

СТРОИТЕЛЬСТВО

МРНТИ 67.03.03, 67.11.59

В.А. Лапин¹, С.Е. Ержанов¹, А.А. Девярых¹, Е.С. Алдахов¹

¹Казахский научно-исследовательский и проектный институт строительства и архитектуры, г. Алматы, Казахстан

ДИНАМИКА 25-ТИ ЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ В г. АЛМАТЫ 26 МАРТА 2018 г.

Аннотация. Анализируется поведение 25-ти этажного здания гостиницы «Казахстан» при землетрясении 26 марта 2018 г. Очаг землетрясения наблюдался недалеко от г. Капшагай. На здании гостиницы установлена цифровая станция инженерно-сейсмометрической службы. Выявлено отсутствие резонансных явлений здания при указанном землетрясении. Построены кривые распределения ускорения в уровнях здания на азимутальной плоскости. Отмечены значительное ускорение в вертикальном направлении в уровне технического этажа, которое может быть следствием наличия тектонического разлома вблизи здания. Установлено, что в уровне подвала период максимума спектра порядка 0,18 с. Впервые определены энергетические характеристики инструментальных записей в уровнях здания.

Ключевые слова: акселерограмма, сейсмостанция, ускорения, период колебаний.

...

Түйіндеме. 2018 жылғы 26 наурыздағы жер сілкінісі кезіндегі «Қазақстан» қонақ үйінің 25-қабатты ғимаратының әрекеті талданады. Жер сілкінісінің ошағы Қапшағай қаласынан алыс емес жерде орын алған. Қонақ үйдің ғимаратында инженерлік сейсмометриялық қызметінің цифрлық станциясы орнатылған. Көрсетілген жер сілкінісі кезінде ғимараттың резонанстық құбылыстарының жоқтығы айқындалды. Азимуттық жазықтықтарда ғимарат деңгейлеріндегі жылдамдықтың қисық таралуы салынды. Техникалық қабат деңгейінде ғимарат маңында тектоникалық жарығының салдарынан болуы мүмкін тік бағыттағы айтарлықтай үдеу белгіленді. Жертөле деңгейіндегі тәртіп спекторы максимумының периоды 0,18 сек. екендігі айқындалды. Бірінші рет ғимарат деңгейлерінде аспаптық жазбалардың энергетикалық сипаттамалары анықталды.

Түйінді сөздер: акселерограмма, сейсмикалық станция, үдеу, тербеліс периоды.

Источник финансирования исследований. Исследования выполнялись с использованием средств гранта АР 05130702 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Abstract. The behavior of the 25-storey building of “Kazakhstan” hotel during the earthquake on March 26, 2018 is analyzed. The focus of the earthquake was near the town of Kapshagai. A digital station of the engineering and seismometric service installed on the hotel building. Absence of resonance phenomena of the building at the specified earthquake was revealed. Acceleration distribution curves have been constructed at building levels on the azimuth plane. Significant acceleration in the vertical direction in the level of the technical floor is noted, which can be caused by a previously unidentified tectonic fault near the building. It has been established that in the basement level the maximum period of the spectrum is about 0.18 seconds. For the first time, the energy characteristics of instrumental records in the building levels have been determined.

Keywords: accelerogram, seismic station, accelerations, period of oscillations.

Введение. Вся территория Алматинской области подвержена землетрясениям, которые могут представлять опасность для зданий и сооружений на территории мегаполиса г. Алматы. На территории города расположена сеть станций инженерно-сейсмометрической службы (ИСС). Сеть станций ИСС «КазНИИСА» на зданиях является единственной в Республике Казахстан. Инструментальные записи (акселерограммы, велосиграммы, сейсмограммы) являются объективной информацией о поведении зданий и сооружений при землетрясении.

Цель работы - снижение риска потерь при землетрясениях, что является основной задачей сейсмостойкого строительства.

В г. Алматы находится несколько десятков высотных зданий и их количество продолжает увеличиваться. Поэтому чрезвычайно важен анализ поведения высотных зданий при землетрясениях с очагами в Алматинской области. Это имеет как научный интерес – накапливается новая информация о поведении зданий при землетрясениях, так и практический – открывается возможность уточнения расчетных моделей зданий и воздействия, используемых в проектных расчетах, а также при корректировке нормативных документов в строительстве.

Методы исследования. Основным методом работы является анализ инструментальных записей реальных землетрясений, записанных станциями инженерно-сейсмометрической службы КазНИИСА. В данном случае исследуются акселерограммы сейсмической станции № 16 «Высотная гостиница» при ощутимом землетрясении с очагом в Алматинской области. При этом используются системы компьютерной математики MATLAB и Scilab. Согласно оперативным данным Центра данных Института геофизических исследований Министерства энергетики 26 марта 2018 г. произошло землетрясение в

18 ч. 53 мин. по времени Астаны (26 марта в 12 ч.53 мин. по Гринвичу) в 31 км к юго-востоку от г. Капшагай, в 63 км к северо-востоку от г.Алматы. Координаты эпицентра: 43.70° северной широты, 77.36° восточной долготы. Магнитуда $m_{rv}=5$. Энергетический класс $K=11.4$. Глубина $h=7$ км. Землетрясение ощущалось в г. Алматы с интенсивностью 3 балла и гораздо сильнее в г.Капшагай. На рисунке 1 приведено расположение очага землетрясения. Инструментальные данные были получены станциями инженерно-сейсмометрической службы КазНИИСА. Представляет интерес анализ инструментальных записей сейсмостанции № 16 «Высотная гостиница».

Станция № 16 «Высотная гостиница». Станция расположена на 25-ти этажном высотном здании гостиницы «Казахстан» и была установлена в 1977 г. Станция модернизирована в 2009 г. Установлен цифровой регистратор РСМ-32 с акселерометрами ADXL-500. На 6-м этаже установлены высокочувствительные датчики ADXL-1000. Здание гостиницы имеет высоту 105,7 м и представляет собой ствол эллипсоидной формы в плане размерами в осях 12×44 м.



Рисунок 1 - Расположение очага землетрясения 26.03.2018 г. в Алматинской области

Толщина ствола по всей высоте здания постоянна и равна 500 мм. В радиальном направлении от ствола отходят железобетонные диафрагмы, монолитно связанные со стволом и обладающие переменной по высоте здания толщиной 250×500 мм. Фундаментная плита размером 60,0×40,0×2,8 м заглублена на 10 м от поверхности земли. Основанием зданию служат однородные плотные грунты - валуногалечник с песчаными прослойками. Нормативное сопротивление грунта составляет $R_n = 6,0$ кгс/см². Ранее на этом здании были получены инструментальные записи (акселерограммы) при землетрясении 9 августа 2017 г. в Китае (Синьцзян-Уйгурский автономный район) [1,2].

Основные результаты. В таблице 1 приведены максимальные величины ускорений, эффективной длительности, значения спектрального коэффициента и периода максимума спектра при землетрясении 26.03.2018г. Шаг цифровки акселерограмм 0,0064 с. Под эффективной длительностью подразумевается продолжительность колебаний с амплитудой, превышающей половину максимума. Определение значений спектральных кривых выполнено с помощью решателей систем компьютерной математики MATLAB и SCILAB. Первый из этих пакетов лицензионный, второй – свободно распространяемый. Следует отметить достаточно сложное распределение ускорений по высоте здания. Максимальное вертикальное значение ускорения имеет место в уровне технического этажа 13,77 см/с². На рисунках 2-5 приведены записанные акселерограммы в уровнях здания. Распределение ускорений на азимутальной плоскости в различных уровнях здания представлено на рисунках 6-9.

Поэтому здесь интенсивность землетрясения 26.03.2018 г. примерно 3 балла в районе сейсмостанции №16 «**Высотная гостиница**». Величины ускорения в азимутальной плоскости в уровне кровли примерно равны аналогичным величинам в уровне 18 этажа здания. Эффективная длительность акселерограмм меняется здесь в широких пределах. Периоды максимума спектра в уровне 6 этажа в азимутальной плоскости равны 0,17-0,18 с, что близко к величине периода максимума спектра в уровне подвала 0,2 с. На рисунках 10-13 представлены соответствующие спектральные кривые. В уровнях 18-го, 21-го и технического этажа наравне с пиками спектральных кривых в районе 0,2-0,4 с. имеют место локальные пики ускорения в районе 1,4 с (рисунки 10-13). Период максимума спектра в указанном районе связан с некоторым проявлением первой формы колебания здания.

Таблица 1 - Максимальные величины ускорений и параметров акселерограмм при землетрясении 26.03.2018г. ($\eta=0,0064\text{с}$)

Компонента	Ускорение, $\text{см}/\text{с}^2$	Эффективная длительность, с	Спектральный коэффициент	Период максимума спектра, с
27.03.18-16-1-и1, Техн.этаж OZ	13,77	6,95	5,32(5,27)	0,18(0,21)
27.03.18-16-1-и3, Техн.этаж OX	7,22	29,19	5,71	0,37
27.03.18-16-1-и4, Техн.этаж OY	11,61	22,85	6,58	0,32
27.03.18-16-1-и5, 21 этаж OX	5,38	67,49	4,70	0,21
27.03.18-16-1-и6, 21 этаж OY	7,99	22,99	5,19	0,18
27.03.18-16-1-и7, 18 этаж OX	6,50	20,24	4,4	0,37
27.03.18-16-1-и8, 18 этаж OY	10,14	9,98	4,35(4,03)	0,19(0,32)
27.03.18-16-1-и11, 2 этаж OX	0,18	27,13	4,35	0,24
27.03.18-16-1-и12, 2 этаж OY	0,31	5,08	3,71	0,19
27.03.18-16-1-и13, Подвал OX	0,21	6,39	2,53	0,20
27.03.18-16-1-и15, 6 этаж OX	0,35	7,80	5,29	0,18
27.03.18-16-1-и16, 6 этаж OY	0,20	20,07	5,12	0,32

Таблица 2 - Максимальные величины ускорения в горизонтальной плоскости

Номер этажа	Максимальное ускорение, $\text{см}/\text{с}^2$
26	11,86
21	8,58
18	10,80
6	0,35
2	0,33

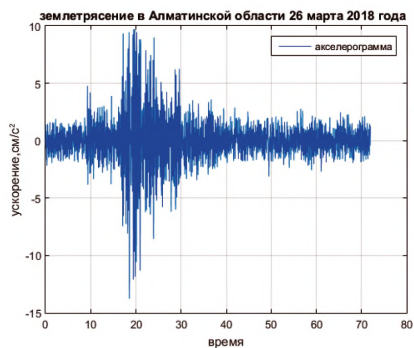


Рисунок 2 - Инструментальные записи (акселерограммы) 27.03.18-16-1-и1 технического этажа ось OZ (сейсмостанция № 16)

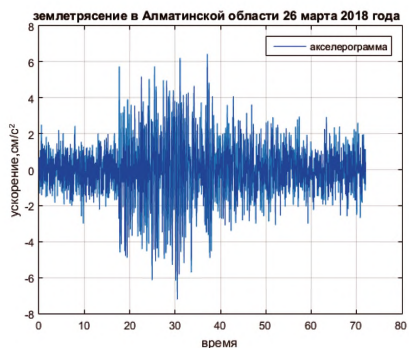


Рисунок 3 - Инструментальная запись (акселерограмма) 27.03.18-16-1-и3, технического этажа ось OX

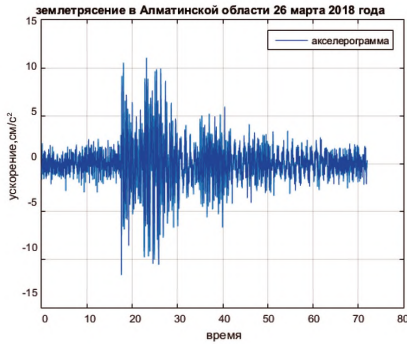


Рисунок 4 - Инструментальная запись (акселерограмма) 27.03.18-16-1-и4, технический этаж ось ОУ

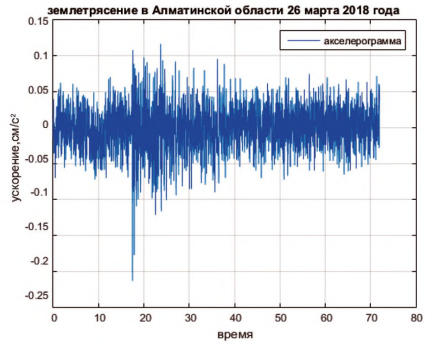


Рисунок 5 - Инструментальная запись (акселерограмма) 27.03.18-16-1-и13, подвал ось ОХ

На рисунках 6-9 представлены распределения ускорений в горизонтальной плоскости в уровне этажей и кровли здания. На уровне 6 этажа максимальное значение ускорения $0,35 \text{ см/сек}^2$, технического 26 этажа – $11,86 \text{ см/сек}^2$ (таблица 2). Распределение ускорения на азимутальной плоскости носит более плавный характер.

распределение ускорения на азимутальной плоскости

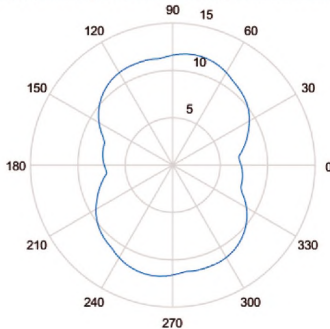


Рисунок 6 - Распределение ускорений в азимутальной плоскости в уровне 26 этажа

распределение ускорения на азимутальной плоскости

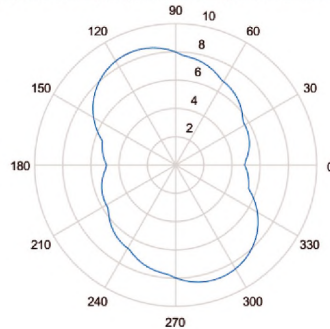


Рисунок 7- Распределение ускорений в азимутальной плоскости в уровне 21 этажа

распределение ускорения на азимутальной плоскости

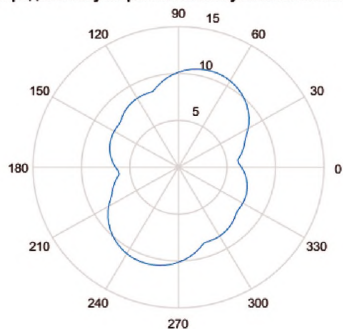


Рисунок 8 - Распределение ускорений в азимутальной плоскости в уровне 18 этажа

распределение ускорения на азимутальной плоскости

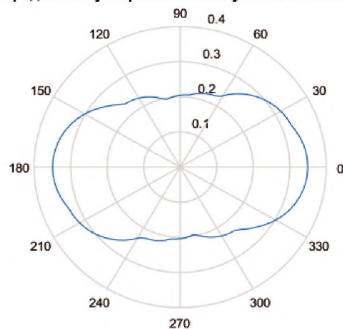


Рисунок 9 - Распределение ускорений в азимутальной плоскости в уровне 6 этажа

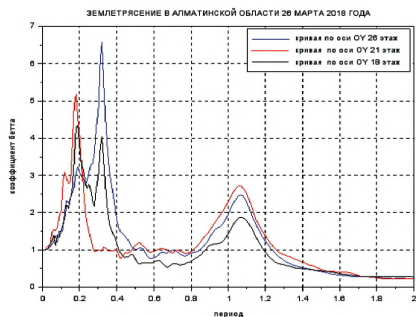


Рисунок 10 - Спектральные кривые, 26-ой, 21-ый, 18-ый этажи по оси OX

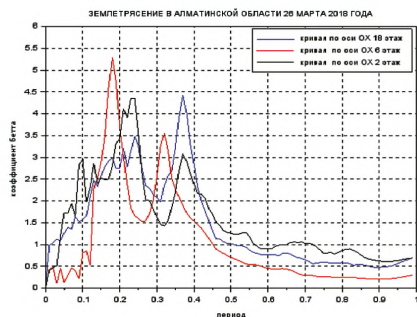


Рисунок 11 - Спектральные кривые, 26-ой, 21-ый, 18-ый этажи по оси OY

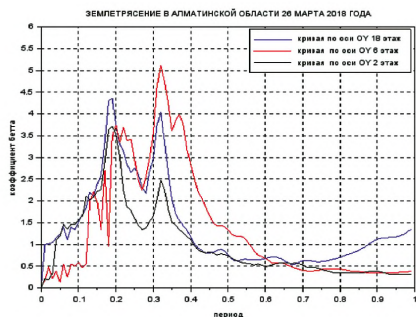


Рисунок 12 - Спектральные кривые, 18-ой, 6-ый, 2-ый этажи по оси OX

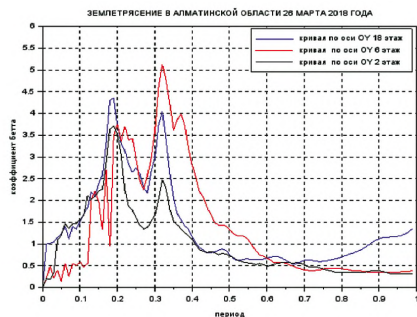


Рисунок 13 - Спектральные кривые, 18-ой, 6-ый, 2-ый по этажи оси OY

На уровне подвала период максимума спектра 0,1-0,2 с, что является оценкой спектрального состава ускорения в основании. Ниже приведены оценки энергетических характеристик здания по инструментальным записям на различных уровнях здания. Характеристики колебаний основания (длительность воздействия, спектральный состав, амплитудные характеристики) и весь комплекс характеристик воздействия влияют на объем энергии, поступившей в сооружение и влияющей на повреждение всех его элементов. Здание начинает работать нелинейно и упругие маятниковые модели уже становятся неприемлимыми. Это породило достаточно новое направление исследований, связанное с расчетом энергетических характеристик здания и оценкой его энергоемкости [4-15]. Идеальной, здесь является информация станций инженерно-сейсмометрической службы на здании. Акселерограммы в основании сооружения есть характеристики как сейсмического воздействия, так и здания. Энергия сейсмического воздействия перекачивается в конструкции здания. Количество и качество этой энергии является причиной повреждения элементов конструкции и изменения их геометрических характеристик.

Информация о поведении грунта при землетрясении, а также инструментальная информация в уровнях по высоте здания позволяет судить о распределении получаемой энергии в конструкциях сооружения. Далее для исследования инструментальных записей станций ИСС в качестве характеристики землетрясения будем рассматривать такой вариант интенсивности по Ариасу [4]:

$$I'_A = \frac{\pi}{2g_0} \int_0^T \dot{y}_0^2(t) dt, \quad (1)$$

или кумулятивную абсолютную скорость

$$U = \int_0^T |\dot{y}_0(t)| dt = CAV. \quad (2)$$

Расчеты выполнялись с помощью модулей системы компьютерной математики MATLAB. Обращает внимание тот факт, что наибольшему по величине ускорению по вертикальной оси в уровне технического этажа соответствуют не самые большие величины параметров I'_A и U . В целом величины I'_A и U меняются более равномерно, чем пики ускорений. Соотношения указанных величин в уровнях здания показывают, что для разработки многомассовой расчетной модели здания следует воспользоваться методами идентификации динамических систем. Очевидно,

что многомассовая модель здания должна учитывать различные типы деформаций здания – изгибные, сдвиговые, крутильные.

Таблица 3 - Максимальные величины ускорений и энергетические характеристики акселерограмм при землетрясении 26.03.2018г., сейсмостанция №16 (h=0,0064с)

Компоненты	Ускоре- ние, см/с ²	I'_A , см/с.	CAV, см/с.	Период миниму- ма спектра, с
27.03.18-16-1-ц1, Техн.этаж OZ	13,77	0,2571	39,10	0,18(0,21)
27.03.18-16-1-ц3, Техн.этаж OX	7,22	0,2314	60,34	0,37
27.03.18-16-1-ц4, Техн.этаж OY	11,61	0,4854	75,53	0,32
27.03.18-16-1-ц5, 21 этаж OX	5,38	0,1507	63,24	0,21
27.03.18-16-1-ц6, 21 этаж OY	7,99	0,1368	43,92	0,18
27.03.18-16-1-ц7, 18 этаж OX	6,50	0,1229	40,12	0,37
27.03.18-16-1-ц8, 18 этаж OY	10,14	0,1646	35,22	0,19(0,32)
27.03.18-16-1-ц11, 2 этаж OX	0,18	0,00011	1,30	0,24
27.03.18-16-1-ц12, 2 этаж OY	0,31	0,000063	0,646	0,19
27.03.18-16-1-ц13, Подвал OX	0,21	0,000040	0,582	0,20
27.03.18-16-1-ц15, 6 этаж OX	0,35	0,00014	0,758	0,18
27.03.18-16-1-ц16, 6 этаж OY	0,20	0,00013	1,112	0,32

Обсуждение результатов. Позитивным является отсутствие резонансных явлений при колебаниях 25-ти этажного здания при местных землетрясениях. Это объясняется различием частотных характеристик землетрясения и частотами свободных колебаний здания, для которого известны периоды колебаний по первой и второй формам колебания. Впервые получены энергетические характеристики в уровнях здания при воздействии местных землетрясений величины интеграла Ариаса и значения кумулятивной абсолютной скорости. Представленные данные могут быть использованы как для разработки энергетической шкалы интенсивности землетрясений с учётом местных особенностей землетрясений, так и разработки методов оценки сейсмического риска. Другая область применения полученных экспериментальных данных это разработка расчётных моделей высотного здания с использованием методов идентификации динамических систем с использованием соответствующего программного обеспечения, например, пакет System Identification Toolbox системы компьютерной математики MATLAB. Это программный инструмент для создания математических моделей динамических систем на основе наблюдаемых входных/выходных данных. Полученные результаты являются уникальными ввиду отсутствия иных сетей станций инженерно-сейсмометрической службы на зданиях в г. Алматы.

Выводы:

1. На станции №16 оценка периода максимума спектра в уровне подвала в пределах 0,1-0,2 с. Результаты представляются достаточно близкими к [2-3,16].

2. Сейсмическое событие 26 марта 2018 г. по инструментальным записям сейсмостанции №16 представляет собой на территории г. Алматы землетрясение интенсивностью не выше 3-4-х баллов. Землетрясение заметно ощущалось персоналом 25-ти этажной гостиницы. Очаг землетрясения расположен на территории Алматинская области вблизи г. Капшагай. При землетрясениях такого типа резонансных явлений в здании не наблюдается.

3. Приведённые в статье акселерограммы пополнят базу данных акселерограмм КазНИИСА.

4. Отмечена значительная величина вертикальных ускорений на уровне технического этажа для 25-ти этажного здания гостиницы «Казахстан» (сейсмостанция № 16) - 13,77 см/с². Это может быть следствием наличия близко расположенного тектонического разлома.

Список литературы

1 *Yerzhanov S.Y., Lapin V.A., Aldakhov Y.S.* Monitoring the changes of dynamic characteristics of high-rise building. // *Jornal Physics: Conference Series*, 1425, 2020, pp.1-9. (<https://doi.org/10.1088/1742=6596/1425/1/0112008>).

2 *Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П.* Исследования изменения динамических характеристик высотного здания по данным инженерно-сейсмометрических станций. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №3.- 2018. – С.38-44.

3 *Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П.* Реакция 25-ти этажного здания гостиницы «Казахстан» при землетрясении 9 августа 2017 года. // «Вестник АО «КазНИИСА». Вып.2(78).-Arias A.A A measure of earthquake intensity. // *Seismic design for nuclear power plants* (ed.R.J.Hansen), MIT Press, Cambridge, Massachusetts. - 1970. – PP.438-483.

4 *Уздин А.М., Дмитровская Л.Н., Тумель И.А.* К вопросу о концепции оценки интенсивности сейсмического воздействия. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №3.– 2008. – С.57-59.

5 *Гиман Л.Н., Ткаченко А.С.* Об учете энергетических характеристик при задании сейсмического воздействия.//«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №2.– Алматы, 2001. – С.15-17.

6 *Прокопович С.В.* Оценка зависимости энергетических характеристик сейсмического воздействия от его преобладающего периода. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №4. – Алматы, 2018. – С.50-54.

7 Рутман Ю.Л., Симборт Э. Анализ возможности применения энергетического критерия SAV для расчета сейсмостойкости сооружений. // IX Всеукраинская научно-техническая конференция «Строительство в сейсмических районах Украины». – Киев: DP NDIBK.– Вып.76. – С.618-625.

8 Долгая А.А., Индейкин А.А. Статистический анализ интенсивности по Ариасу и скорости для реальных землетрясений. «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №2.– Москва, 2000. – С.32-34.

9 Шивуа А.Д. Энергетический метод расчета сейсмостойкости зданий и сооружений. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб: Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет. 2016, 118 с.

10 Попова Е.А., Ткаченко А.С., Уздин А.М. Некоторые проблемы применения энергетических методов для оценки сейсмостойкости сооружений. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №2.– Москва, 2000. – С.28-30.

11 Падуков В.А. Энергетические критерии оценки сейсмостойкости. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №2.– Москва, 2000. – С.30-32.

12 Джинчвелашвили Г.А., Дзержинский Р.И., Денисенкова Н.Н. Количественные оценки сейсмического риска и энергетические концепции сейсмостойкого строительства. // «Компьютерные исследования и моделирование», Т.10, №1, С.61-76.

13 Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. Комплексный анализ количественных параметров колебаний грунта и оценка их зависимостей от магнитуд землетрясений. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». №2.– Москва, 2008. – С.71-73.

14 Петров А.А. Кумулятивный квадрат ускорений и энергетический критерий сейсмостойкости сооружений. // «Сейсмостойкое строительство». №5.– 1999. – С.22-25.

15 Колебания здания при местном землетрясении 15.02.2018 в городе Алматы. // «Вестник АО «КазНИИСА». Вып.11(87).– Алматы, 2018. – С.28-36.

16 Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П. Колебания здания при местном землетрясении 15.02.2018 в городе Алматы. // «Вестник АО «КазНИИСА». Вып.11(87).– Алматы, 2018. – С.28-36.

Лапин В.А. - кандидат технических наук, член-корреспондент Национальной и Международной инженерных академий, e-mail: lapin_1956@list.ru

Ержанов С.А. - кандидат технических наук, член-корреспондент Национальной и Международной инженерных академий

Девярых А.А. - ведущий инженер

Алдахов Е.С. - директор, Центр сейсмостойкости, обследования зданий и сооружений АО «КазНИИСА».