-81 *. Construction in seismic regions. Approved by the Decree of the USSR State Committee on Construction of June 15, 1981 no. 94. Moscow, State Building of the Russian Federation Publ. House, 2000. 69 p.
5. SP 14.13330.2014. Construction in seismic regions. Actualized edition of SNiP II-7-81 *. Approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 18, 2014 no. 60 / pr. Moscow, Ministry of Regional Development of the Russian Federation Publ. House, 2014. 125 p.
6. Peretokin S. A. Ispolzovanie programmno-algoritmicheskogo apparata metodiki OSR-97 v zadachakh detalnogo seysmicheskogo rayonirovaniya [Use of the program-algorithmic algorithm of the OSR-97 technique in the tasks of detailed seismic zoning]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* [Geology and Geophysics of the South of Russia], 2015, no. 1, pp. 61–64.
7. IR 031-01. The design standards of earthquake-resistant nuclear power plants. Approved by the Resolution of the GAN of the Russian Federation of October 10, 2001 no. 9. Moscow, State Nuclear Supervision of the Russian Federation Publ. House, 2001. 28 p.
8. RB 006-98. Determination of initial seismic ground motions for design bases. Approved by the Resolution of the GAN of the Russian Federation of 29.12.1998 no. 3. Moscow, State Nuclear Supervision of the Russian Federation Publ. House, 1998. 41p.
9. RB 019-2001. Estimation of seismic hazard of the sites of location of nuclear and radiation-hazardous objects on the basis of geodynamic data. Approved by the Resolution of the GAN of the Russian Federation No. 16 of December 28, 2001. Moscow, State Nuclear Supervision of the Russian Federation Publ. House, 2001. 21 p.
10. Gusev A. A., Pavlov V. M., Shumilina L. S. Novyy podkhod k raschetam povtoryaemosti seysmicheskogo vozdeystviya s tselyu postroeniya kart seysmicheskogo rayonirovaniya [A new approach to calculating the repeatability of seismic effects for the purpose of constructing seismic zoning maps]. *Sovremennaya seysmologiya: dostizheniya i problemy : materialy nauchnoy konferentsii RFFI, NGK*

RF, NS RAN po problemam mezhdunarodnogo desyatiletiya po umensheniyu opasnosti stikhiynykh bedstviy, g. Moskva, 7–9 oktyabrya 1998 g. [Modern Seismology: Achievements and Problems. Proceedings of the Scientific Conference of the RFBR, NGK RF, NS RAS on the Problems of the International Decade for Natural Disaster Reduction, Moscow, 7–9 October 1998], Moscow, 1998. 26 p.

11. Bodyakin Ye. V. Razrabotka elementov avtomatizatsii seismicheskogo mikrorayonirovaniya s ispolzovaniem GIS tekhnologii [Development of elements of automation of seismic microzoning using GIS technology]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 11 (91), pp. 15–18.

12. Simonov K. V., Kabanov A. A., Burtsev A. A., Denisenko A. V. Monitoring geodinamicheskoy opasnosti territorii krupnykh GES [Monitoring of the geodynamic hazard of large hydropower plants]. *Informatsiya i svyaz* [Information and Communication], 2013, no. 2, pp. 104–106.

13. Zaalishvili V. B. Seismicheskoe mikrorayonirovanie territorii gorodov, naselennykh punktov i bolshikh stroitelnykh ploshchadok [Seismic microzoning of the territory of cities, populated areas and large construction sites]. *Tsentr geofizicheskikh issledovaniy Vladikavkazskogo NTs RAN* [Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], Moscow, Nauka Publ., 2009. 350 p.

14. *Rukovodstvo po bezopasnosti № NS-G-3.6. Geotekhnicheskie aspekty otsenki ploshchadok i osnovaniy AES* [Safety Guide no. NS-G-3.6. Geotechnical aspects of site evaluation and NPP grounds], Vienna, International Atomic Energy Agency House, 2005. 67 p.

15. Provedenie kompleksnykh inzhenerno-seismologicheskikh rabot na ploshchadke zdaniya № 1 KhOYaT GKKhK [Carrying out complex engineering seismological works on the site of the building No. 1 ISFSF GKKhK]. *Arkhn. № 5794 ot 18.08.2006* [Archive no. 5794 from 08.18.2006], Moscow, Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, 2006, volume 4: Seismic Zoning and Development of Synthesized Accelerograms Taking into Account the Characteristics of the Soils at the Base of building no. 1 IS. 103 p.

16. Peretokin S. A. *Inzhenerno-seismologicheskie izyskaniya v ramkakh obekta «Sozdanie opytno-demonstratsionnogo tsentra po pererabotke otrabotavshogo yadernogo topliva na osnove innovatsionnykh tekhnologiy federalnogo gosudarstvennogo unitarnogo predpriyatiya «Gorno-khimicheskii kombinat»* [Engineering seismological surveys within the framework of the project "Establishment of an experimental demonstration center for reprocessing spent nuclear fuel on the basis of innovative technologies of the federal state unitary enterprise "Mining and Chemical Combine"], Krasnoyarsk, Ecological center OF Rational Development OF Natural Resources Publishing House, 2016. 217 p.

17. Bondarev V. I. *Osnovy seysmorazvedki* [Basics of seismic exploration], Ekaterinburg, Ukhta State Technical University Publ. House, 2003. 332 p.

18. Gusev A. A. O printsipakh kartirovaniya seysmoopasnykh regionov Rossiyskoy Federatsii i normirovaniya seismicheskikh nagruzok v terminakh seismicheskikh uskoreniy. Ch. 1 [On the principles of mapping seismically dangerous regions of the Russian Federation and the normalization of seismic loads in terms of seismic accelerations. Part 1]. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Surveys], 2011, no. 10, pp. 20–29.

19. Gusev A. A. O printsipakh kartirovaniya seysmoopasnykh regionov Rossiyskoy Federatsii i normirovaniya seismicheskikh nagruzok v terminakh seismicheskikh uskoreniy. Ch. 2 [On the principles of mapping seismically dangerous regions of the Russian Federation and the normalization of seismic loads in terms of seismic accelerations. In 2 parts. Part 2]. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Surveys], 2011, no. 11, pp. 66–77.

20. Ulomov V. I. O programmno-matematicheskoy obespechenii postroeniya kart veroyatnostnogo seismicheskogo rayonirovaniya po metodologii OSR-97 [On software and mathematical support for the construction of maps of probabilistic seismic zoning according to OSR-97 methodology]. *Geofizicheskie issledovaniya: sb. nauch. tr. instituta fiziki Zemli RAN* [Geophysical Researches. Proceedings of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences], Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences Publ. House, 2007, issue 7, pp. 29–52.

21. Ulomov V. I., Shumilina L. S. Komplekt kart obshchego seismicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8000000 [A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OSR-97. Scale 1: 8000000]. *Obyasnitelnaya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seysmoopasnykh rayonakh* [Explanatory Note and a List of Cities and Populated Areas Located in Seismically Dangerous Areas], Moscow, Joint Institute of Earth Physics named O.Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences Publ. House, 1999. 57 p.

22. Ulomov V. I., Shumilina L. S. Problemy seismicheskogo rayonirovaniya territorii Rossii [Problems of seismic zoning of the territory of Russia], Moscow, All-Russian State Scientific Research Institute of the Problems of Scientific and Technical Progress and Information in Construction of the State Structure of Russia Publ. House, 1999. 56 p.

23. Strakhova V. N., Ulomova V. I. (ed.) *Seysmicheskoe rayonirovanie territorii Rossiyskoy Federatsii – OSR-97. Karta na 4-kh listakh* [Seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OCP-97. Card on 4 sheets], Moscow, Tekart, Publ. 2000.
24. Aptikaev F. F. *Instrumentalnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti* [Instrumental scale of seismic intensity], Moscow, Nauka i obrazovanie Publ., 2012. 176 p.
25. Peretokin S. A. Nekotorye aspekty veroyatnostnoy otsenki seysmicheskoy opasnosti s ispolzovaniem empiricheskikh zavisimostey [Some Aspects of Probabilistic Estimation of Seismic Hazards Using Empirical Dependencies]. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Surveys], 2016, no. 7, pp. 39–47.
26. Ulomov V. I. Veroyatnostno-determinirovannaya otsenka seysmicheskikh vozdeystviy na osnove kart OSR-97 i stsennarnykh zemletryaseniy [Probabilistic and deterministic estimation of seismic impacts on the basis of OCP-97 maps and scenario earthquakes]. *Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Seismic Construction. Safety of Buildings], 2005, no. 4, pp. 60–68.
27. Khafizov R. R., Peretokin S. A., N.N. Panasenko, Sinelshchikov A. V., Yakovlev P. V. Raschetnye seysmicheskie vozdeystviya na OIAE g. Zheleznogorska [Estimated seismic effects on the OIAE in Zheleznogorsk]. *Transportnye sistemy Sibiri : sb. nauch. trudov Mezhd. nauchno-prakt. konf., 7–8 aprelya 2016 g., g. Krasnoyarsk* [Transportation Systems of Siberia. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 7–8, 2016, Krasnoyarsk], Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ. House, 2016, part 1, pp. 300–312.
28. Matselya V. I., Seelev I. N., Skurydina Ye. S., Khafizov R. R., Panasenko N. N., Sinelshchikov A. V., Yakovlev P. V. Veroyatnostno-staticheskaya model raschetnogo seysmicheskogo vozdeystviya na OIAE g. Zheleznogorska [Probabilistic and static model of the calculated seismic effect on the OIAE in Zheleznogorsk]. *Mekhanika XXI veku : mater. XV nauch.-tekhn. konf.* [Mechanics of the XXI century. Proceedings of the XV Scientific and Technical Conference], 2016, Bratsk, Bratsk State University Publ. House, no. 15, pp. 263–277.
29. MR 1.5.2.05.999.0025-2011. Calculation and design of earthquake resistant nuclear power plants: Methodological recommendations. Moscow, Contsern Rosenergoatom Publ., 2011. 92 p.
30. ISO 6258-85. Nuclear power plants. Anti-seismic design. Vienna. Reg. no. IAEA ISO 6258-85 Publ. 61 p.
31. NP-031-01. The design standards of earthquake-resistant nuclear power plants. Approved by the Resolution of Gosatomnadzor of Russia of October 10, 2001 no. 9. Moscow, State Nuclear Supervision of the Russian Federation Publ. House, 2002. 27 p.
32. NP-032-01. Placement of nuclear power plants. The main criteria and requirements for security. Approved by Resolution of Gosatomnadzor of Russia of November 8, 2001 no. 10. Moscow, State Nuclear Supervision of the Russian Federation Publ. House, 2002. 9 p.
33. Kaliberda I. V., Bugaev Ye. G., Bednyakov V. G., Lavrov I. M., Fikhieva L. M. Nekotorye itogi obespecheniya seysmostoykosti AES v Rossii [Some results of ensuring the seismic stability of nuclear power plants in Russia]. *Vestnik Gosa-tomnadzora Rossii* [Bulletin of State Nuclear Supervision of Russia], 2004, no. 2, pp. 7–15.
34. RTM 108.020.37-81. Equipment of nuclear power installations. Calculation of strength under seismic action. Approved by Directive of the Ministry of Energy Engineering from 04.06.81 no. YuK-002/4365. Saint Petersburg, Ministry of Energy Mechanical Engineering of the USSR Publ. House, Research and Production Association for the Study and Design of Energy Equipment named I.I. Polzunov Publ. House, 1981. 37 p.
35. RD 24.090.83-87. Norms for calculating the spatial metal structures of cranes of nuclear power plants for operational and seismic impacts. Approved by the order of the Ministry of Heavy and Transport Engineering dated March 27, 1990 no. B A-002-1-3279. Moscow, Ministry of Heavy Machine Building, 1988. 264 p.
36. Idriss I. M., Sun J. I. SHAKE 91 – A computer program for conduction of an equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soils. *CGM research report*, UC Davis, 1992.
37. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992–1999. *Ann. di Geofis.*, 1999, vol.42, no. 6, pp. 955–1230.
38. Boore D. M. *SMSIM – Fortran Programs for Simulating Ground: – Version 2.0 – A Revision of OFR 96-80-A.U.S. Geological Survey Open-File Rep., 00-509, 2000*. Available at: <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-fe/of-00-509>.
39. Khashash Yu. M. A., Masgrove M. I., Harmon J. A., Grohowski D. R., Phillips K. A., Park D. DEEPSOIL 6.1, Rukovodstvo polzovatelya [DEEPSOIL 6.1, User's Manual]. *Nelineyny i ekvivalentny lineyny analiz otklika grunta v odnomernykh gruntovykh kolonkakh* [Nonlinear and equivalent linear analysis of soil response in one-dimensional soil columns]. Available at: www.illinois.edu/~deepsoil.
40. Stavnitser L. R. *Seysmostoykost osnovaniy i fundamentov* [Seismic stability of foundations and foundations], Moscow, Association of Construction Universities Publishing House, 2010. 448 p.