

Исследования математических моделей процессов деформаций зданий и сооружений

¹*САЙЛЫГАРАЕВА Мария Алтынбековна, магистр, старший преподаватель, mariya_23365@mail.ru,

²НЫСАНБАЙ Нұрдәулет Нысанбайұлы, магистр, инженер-геодезист, nmalikov03@bk.ru,

¹БАЙГУРИН Жаксыбек Джакупбекович, д.т.н., профессор, baygurin@mail.ru,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан,

²ТОО «GeoConstruct Almaty», ул. Даналык, 20, Алматы, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель. Статья направлена на анализ изменений динамических характеристик здания и установление зависимости ускорений сдвиговых деформаций от этажности здания для прогнозирования влияния сейсмических колебаний на техническое состояние здания с учетом инженерно-геологических свойств основания.

Методы исследования. Для изучения вопросов оценки изменения динамических характеристик высотных зданий и сооружений проведен ряд инструментальных наблюдений с использованием геодезических приборов, автоматизированных систем мониторинга и инженерно-сейсмометрических станций. Для создания математических моделей деформационных процессов зданий и сооружений предложено изучение взаимодействия конструктивных элементов здания с инженерно-геологическим строением грунта в верхней и нижней части мегаполиса.

Результаты. Получены значения величин по ускорению интенсивности сотрясения грунта, эффективной длительности, спектральным коэффициентам и периодам максимума спектра, выполненных по результатам измерений колебаний на различных этажах высотного здания по инструментальным записям сейсмической станции местного и удаленного землетрясения. Установлены зависимости ускорений сдвиговых деформаций от этажности здания с учетом инженерно-геологических свойств основания. Предложены прогнозные модели деформационных процессов здания с учетом динамических характеристик колебаний грунтов и энергетического класса движений земной коры.

Научная новизна. Предложена аналитическая методика корреляционного анализа случайных величин, с помощью которой изучаются нормально распределенные линейные и нелинейные процессы создания математической модели деформационных процессов многоэтажных зданий.

Практическая значимость. Полученные результаты исследования за деформационными процессами сооружений и их конструктивных элементов позволяют прогнозировать динамическую модель процесса перемещений точек сооружения с учетом динамических характеристик колебаний грунтов и энергетических классов движений земной коры.

Ключевые слова: ускорения сдвиговых деформаций, инженерно-геологическое строение грунта, сейсмическая зона, спектральный коэффициент, геодезические наблюдения, корреляционный анализ.

Введение. Многочисленные геодезические наблюдения за деформациями зданий и сооружений на земной поверхности представляют в интегральной количественной форме. Это позволяет получить объективную и точную информацию о сложном взаимодействии его конструкций с грунтовым основанием и внешней средой. Такая информация является основой для разработки

математических моделей закономерности развития деформационных процессов, контролируемых не только геодезическими, но и автоматизированными системами мониторинга. Для выявления закономерности развития деформационных процессов зданий были изучены многоэтажные строительные объекты, расположенные в разных районах города Алматы – северном и южном – с раз-

личными высотными отметками земной поверхности (733,5-741,0 м, 899,2-915,3 м) с учетом различных энергетических классов колебаний земной поверхности.

Для составления сравнительного анализа устойчивости строительных объектов были проанализированы условия, зависящие от конструктивных особенностей здания во взаимодействии с грунтовым основанием и внешней средой. В северной части города геолого-литологическое строение состоит из аллювиально-пролювиальных отложений среднечетвертичного возраста ($арQ_{II2}$), а в южной части – из аллювиально-пролювиальных отложений верхнечетвертичного возраста ($арQ_{III}$). В южной части города грунты обладают более твердой консистенцией, твердой полутвердой крепостью и составлены породами более позднего развития (таблица) [1, 2, 3].

Методы. Для создания математических моделей деформационных процессов зданий предложено изучение взаимодействия конструктивных элементов здания (фундамент, ригели, колонны, железобетонные плиты перекрытия, диафрагмы жесткости) с инженерно-геологическим строением грунта в верхней (южной) части мегаполиса. Такой подход создает новые информационные и математические данные, полученные в процессе строительства и эксплуатации объектов строительства.

В процессе исследования деформационных процессов и технического состояния

зданий и сооружений для получения достоверной информации также были использованы методы геодезических наблюдений и геотехнического контроля с использованием автоматизированных систем мониторинга и данных инженерно-сейсмометрических станций [4, 5, 6].

Исследования о взаимодействии конструктивных элементов здания с грунтовым основанием проводились отечественными и зарубежными научными организациями и институтами АО «КазНИИСА», ИНСТИТУТ ИОНОСФЕРЫ (Казахстан), ГОУ ВПО СГГА, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, НИИГАиК СРО АСОНО, ИГиМ СГУГиТ (Россия), Kyiv National University of Construction and Architecture (Украина), Polytechnic University of Valencia (Spain), Joint Research Centre (Европа) и другие для формирования проектных материалов строительства в едином формате для эффективного контроля и управления качеством строительства на всех этапах возведения и эксплуатации.

Эти исходные материалы могут быть обобщены на различных участках городской территории, выбранных по заданным критериям однотипности сооружений, разнородности инженерно-геологических условий грунтов оснований и близости характера воздействий внешней среды. Для оценки изменения динамических характеристик высотных зданий и сооружений проведены ряд инструментальных наблюдений, так как в течение многолетнего периода эксплуата-

Инженерно-геологическое строение грунта

№	Тип грунта	Описание пород	Мощность, м	
			Южная часть города	Северная часть города
1	Почвенно-растительный слой	суглинок серого цвета с корнями растений	0,2-0,3	0,3-0,5
2	Насыпной грунт	суглинок бурого цвета, галька, песок	0,8	0,2-0,5
3	Суглинок	твердой консистенции от темно-коричневого до желтовато-серого цвета, макропористый, с редкими включениями мелкой гальки, просадочный	0,7-1,2	-
	Суглинок	твердой и полутвердой до тугопластичной, мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции светло-бурого цвета, лессовидный с включением карбонатов и ракушек улиток	7,0-15,0	8,0-20,0
4	Галечниковый грунт	с песчаным заполнителем с включением валунов до 30%	3,5-4,0	-
5	Грунтовые воды, глубина		на глубине 5,0 м не вскрыты	5,10-6,80

ции этих объектов происходят возможные динамические изменения, что является основными причинами крена и осадок здания. Осадки связаны с изменением уровня грунтовых вод, значительной статической нагрузкой в период длительной эксплуатации и подземных колебаний земной поверхности. Это приводит к накоплению повреждений в несущих конструкциях и опорах здания и изменению жесткостных характеристик металлических конструкций [7, 8, 9].

Выявленные закономерности развития деформаций в процессе наблюдений за многоэтажными зданиями позволили установить, что в разных районах города (северном и южном) с различными высотными отметками земной поверхности (733,5-741,0 м, 899,2-915,3 м) подземные колебания оказывают влияние на устойчивость здания. Авторами проведенных исследований изменения динамических характеристик высотных зданий по данным инженерно-сейсмометрических служб выявлено, что в высотных зданиях изменения напряжений на железобетонные конструкции распространяется неравномерно по всей высоте здания.

Научные результаты. Получены значения величин ускорений интенсивности сотрясения грунта, эффективной длительности, спектральных коэффициентов и периодов максимума спектра, выполненных по инструментальным записям местного землетрясения на различных этажах 24-этажного здания.

Величины ускорений сдвиговых деформаций по этажам по данным инструментальных записей местного сейсмического события приведены на рисунке 1.

Значения ускорений увеличиваются от подвальной части далее вверх по высоте здания. Максимальное значение зарегистрировано на 21-м этаже 12,47 см/с², минимальное – в подвале 0,02 см/с².

Для сравнительного анализа максимальных величин ускорений были рассмотрены инструментальные записи по удаленным колебаниям земной поверхности (рисунок 2).

Значения ускорений по удаленным тектоническим движениям увеличиваются от подвальной части далее вверх по высоте здания. Наибольшее значение зарегистрировано на 24-м этаже 25,2 см/с², наименьшее – в подвале 0,032 см/с².

Дополнительно в процессе наблюдений были измерены такие параметры, как эффективная длительность (от 0,04-52,56 сек. по измерениям местных колебаний, от 25,2-117,69 сек по измерениям удаленных колебаний); спектральный коэффициент и период максимума спектра (сек) местных и удаленных тектонических движений.

Эти данные позволяют построить спектральные кривые, которые дают визуальную характеристику динамики сейсмического события. В результате анализа спектральных кривых установлено, что местные тектонические колебания обладают кратковременным импульсивным характером, в то время как удаленные колебания носят ярко выраженный резонансный характер.

Для создания математической модели деформационных процессов многоэтажных зданий предлагаем методику корреляционного анализа случайных величин, с помощью которой изучаются нормально распределенные линейные и нелинейные процессы.

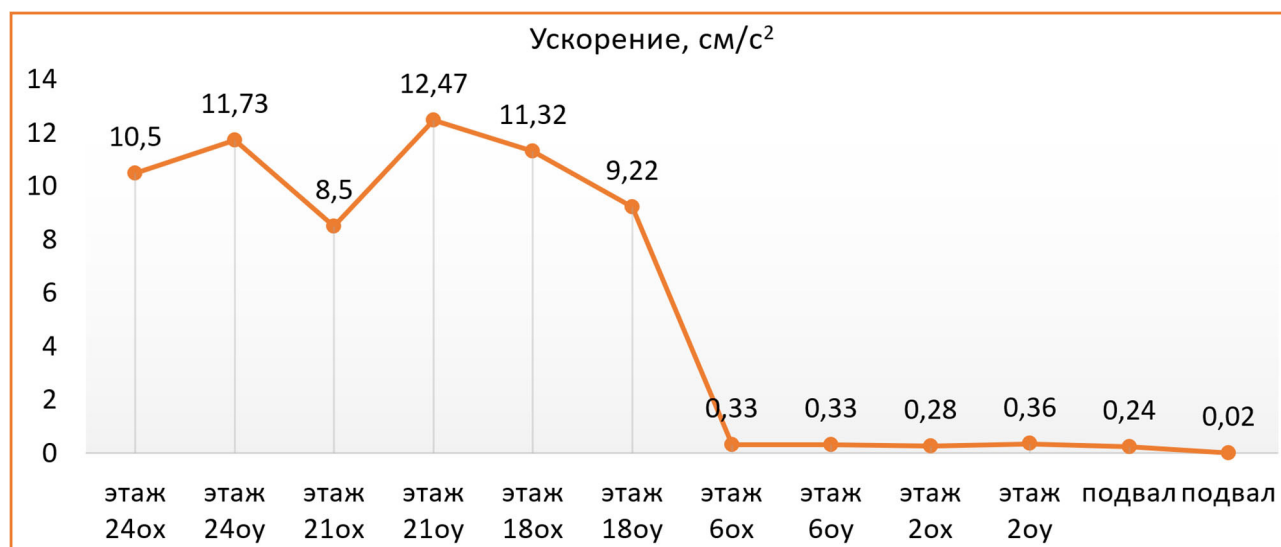


Рисунок 1 – График величин ускорений сдвиговых деформаций по этажам здания по местным колебаниям земной поверхности



Рисунок 2 – График величин ускорений сдвиговых деформаций по этажам здания по удаленным колебаниям земной поверхности

Наиболее разработанной и простой является корреляционная теория случайных функций, с помощью которой изучаются нормально распределенные линейные процессы. Для использования этой теории проверяется нормальность и линейность описываемого процесса, а в необходимых случаях выполняются нормализующие преобразования и линеаризация. При нормальности l -мерного векторного процесса $X(t)$ его кинематическая модель, построенная по n сечениям, выразится в виде N -мерной ($N=nl$) плотности распределения:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} (\det K_X)^{-\frac{1}{2}} \exp \times \left\{ -\frac{1}{2} (X - m_X)^T K_X^{-1} (X - m_X) \right\}, \quad (1)$$

где $X = (X_1^T, X_2^T, \dots, X_n^T)$ – N -мерный вектор;
 m_X – N -мерный вектор математического ожидания;
 K_X – корреляционная матрица порядка $N \times N$, составленная из элементов матричных корреляционных функций.

$$K_{X_i X_j} = K_X(t_i, t_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Построение динамической модели процесса перемещений точек сооружения основывается, как уже отмечалось, на современной теории динамических систем. Определение входов и выходов изучаемой динамической системы выполнено в подразделе 1. В общем виде рассматриваемую динамическую модель можно записать так:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \Phi[X(t), t, \theta] + B[U(t), t, \theta] + \Gamma(\theta)W(t), \quad (2)$$

где $X(t)$ – вектор, называемый состоянием данной системы, составленный из перемещений $y(t)=x(t)$ и их производных;
 $U(t)$ – вектор входных воздействий;
 θ – вектор неизвестных параметров модели;
 $W(t)$ – вектор эквивалентного шума, приведенный к входу и включающий действие всех неучтенных факторов;
 $\Phi[X(t), t, \theta]$, $B[U(t), t, \theta]$ – известные непрерывные и в общем случае нелинейные вектор-функции времени t , характеризующие соответственно динамические свойства системы и влияние входного воздействия на состояние системы;
 $\Gamma(\theta)$ – матрица, отражающая степень влияния неучтенных факторов.

Из выражения (2) видно, что структура динамической модели обладает богатым содержанием, отвечающим поставленным требованиям. При этом модель объединяет свойства ряда методов описания процессов деформаций сооружений. Например, при определенных условиях можно перейти от динамической модели к используемой в строительной механике и механике грунтов модели упругой линейной деформации, т.е. к известной модели Гука.

Выводы. В результате исследования авторами выполнены следующие работы:

1. Получены значения величин ускорения сотрясения грунта по инструментальным записям инженерно-сейсмометрических станций, установленных на разных этажах

высотного здания.

2. Изучены и проанализированы условия грунтового основания высотного здания, находящегося в южной части города Алматы. Построена стратиграфическая таблица геолого-литологического строения грунта в разных частях города.

3. Установлены зависимости ускорений сдвиговых деформаций от этажности здания, где имело место изменение динамических характеристик для прогнозирования влияния тектонических колебаний на техническое состояние здания с учетом инженерно-геологических свойств основания.

4. Предложена методика построения прогнозной модели деформационных процессов здания с учетом динамических характери-

стик колебаний грунтов и энергетическим классом движений земной коры.

5. Установлено, что в разных районах города (северном и южном) с различными высотными отметками земной поверхности (733,5-741,0 м, 899,2-915,3 м) выявлены закономерности развития деформаций для зданий малой и средней этажности с учетом подземных колебаний земной поверхности.

Применение методики корреляционного анализа случайных величин для изучения нормально распределенных линейных и нелинейных процессов имеет большое прикладное значение для динамического расчета конструкций и создания математической модели деформационных процессов многоэтажных зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапин В.А., Ержанов С.Е. Методологические основы использования станций инженерно-сейсмометрической службы на зданиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 4. С. 44-49.
2. Ержанов С.Е., Лапин В.А., Даугавет В.П., Девярых А.А. Исследование инструментальных записей местного землетрясения в г. Алматы // Вестник АО «КазНИИСА». Алматы, 2017. № 8 (72). С. 15-21.
3. Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П., Девярых А.А. Исследование инструментальных записей местного землетрясения 02.02.2018 года в городе Алматы // Там же. Алматы, 2018. № 2 (73). С. 15-21.
4. Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Великанов А.Е., Соколов А.Н. Землетрясения на территории города Алматы // В сб. «Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан». Вып. 3. 2015. С. 87-93.
5. СНиП РК 2.03-30-2017 Строительство в сейсмических зонах. Алматы, 2018.
6. Стецкий С.В., Ларионова К.О., Никонова Е.В. Основы архитектуры и строительных конструкций: краткий курс лекций. – Москва: МГСУ, 2014.
7. Фельдман В.Д., Мережко Л.М. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. МДС 13-22.2009/000 «ТЕКТОПЛАН». – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 76 с.
8. Малинникова О.Н., Захаров В.Н., Филиппов Ю.А., Ковпак И.В. Геопространственное моделирование взаимодействия высотных зданий и сооружений с массивом горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 2-2. С. 59-66.
9. Sailygarayeva M., Nurlan A., Rysbekov K., Baygurin Zh. Predicting of vertical displacements of structures of engineering buildings and facilities. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023, (2): 077-083.

Ғимараттар мен құрылыстардағы деформациялық процестердің математикалық модельдерін зерттеу

¹*САЙЛЫГАРАЕВА Мария Алтынбековна, магистр, аға оқытушы, mariya_23365@mail.ru,

²НЫСАНБАЙ Нұрдаулет Нысанбайұлы, магистр, инженер-геодезист, nmalikov03@bk.ru,

¹БАЙГУРИН Жаксыбек Джакупбекович, т.ғ.к., профессор, baygurin@mail.ru,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан,

²«GeoConstruct Almaty» ЖШС, Даналық көшесі, 20, Алматы, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақсаты. Мақала ғимараттың динамикалық сипаттамаларының өзгерістерін талдауға және ығысу деформациясының үдеулерінің ғимараттың қабаттарының санына тәуелділігін анықтауға бағытталған. Іргетастың инженерлік-геологиялық қасиеттерін ескере отырып, сейсмикалық тербелістердің ғимараттың техникалық жағдайына әсерін болжау. Зерттеу әдістері. Көпқабатты үйлер мен құрылыстардың динамикалық сипаттамаларының өзгеруін бағалау мәселелерін зерттеу үшін геодезиялық аспаптарды, автоматтандырылған бақылау жүйелерін және инженерлік сейсмометриялық станцияларды қолдану арқылы бірқатар аспаптық бақылаулар жүргізілді. Ғимараттар мен құрылыстардың деформациялық процестерінің математикалық үлгілерін жасау үшін мегаполистің жоғарғы және төменгі бөліктеріндегі ғимараттың құрылымдық элементтерінің топырақтың инженерлік-геологиялық құрылымымен өзара әрекеттесуін зерттеу ұсынылады.

Нәтижелер. Жер сілкінісінің қарқындылығы, тиімді ұзақтығы, спектрлік коэффициенттері және спектрдің максимум кезеңдері бойынша нәтижелер алынды. Жергілікті және шалғай жер сілкінісінің сейсмикалық станциясының аспаптық жазбаларын пайдалана отырып, көпқабатты үйлердің әртүрлі қабаттарындағы тербелістерді өлшеу нәтижелері бойынша орындалады. Іргетастың инженерлік-геологиялық қасиеттерін ескере отырып, ығысу деформацияларының үдеуінің ғимараттың қабаттарының санына тәуелділіктері белгіленген. Жер бетіндегі тербелістердің динамикалық сипаттамаларын және жер қыртысы қозғалысының энергетикалық класын ескере отырып, ғимараттың деформация процестерінің болжамды үлгілері ұсынылған.

Ғылыми жаңалық. Кездейсоқ шамаларды корреляциялық талдаудың аналитикалық әдістемесі ұсынылған, оның көмегімен әртүрлі қабаттағы ғимараттардағы деформация процестерінің математикалық моделін құру үшін қалыпты таралған сызықтық және сызықтық емес процестер зерттеледі.

Практикалық маңызы. Конструкциялардың және олардың құрылымдық элементтерінің деформациялану процестерін зерттеудің алынған нәтижелері жердегі тербелістердің динамикалық сипаттамаларын және қозғалыстардың энергетикалық класын ескере отырып, жер қыртысы құрылымының қозғалыс нүктелері процесінің динамикалық моделін болжауға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: ығысу деформацияларын жеделдету, топырақтың инженерлік-геологиялық құрылымы, сейсмикалық аймақ, спектрлік коэффициент, геодезиялық бақылаулар, корреляциялық талдау.

Research of Mathematical Models of Deformation Processes of Buildings and Structures

¹***SAILYGARAYEVA Mariya**, Master's Degree, Senior Lecturer, mariya_23365@mail.ru,

²**NYSANBAI Nurdaulet**, Master's Degree, Engineer Surveyor, nmalikov03@bk.ru,

¹**BAIGURIN Zhaksybek**, Dr. of Tech. Sci., Professor, baygurin@mail.ru,

¹NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Satpayev Street, 22a, Almaty, Kazakhstan,

²GeoConstruct Almaty LLP, Danalyk Street, 20, Almaty, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. Purpose. The article is aimed at analyzing changes in the dynamic characteristics of a building and establishing the dependence of shear deformation accelerations on the building's storey to predict the effect of seismic vibrations on the technical condition of the building, taking into account the engineering and geological properties of the foundation.

Methodology. A number of instrumental observations using geodetic devices, automated monitoring systems and engineering seismic stations were made to study the issues of assessing changes in the dynamic characteristics of high-rise buildings and structures. To create mathematical models of deformation processes of buildings and structures, the study of interaction of structural elements of the building with the engineering-geological structure of the ground in the upper and lower parts of the megapolis was proposed.

Findings. The results on ground shaking intensity acceleration, effective duration, spectral coefficients and periods of spectrum maximum are obtained. The results of measurements of vibrations on different floors of a high-rise building based on instrumental records of seismic station of local and distant earthquake have been obtained. Dependences of accelerations of shear deformations on the floor of the building with regard to engineering-geological properties of the base have been established. Predictive models of deformation processes of the building taking into account dynamic characteristics of ground vibrations and energy class of earth crust movements have been proposed.

Originality. The analytical technique of correlation analysis of random variables is proposed, by means of which normally distributed linear and nonlinear processes are studied to create a mathematical model of deformation processes of buildings of different storeys.

Practical value. The obtained results of the study of deformation processes of buildings and their structural elements allow to predict the dynamic model of the process of displacements of points of the structure taking into account the dynamic characteristics of ground vibrations and energy class movements of the Earth's crust.

Keywords: acceleration of shear deformations, engineering-geological soil structure, seismic zone, spectral coefficient, geodetic observations, correlation analysis.

REFERENCES

1. ErzhanoV S.E., Lapin V.A. Methodological basis for the use of engineering seismometric service stations on buildings. Earthquake-resistant construction. Safety of structures, 2018, no. 4, 44-49. [Metodologicheskie osnovy ispol'zovaniya stancij inzhenerno-sejsmometricheskoj sluzhby na zdaniyah. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij] (In Russ.).
2. ErzhanoV S.E., Lapin V.A., Daugavet V.P., Devyatyh A.A. Study of instrumental records of a local earthquake in Almaty // Bulletin of JSC KazNIISA. Almaty, 2017. No. 8 (72), 15-21. [Issledovanie instrumental'nyh zapisej mestnogo zemletryaseniya v g. Almaty. Vestnik AO KazNIISA. Almaty] (In Russ.).
3. Lapin V.A., ErzhanoV S.E., Daugavet V.P., Devyatyh A.A. Study of instrumental records of the local earthquake of 02/02/2018 in the city of Almaty // Tam zhe. Almaty, 2018. No. 2 (73). Pp. 10-16. [Issledovanie instrumental'nyh zapisej mestnogo zemletryaseniya 02.02.2018 goda v gorode Almaty // Vestnik AO «KazNIISA. Almaty] (In Russ.).
4. Mihajlova N.N., Sokolova I.N., Velikanov A.E., Sokolov A.N. Earthquakes on the territory of the city of Almaty // Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 3, 2015, 87-93. [Zemletryaseniya na territorii goroda Almaty // Vestnik Nacional'nogo yadernogo centra Respubliki Kazahstan] (In Russ.).
5. Building regulations 2.03-30-2017. Almaty. Construction in seismic zones [SNiP RK. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh zonah], 2018 (In Russ.).
6. Steckij S.V., Larionova K.O., Nikonova E.V. Fundamentals of architecture and building structures: a short course of lectures. Moscow: MGSU, 2014. [Osnovy arhitektury i stroitel'nyh konstrukcij: kratkij kurs lekcij] (In Russ.).
7. Fel'dman V.D., Merezhko L.M. Methodology for geodetic monitoring of the technical condition of high-rise and unique buildings and structures [Metodika geodezicheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysoznyh i unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij]. MDS 13-22.2009/000 «TEKTOPLAN». – Moscow: OJSC «CPP». 2010. – 76 p. (In Russ.).
8. Malinnikova O.N., Zaharov V.N., Filippov YU.A., Kovpak I.V. Geospatial modeling of the interaction of high-rise buildings and structures with rock masses. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2008, no. 2-2, pp. 59-66. [Geoprostranstvennoe modelirovanie vzaimodejstviya vysoznyh zdaniy i sooruzhenij s massivom gornyh porod. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)] (In Russ.).
9. Sailygarayeva M., Nurlan A., Rysbekov K., Baygurin Zh. Predicting of vertical displacements of structures of engineering buildings and facilities. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023, (2): 077-083.