

Мероприятия по минимизации осадок фундамента нового объекта строительства

Серафима Михайловна Сельвиан, Ульяна Олеговна Московкина,
Екатерина Алексеевна Софронова, Дарья Дмитриевна Антропова

*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. С увеличением плотности застройки нарастает дефицит площадок строительства с достаточно высокими физико-механическими характеристиками грунтов основания, не требующими реализации дополнительных мероприятий улучшения свойств грунтов или применения фундаментов глубокого заложения. В связи с этим все чаще при проектировании возникает необходимость в повышении несущей способности оснований и фундаментов для уменьшения деформаций и предотвращения обрушений, что особенно важно в условиях современного строительства в крупных населенных пунктах.

Материалы и методы. Существует множество методов усиления грунтов, включая механические, химические и физико-химические. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, а также области применения в зависимости от конкретных условий и требований проекта. В последние годы наблюдается активное развитие новых технологий, таких как инъекционные методы, использование геосинтетических материалов и других, что открывает новые горизонты для повышения эффективности и устойчивости конструкций. Рассмотрены варианты усиления основания методом Jet Grouting (струйная цементация грунтов) и устройства свайного фундамента с применением разрядно-импульсной технологии (РИТ) применимо к конкретному объекту в сложившихся условиях застройки и инженерно-геологических условиях.

Результаты. Проанализированы некоторые современные технологии усиления грунтов в конкретных условиях на конкретном объекте строительства и их эффективность в данных условиях. Выполнены численное моделирование здания на усиленном основании методом Jet Grouting и устройство свайного фундамента с применением РИТ.

Выводы. Представлены результаты численного моделирования. Выбор метода зависит от инженерно-геологических условий, требуемой несущей способности грунтов основания и других факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усиление грунтов, Jet Grouting, разрядно-импульсная технология, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, геотехнические решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сельвиан С.М., Московкина У.О., Софронова Е.А., Антропова Д.Д. Мероприятия по минимизации осадок фундамента нового объекта строительства // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.2

Автор, ответственный за переписку: Ульяна Олеговна Московкина, moskovkina.u@mail.ru.

Measures to minimize foundation settlement in a new construction project

Serafima M. Selviyan, Ulyana O. Moskovkina,
Ekaterina A. Sofronova, Daria D. Antropova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Excessive building density worsens the lack of foundation soils that have sufficiently high physical and mechanical properties and therefore do not require additional soil improvement measures or deep foundations. Accordingly, design practice increasingly requires enhancing the bearing capacity of subsoil and foundations to reduce deformations and prevent failures, which is particularly important for the present-day construction practice in large urban areas.

Materials and methods. There are numerous soil improvement methods, including mechanical, chemical, and physico-chemical techniques. Each approach has advantages and limitations, as well as fields of application determined by project-specific conditions and requirements. In recent years, new technologies, such as grouting methods and geosynthetic materials, have been actively developed, opening up new opportunities for improving structural performance and stability. This study considers foundation-soil improvement using Jet Grouting (jet grouting of soils) and construction of a pile foundation using discharge-pulse technology (DPT) as applied to a specific facility under existing development and geoengineering conditions.

Results. Several modern ground improvement technologies were analyzed for the specific conditions of a particular construction site, and their effectiveness was evaluated. Numerical modeling was performed for a building on a Jet Grouting-improved foundation soil and for a pile foundation constructed using DPT.

Conclusions. The results of numerical modeling are presented. The choice of methods depends on geoengineering conditions, the required bearing capacity of the foundation soils, and other factors.

KEYWORDS: ground improvement, Jet Grouting, discharge-pulse technology, stress-strain state, numerical modeling, geo-technical solutions

FOR CITATION: Selviyan S.M., Moskovkina U.O., Sofronova E.A., Antropova D.D. Measures to minimize foundation settlement in a new construction project. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.2

Corresponding author: Ulyana O. Moskovkina, moskovkina.u@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проектируемое сооружение представляет собой многоквартирный дом с подземной автостоянкой с габаритами в плане (Д × Ш): 48,65 × 38,5 м:

- количество этажей: 25–45 надземных и 2 подземных (под всей площадью);
 - высота здания: 81,3–151,35 м.
- Предусматривается 2-этажная подземная парковка (укрытие ГО ЧС):
- основные несущие конструкции: монолитный железобетонный каркас;
 - предельные величины средних осадок оснований фундаментов: $S_u = 15,0$ см;
 - глубина сжимаемой толщи: 22,4 м.

В геоморфологическом отношении участок работ расположен на 3-й надпойменной террасе. Рельеф участка относительно ровный, искусственно спланированный, характеризуется абсолютными высотными отметками поверхности порядка 150,00–151,50 м.

В геологическом отношении на площадке до глубины 52,0 м принимают участие четвертичные отложения следующих стратиграфических комплексов (сверху вниз):

- техногенные грунты (t-QIV), залегают с поверхности до глубины порядка 0,5–2,0 м;
- среднечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (a,f-QIIms), залегают на глубине 0,5–2,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 149,50–151,00 м, и представлены песками и суглинками, общей мощностью 10,0–15,0 м;
- среднечетвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения (f,lg-QIIms), залегают под аллювиально-флювиогляциальными отложениями на глубине 12,0–15,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам порядка 136,00–138,00 м, и представлены песками, супесями, суглинками, мощностью 1,2–6,0 м;
- нижнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения внуковской серии донского горизонта (a,f-QIVk-ds), залегают на глубине 14,5–17,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 134,50–135,50 м, и представлены песками, супесями, суглинками, мощностью 7,5–12,5 м.

Четвертичные отложения на глубине 34,0–36,0 м от уровня дневной поверхности, что соответствует абсолютным высотным отметкам 118,00–120,00 м, подстилаются коренными отложениями (сверху вниз):

- нижнемеловые отложения кунцевской и люберецкой толщи берриаса, ростовской свиты нижнего готерива, дяковской толщи, савельевской и грмячевской свит верхнего готерива объединенные (K1kp-gr) залегают под четвертичными отложениями и представлены песками мощностью до 2,0 м;
 - верхнеюрские-нижнемеловые отложения лопатинской свиты (J3-K1lp) залегают на глубине 32,0–34,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 114,00–116,00 м, представлены песками мощностью 2,0–4,0 м;
 - верхнеюрские отложения филевской и егорьевской свит нерасчлененные (J3fl+eg) залегают на глубине 37,5–39,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 111,00–113,50 м, представлены песками мощностью 2,0–4,0 м;
 - средне-верхнеюрские отложения великодерской-ермолинской свит (J2-3vd-er) залегают на глубине 40,0–42,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 108,50–110,50 м, представлены глинами мощностью 15,0–17,0 м;
 - среднеюрские отложения чулковской свиты (J2chl) залегают на глубине 57,0–58,0 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 92,00–93,50 м, представлены песчанистыми глинами и глинистыми песками мощностью более 3,0 м;
 - верхнекаменноугольные отложения хамовнической свиты, верхней (неверовской) подсвиты (C3hm2) залегают на глубине 57,0–59,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 92,00–93,00 м, представлены глинами с прослоями мергелей мощностью 1,0–3,0 м;
 - верхнекаменноугольные отложения хамовнической свиты, нижней (ратмировской) подсвиты (C3hm1) залегают на глубине 59,0–62,5 м, что соответствует абсолютным высотным отметкам 89,00–91,00 м, представлены известняками мощностью более 4,5 м.
- Гидрогеологические условия участка характеризуются наличием надюрского водоносного комплекса, подземные воды которого вскрыты на глубине 9,0–11,5 м, что соответствует абсолютным высотным

отметкам 140,00–141,00 м. Горизонт носит безнапорный характер.

На площадке строительства выделено 16 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Перечень ИГЭ и рекомендуемые физико-механические характеристики грунтов для модели Hardening Soil для программного комплекса (ПК) Plaxis представлены в табл. 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для уменьшения прогнозных деформаций основания здания в рамках исследования рассмотрены две технологии устройства дополнительных мероприятий [1–3].

Jet Grouting (струйная цементация) — технология усиления грунтов, основанная на использовании

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов для модели Hardening Soil для программного комплекса Plaxis

Номер и наименование ИГЭ	P_{ref}	Коэффициент переуплотнения OCR	Олометрический модуль деформации E_{ed}^{ref}	Степенной показатель зависимости жесткости от уровня напряжений m	Коэффициент бокового давления грунта K_{0nc}	Секущий модуль деформации E_{50}^{ref}	Модуль деформации повторного нагружения E_{ur}^{ref}	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент Пуассона повторного нагружения ν_{ur}	Угол дилатансии ψ
	кПа	–	МПа	–	–	МПа	МПа	–	–	град
ИГЭ-2а. Пески мелкие, рыхлые, влажные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	12,1	0,27	0,31	13,7	72,2	0,32	0,28	8,8
ИГЭ-2б. Пески мелкие с прослоями средней крупности, средней плотности, влажные и водонасыщенные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,1	0,33	0,29	21,6	107,0	0,32	0,25	6,0
ИГЭ-2в. Пески мелкие с прослоями средней крупности, плотные, влажные и водонасыщенные ($a, f^3-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,9	0,33	0,29	26,2	143,1	0,27	0,23	7,5
ИГЭ-4. Супеси пластичные песчанистые, с прослоями суглинков легких, песчанистых, с прослоями и гнездами песков средней крупности, с дресвой и щебнем ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	1,0	6,6	0,31	0,31	6,1	78,4	0,34	0,32	–
ИГЭ-4а. Пески средней крупности с прослоями крупных, местами глинистые, с прослоями суглинков и супесей, с дресвой и щебнем, средней плотности, водонасыщенные ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	–	15,5	0,24	0,28	17,8	121,3	0,30	0,27	8,8
ИГЭ-4б. Пески средней крупности с прослоями крупных, местами глинистые, с прослоями суглинков и супесей, с дресвой и щебнем, плотные, водонасыщенные ($f, lg-Q_{II}^{ms}$)	100	–	17,3	0,24	0,30	18,6	128,8	0,27	0,24	9,5
ИГЭ-5. Супеси пластичные, с прослоями суглинков, реже глин ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	290	1,9	28,8	0,28	0,65	24,2	157,8	0,30	0,28	–
ИГЭ-7а. Пески мелкие с прослоями пылеватых, средней плотности, водонасыщенные ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	100	–	12,9	0,32	0,32	18,5	118,9	0,30	0,26	8,6
ИГЭ-7б. Пески мелкие с прослоями пылеватых, плотные, водонасыщенные ($a, f-Q_I^{vk-ds}$)	100	–	17,2	0,28	0,34	23,7	152,4	0,31	0,24	11,1

Окончание табл. 1

Номер и наименование ИГЭ	P_{ref}	Коэффициент переуплотнения OCR	Одометрический модуль деформации E_{oed}^{ref}	Степенной показатель зависимости жесткости от уровня напряжений m	Коэффициент бокового давления грунта K_{0pc}	Секущий модуль деформации E_{50}^{ref}	Модуль деформации повторного нагружения E_{ur}^{ref}	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент Пуассона повторного нагружения ν_{ur}	Угол дилатансии ψ
	кПа	–	МПа	–	–	МПа	МПа	–	–	град
ИГЭ-8. Пески средней крупности с прослоями крупных, плотные с прослоями средней плотности, водонасыщенные (a,f–Q ₁ ^{vk-ds})	170	–	29,0	0,39	0,27	35,1	156,4	0,35	0,29	13,1
ИГЭ-10. Глины полутвердые, сильнопесчанистые, с частыми прослоями (переслаивание) песков пылеватых и мелких (J ₃ –K _{1p})	440	1,3	17,4	0,37	0,65	20,5	157,7	0,33	0,31	–
ИГЭ-11. Глины полутвердые с прослоями супесей и песков, с включением фосфоритов (J ₃ fl+eg)	400	1,5	13,2	0,61	0,52	17,3	139,5	0,41	0,34	–
ИГЭ-12. Глины полутвердые с прослоями твердых (J ₂₋₃ vd–er)	590	1,7	27,5	0,55	0,71	20,4	141,0	0,42	0,39	–

энергии высоконапорной струи цементного раствора [4–6].

Выделяют три разновидности технологии Jet Grouting [7]:

- Jet 1 (однокомпонентная) — для разрушения и смешивания используется только цементная струя. Диаметр колонн из грунтоцемента зависит от типа почвы: для глинистых грунтов — 500–600 мм, для песчаных — 700–800 мм;
- Jet 2 (двухкомпонентная) — цементная струя усиливается потоком сжатого воздуха, что увеличивает энергию и диаметр сваи. Особенно эффективна в глинистых грунтах, где требуется большая энергия для качественного перемешивания;
- Jet 3 (трехкомпонентная) — для разрушения и выноса частиц укрепляемого грунта используют двойную струю из воды и воздуха, после чего отдельной форсункой подают цементный раствор. Этот метод позволяет достичь максимальной прочности сваи и создавать элементы большого диаметра.

Преимущества технологии струйной цементации Jet Grouting [8]:

- предсказуемость результатов струйного укрепления грунтов;
- высокая производительность (до 300 пог. м Jet-свай в сутки);
- возможность работы в стесненных условиях (в подвальных помещениях, вблизи существующих зданий, на откосах) [9];

- возможность подведения Jet-свай под существующие фундаменты (позволяет через отверстие 100 мм выполнять сваи диаметром 300–700 мм);
- возможность устройства Jet-свай в обводненных грунтах.

Технология усиления грунтов с применением разрядно-импульсных свай (РИТ свай) (разрядно-импульсная технология) — метод устройства буринъекционных свай с помощью импульсного электрического тока.

Бетонную смесь, уложенную в скважину, подвергают импульсному воздействию электрического тока с применением специального излучателя. Высоковольтные электрические разряды вызывают электро-взрывы. Благодаря электрогидравлическому эффекту тело сваи расширяется на локальных участках, в том числе в районе пяты [10–14].

В результате [15]:

- диаметр скважины увеличивается в 2 раза и более;
- свая прочно держится в грунте и выдерживает высокие вертикальные и горизонтальные нагрузки;
- окружающий грунт уплотняется, цементируется, что добавляет прочности конструкции [16].

Преимущества РИТ:

- возможность ведения работ из нижнего помещения с высотой потолков не менее 2,4 м (из подвала, цокольного или первого этажей);
- возможность проходки без использования обсадной трубы на слабых грунтах при осыпании стен скважины;

Табл. 2. Сводная таблица результатов расчетов для выбора типа усиления основания

Проектное решение	Характеристики основания/ фундамента	Требуемая осадка, см	Количество свай на площадке размерами 10 × 10 м	Объем свай на площадке размерами 10 × 10 м при глубине толщи, равной длине свай/глубине массива, м³	Прогнозируемая осадка, см
Плита на естественном основании	ИГЭ-2б (см. рис. 2)	15	—	—	20,85
Плита на закрепленном массиве грунта методом Jet Grouting	$E = 261,95 \text{ МПа}$, размеры массива: $h = 12,8 \text{ м}$, $d = 0,6 \text{ м}$, шаг = 0,9 м		121	1548,8	9,87
	$E = 224,68 \text{ МПа}$, размеры массива: $h = 11,0 \text{ м}$, $d = 0,6 \text{ м}$, шаг = 0,9 м			1331	12,36
Сваи РИТ	$d = 350 \text{ мм}$, шаг = 1,4 м, длина = 15 м		49	735*	19,62
	$d = 350 \text{ мм}$, шаг = 1,4 м, длина = 25 м			1225*	8,8

Примечание: * — объем свай РИТ рассчитывался без учета уширений.

• несущая способность свай, изготовленных по РИТ, — до 2,5 раз выше, чем у свай, изготовленных по другим технологиям.

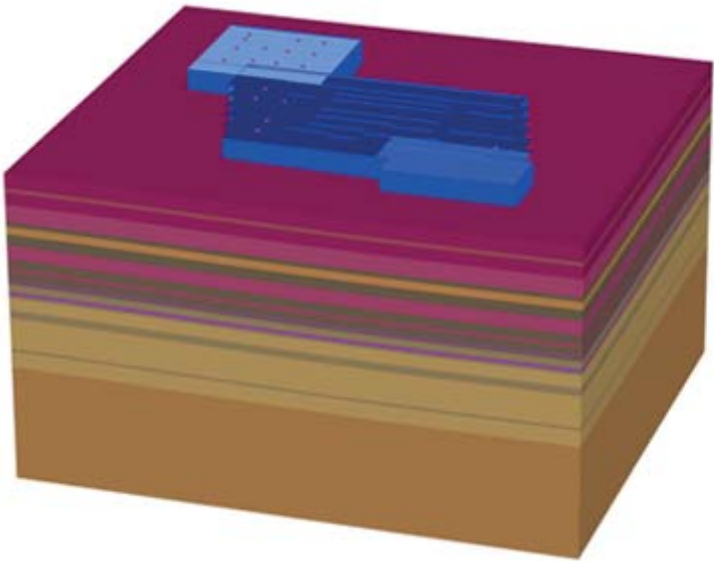
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выбора типа фундамента были произведены расчеты для нескольких вариантов, таких как:

1. Фундаментная плита на естественном основании.

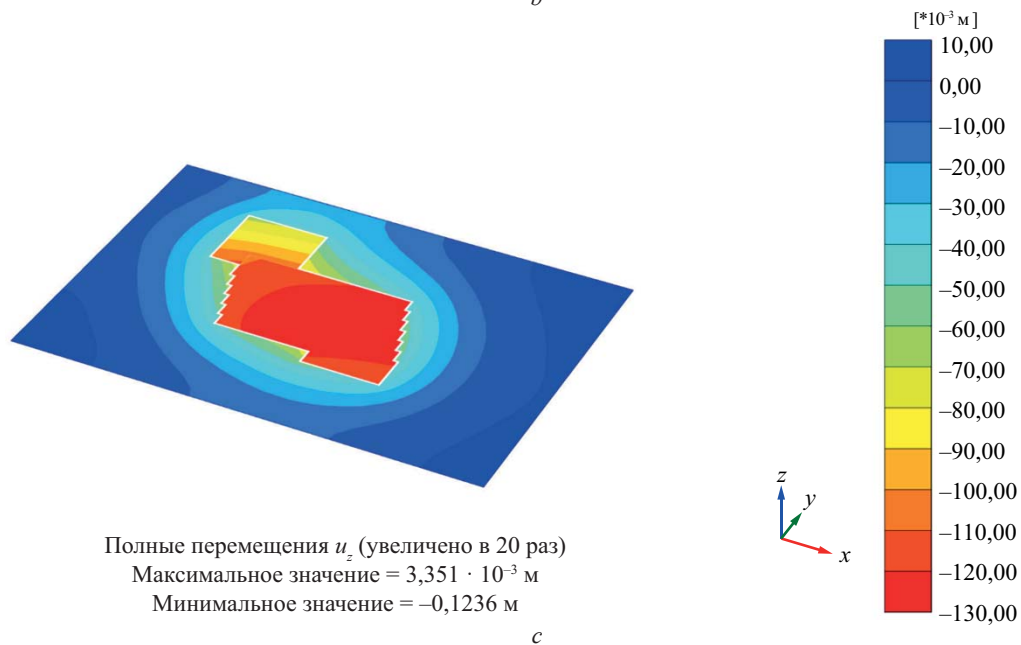
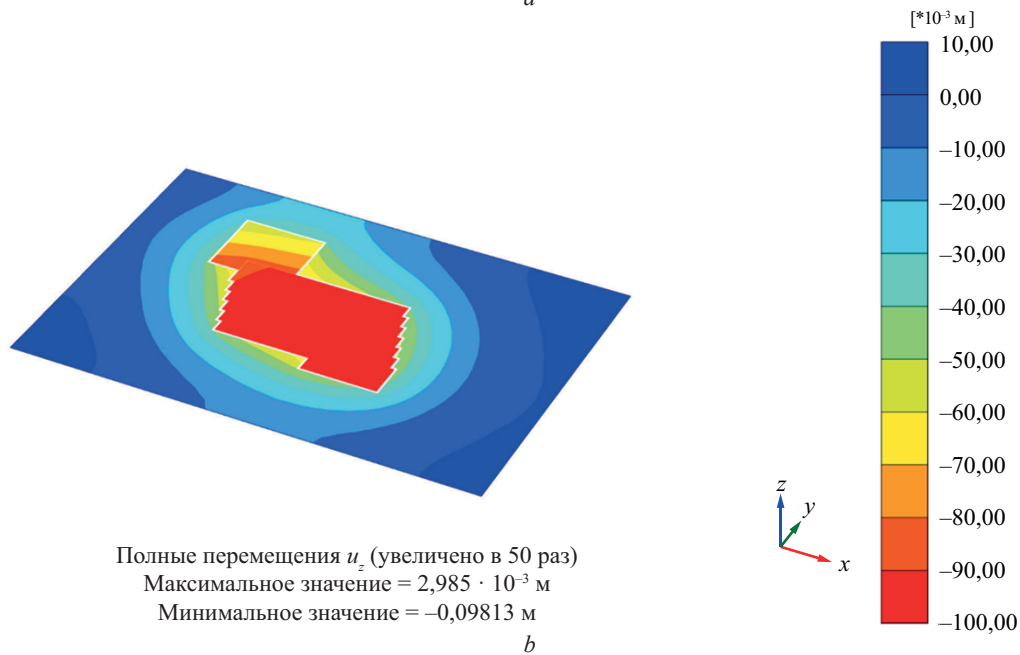
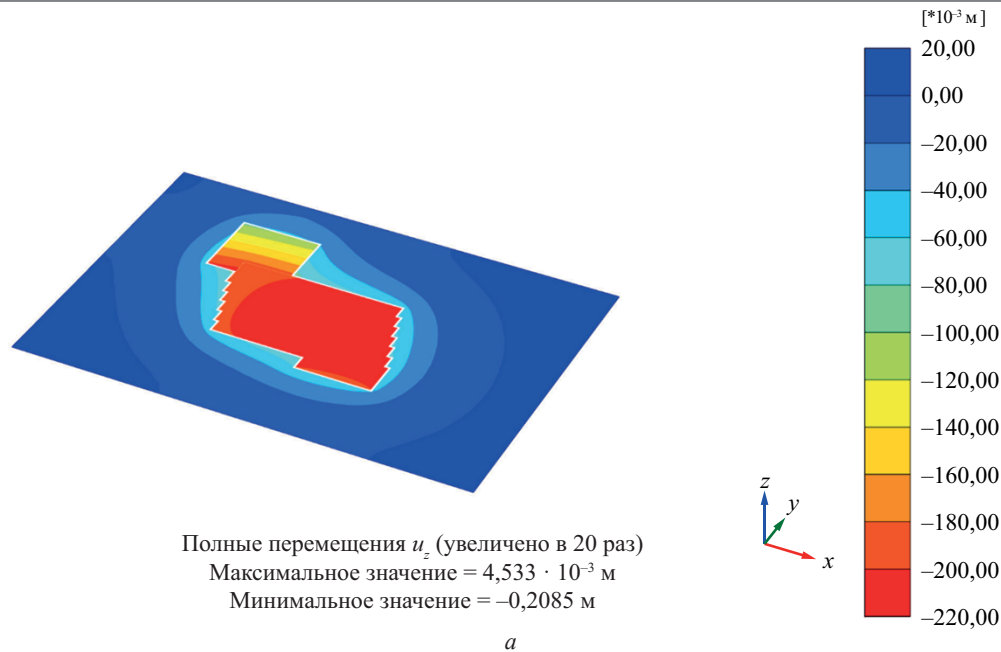
2. Усиление основания по технологии Jet Grouting:

- глубина устройства 15,0 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м;
- глубина устройства 12,8 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м;
- глубина устройства 11,0 м, шаг свай 0,9 м, диаметр свай 0,6 м.



Деформированная сетка $|u|$ (увеличено в 5 раз)
Максимальное значение = 0,3967 м (в узле 139 672)

Рис. 1. Расчетная схема



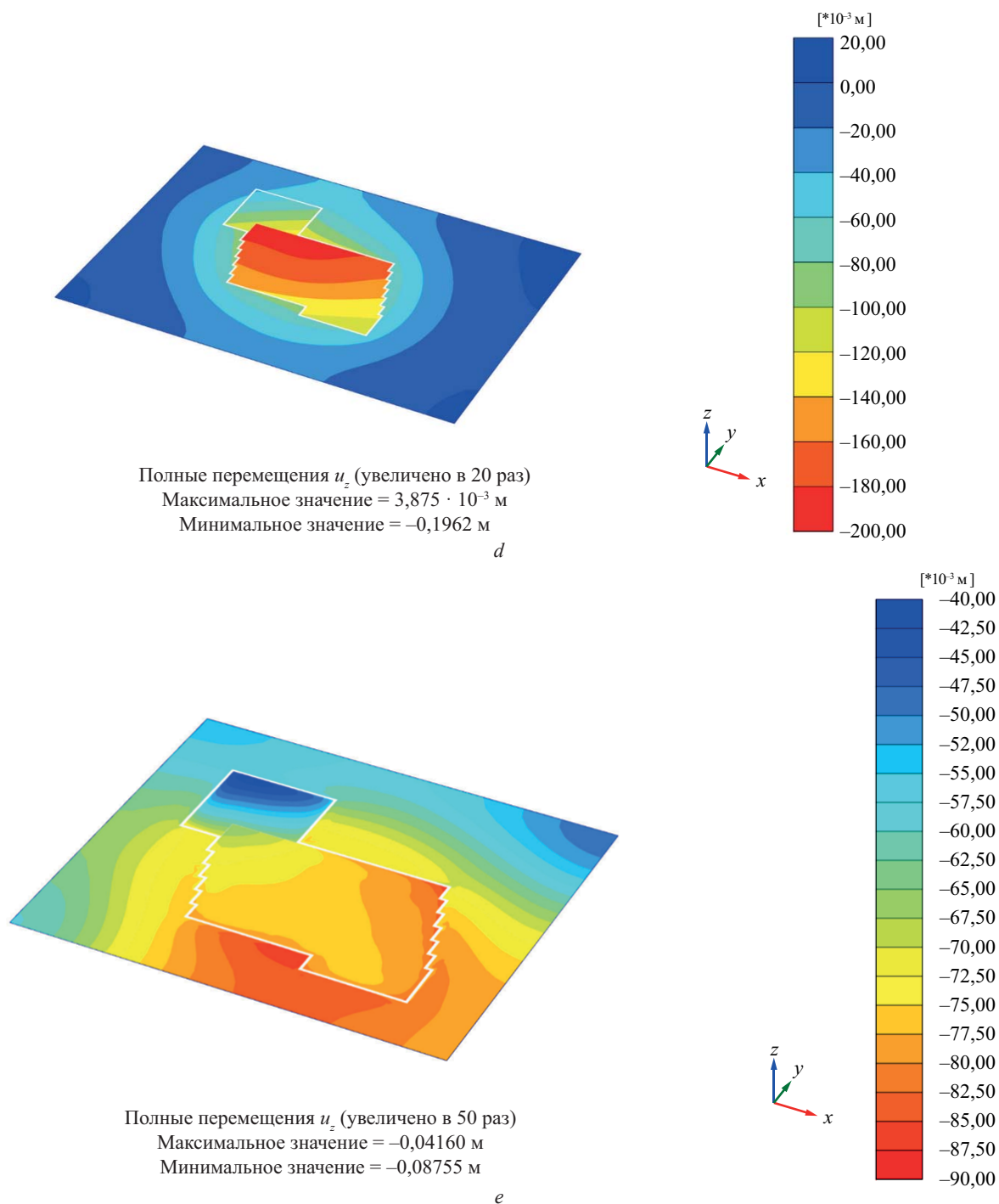


Рис. 2. Вертикальные перемещения: a — здания на естественном основании; b — основания при использовании технологии Jet Grouting на глубину 12,8 м; c — основания при использовании технологии Jet Grouting на глубину 11,0 м; d — основания при использовании свай РИТ на глубину 15,0 м; e — основания при использовании свай РИТ на глубину 25,0 м

3. Устройство фундаментов из свай РИТ:

- длина свай 15,0 м, шаг свай 1,4 м, диаметр свай 0,35 м;
- длина свай 25,0 м, шаг свай 1,4 м, диаметр свай 0,35 м.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Красным цветом выделены значения полученной расчетами осадки, превышающей допустимые. В табл. 2

также приведены количество и объемы свай на площадке 10×10 м, глубиной, принятой в зависимости от типа выбранных дополнительных мероприятий, равной глубине массива из Jet-свай и длине РИТ-свай.

По результатам оценки прогнозируемых деформаций проектируемого здания определено, что перемещения и относительные деформации фундамента на естественном основании превышают предельные

допустимые [17–20]. Требуется предусмотреть дополнительные мероприятия для обеспечения сохранности и безопасной эксплуатации проектируемого здания.

Сводная информация по результатам расчетов приведена в табл. 2.

Результаты расчетов в ПК Plaxis 3D приведены на рис. 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение дополнительных мероприятий на рассмотренной площадке строительства может способствовать минимизации прогнозируемых деформаций при возведении проектируемого здания.

2. Удовлетворение требований по второй группе предельных состояний может быть обеспечено при использовании различных вариантов дополнительных мероприятий:

- устройство грунтоцементного массива по технологии Jet Grouting в рассмотренных вариантах глубины 11,0 и 12,8 м;
- устройство свайного фундамента по технологии РИТ диаметром 350 мм с длиной свай 25 м по сетке $1,4 \times 1,4$ м.

3. Учитывая скорости производства работ при реализации различных вариантов, а также необходимые глубины свай, оптимальным решением в представленном случае является применение технологии Jet Grouting для усиления грунта основания на глубину 11,0 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Базаров Ж.В., Филиппова Е.В. Технологии цементационного закрепления грунтов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сб. ст. XXI Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 14–22. EDN RJSURE.

2. Щуклинов С.П., Нефедова В.К. Технология Jet-Grouting — современный метод строительства на слабых грунтах // Петербургская школа поточной организации строительства : I Всеросс. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения профессора Виктора Алексеевича Афанасьева. 2018. С. 88–92. EDN XWNMCD.

3. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 60–62. EDN NSDYTB.

4. Шашкин А.Г., Богов С.Г. Использование технологии Jet Grouting при устройстве подземного объема в условиях слабых глинистых грунтов // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 27–33. EDN SMVCNX.

5. Моисеева Ю.А., Токарева Ю.А., Калошина С.В. Сравнительная характеристика систем струйной цементации Jet-1, Jet-2, Jet-3 // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 1. С. 425–430. EDN XQZULB.

6. Прокопенко Д.В., Быховцев В.Е., Киргинцева С.В. Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2014. № 6 (87). С. 129–132. EDN TDOVON.

7. Тер-Мартirosян З.Г., Еремин В.Я., Буданов А.А. Обоснование методики расчета несущей способности грунта под нижним концом свай-РИТ // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики механики грунтов и фундаментостроения : мат. академических

чтений по геотехнике и Междунар. совещания ведущих кафедр. 2006. С. 122.

8. Кубецкий В.Л., Еремин В.И. Применение свай-РИТ в фундаментах высотных зданий // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 240–245. EDN PABGXJ.

9. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Способ контроля и прогнозирования параметров и прочности jet-свай при производстве работ // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 2 (13). С. 41–50. EDN YLGAMV.

10. Lomov P.O., Lanis A.L., Razuvaev D.A., Kavadakov M.G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions // Sciences in Cold and Arid Regions. 2021. Vol. 13. Issue 5. Pp. 357–365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040. EDN DKSADH.

11. Серова Е.А., Чунюк Д.Ю. Качественный анализ составляющих геотехнического риска при строительстве подземных и заглубленных сооружений // Вестник МГСУ. 2010. № 4–4. С. 136–143. EDN RTSDWZ.

12. Богданов А.С. Преимущества геотехнической технологии струйной цементации грунтов (Jet-Grouting) // Fundamental Science and Technology : сб. науч. ст. по мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 221–233. EDN UVAIBS.

13. Бондарь С.П., Чигарев А.Г. Технология jet-grouting: эффективное решение для фундаментов на слабых грунтах // Научный MEGAFEST 2025 : сб. ст. Междунар. науч.-исследов. конкурса. 2025. С. 13–17. EDN PЕННJT.

14. Быховцев В.Е., Прокопенко Д.В., Цурганова Л.А. Расчет РИТ-свай по первому предельному состоянию // Проблемы физики, математики и техники. 2015. № 3 (24). С. 90–93. EDN UNFMDL.

15. Галаветдинов В.З., Давиденко Б.Ю., Еремин В.В. Эффективность применения разрядно-импульсной технологии в сложных геологических

условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 181–186. EDN TJYGAV.

16. Triantafyllidis Th., Schäfer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2007. Vol. 2. Pp. 683–688.

17. Галимнурова О.В., Галимнуров И.П., Самофеев Н.С. К эффективности использования свай разрядно-импульсной технологии при реконструкции зданий и сооружений // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 2. С. 62. EDN TCESOD.

18. Чунюк М.С. Применение технологии jet-grouting при новом строительстве, как альтернатива традиционным свайным фундаментам // Экономика строительства. 2023. № 4. С. 264–266. EDN ZXOJ VX.

19. Грязнова Е.М., Гаврилов А.Н., Чунюк Д.Ю., Борчев К.С. Геотехнический мониторинг в строительстве : учебное пособие. М., 2016. 80 с. EDN ZGASEV.

20. Abbott K.W., Levi-Faur D., Snidal D. Theorizing regulatory intermediaries: The RIT model // The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science. 2017. Vol. 670. Issue 1. Pp. 14–35. DOI: 10.1177/0002716216688272

Поступила в редакцию 21 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 2 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Серафима Михайловна Сельвиан — старший преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1104084, Scopus: 57209301023, ORCID: 0000-0003-0288-0550; SelviyanSM@mgsu.ru;

Ульяна Олеговна Московкина — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; moskovkina.u@mail.ru;

Екатерина Алексеевна Софронова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; soka280204@gmail.com;

Дарья Дмитриевна Антропова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; antrdari@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The designed structure is an apartment building with an underground parking garage and plan dimensions ($L \times W$) of 48.65 × 38.5 m:

- number of stories: 25–45 above-ground and 2 underground (under the entire building area);
- building height: 81.3–151.35 m.

A two-level underground parking facility (a civil defense and emergency shelter) is constructed; it has:

- principal load-bearing structures: a cast-in-place reinforced concrete frame;
- limiting values of average settlement of foundation soils: $S_u = 15.0$ cm;
- depth of the compressible soil mass: 22.4 m.

The site is located on the third terrace above the floodplain. The terrain is relatively flat and artificially planned; its absolute ground-surface elevations are approximately 150.00–151.50 m.

Geologically, the site has Quaternary deposits of the following stratigraphic units stretching to a depth of 52.0 m (from top to bottom):

- anthropogenic soils (t-QIV) are found from the ground surface to a depth of approximately 0.5–2.0 m;

- Middle Quaternary alluvial-fluvioglacial deposits of the third terrace above the floodplain (a,f-QIIms) are found at the depths of 0.5–2.0 m, corresponding to absolute elevations of 149.50–151.00 m, and are represented by sands and loams with a total thickness of 10.0–15.0 m;

- Middle Quaternary fluvioglacial and lacustrine-glacial deposits (f,lg-QIIms) underlie the alluvial-fluvioglacial deposits at depths of 12.0–15.5 m, corresponding to absolute elevations of approximately 136.00–138.00 m, and are represented by sands, sandy loams, and loams with a thickness of 1.2–6.0 m;

- Lower Quaternary alluvial-fluvioglacial deposits: Vnukovo series of the Don horizon (a,f-QIVk-ds) are located at the depths of 14.5–17.0 m, corresponding to absolute elevations of 134.50–135.50 m, and are represented by sands, sandy loams, and loams with a thickness of 7.5–12.5 m.

At depths of 34.0–36.0 m below ground surface, corresponding to absolute elevations of 118.00–120.00 m,

the Quaternary deposits rest on bedrock deposits (from top to bottom):

- combined Lower Cretaceous deposits of the Kuntsevo and Lyubertsy members of the Berriasian, the Rostov Formation of the Lower Hauterivian, the Dyakovo Member, and the Savelievskaya and Gremyachevskaya formations of the Upper Hauterivian (K1kn-gr) underlie the Quaternary deposits and are represented by sands up to 2.0 m thick;
- Upper Jurassic–Lower Cretaceous deposits of the Lopatino Formation (J3-K1lp) occur at depths of 32.0–34.0 m, corresponding to absolute elevations of 114.00–116.00 m, and are represented by sands 2.0–4.0 m thick;
- undifferentiated Upper Jurassic deposits of the Filievskaya and Egoryevskaya formations (J3fl+eg) occur at depths of 37.5–39.0 m, corresponding to absolute

elevations of 111.00–113.50 m, and are represented by sands 2.0–4.0 m thick;

- Middle–Upper Jurassic deposits of the Velikodvorskaya–Ermolinskaya formations (J2-3vd-er) occur at depths of 40.0–42.0 m, corresponding to absolute elevations of 108.50–110.50 m, and are represented by clays 15.0–17.0 m thick;
- Middle Jurassic deposits of the Chulkovskaya Formation (J2chl) occur at depths of 57.0–58.0 m, corresponding to absolute elevations of 92.00–93.50 m, and are represented by sandy clays and clayey sands more than 3.0 m thick;
- Upper Carboniferous deposits of the Khamovniki Formation, upper (Neverovskaya) subformation (C3hm2), occur at depths of 57.0–59.5 m, corresponding to absolute elevations of 92.00–93.00 m, and are represented by clays with marl interlayers 1.0–3.0 m thick;

Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils for the Hardening Soil model in the Plaxis software package

EGE number and type	P^{ref}	Overconsolidation ratio OCR	Oedometer deformation modulus E_{oed}^{ref}	Power exponent of stiffness dependence on stress level m	Coefficient of lateral pressure at rest K_0^{nc}	Secant deformation modulus E_{50}^{ref}	Reloading deformation modulus E_{ur}^{ref}	Poisson's ratio ν	Poisson's ratio for reloading ν_{ur}	Dilatancy angle ψ
	kPa	–	MPa	–	–	MPa	MPa	–	–	deg
EGE-2a. Fine sands, loose, moist (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	12.1	0.27	0.31	13.7	72.2	0.32	0.28	8.8
EGE-2b. Fine sands with interlayers of medium sands, medium dense, moist and water-saturated (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	17.1	0.33	0.29	21.6	107.0	0.32	0.25	6.0
EGE-2c. Fine sands with interlayers of medium sands, dense, moist and water-saturated (a,f ³ –Q _{II} ^{ms})	100	–	17.9	0.33	0.29	26.2	143.1	0.27	0.23	7.5
EGE-4. Plastic sandy loams, with interlayers of light sandy loams, with interlayers and pockets of medium sands, with grus and crushed stone (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	1.0	6.6	0.31	0.31	6.1	78.4	0.34	0.32	–
EGE-4a. Medium sands with interlayers of coarse sands, locally clayey, with interlayers of loams and sandy loams, with grus and crushed stone, medium dense, water-saturated (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	–	15.5	0.24	0.28	17.8	121.3	0.30	0.27	8.8
EGE-4b. Medium sands with interlayers of coarse sands, locally clayey, with interlayers of loams and sandy loams, with grus and crushed stone, dense, water-saturated (f,l,g–Q _{II} ^{ms})	100	–	17.3	0.24	0.30	18.6	128.8	0.27	0.24	9.5

End of the Table 1

EGE number and type	P^{ref}	Overconsolidation ratio OCR	Oedometer deformation modulus E_{oed}^{ref}	Power exponent of stiffness dependence on stress level m	Coefficient of lateral pressure at rest K_0^{nc}	Secant deformation modulus E_{50}^{ref}	Reloading deformation modulus E_{ur}^{ref}	Poisson's ratio ν	Poisson's ratio for reloading ν_{ur}	Dilatancy angle ψ
	kPa	—	MPa	—	—	MPa	MPa	—	—	deg
EGE-5. Plastic sandy loams with interlayers of loams, less commonly clays (a,f– Q_I^{vk-ds})	290	1.9	28.8	0.28	0.65	24.2	157.8	0.30	0.28	—
EGE-7a. Fine sands with interlayers of silty sands, medium dense, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	100	—	12.9	0.32	0.32	18.5	118.9	0.30	0.26	8.6
EGE-7b. Fine sands with interlayers of silty sands, dense, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	100	—	17.2	0.28	0.34	23.7	152.4	0.31	0.24	11.1
EGE-8. Medium sands with interlayers of coarse sands, dense with medium-dense interlayers, water-saturated (a,f– Q_I^{vk-ds})	170	—	29.0	0.39	0.27	35.1	156.4	0.35	0.29	13.1
EGE-10. Semisolid clays, highly sandy, with frequent interlayers (interbedding) of silty and fine sands (J_3 – K_{lp})	440	1.3	17.4	0.37	0.65	20.5	157.7	0.33	0.31	—
EGE-11. Semisolid clays with interlayers of sandy loams and sands, with phosphorite inclusions (J_3fl+eg)	400	1.5	13.2	0.61	0.52	17.3	139.5	0.41	0.34	—
EGE-12. Semisolid clays with hard clay interlayers ($J_{2-3}vd-er$)	590	1.7	27.5	0.55	0.71	20.4	141.0	0.42	0.39	—

Table 2. Summarized results calculations required for selecting the foundation-soil improvement method

Design solution	Characteristics of foundation soil/ foundation	Required settlement, cm	Number of piles within a 10 × 10 m site area	Pile volume within a 10 × 10 m site area at the stratum depth equal to pile length/mass depth, m ³	Predicted settlement, cm
Foundation slab on natural ground	EGE-2b (see Fig. 2)	15	—	—	20.85
Foundation slab on a Jet Grouting-improved soil mass	$E = 261.95$ MPa, mass dimensions: $h = 12.8$ m, $d = 0.6$ m, spacing = 0.9 m		121	1,548.8	9.87
	$E = 224.68$ MPa, mass dimensions: $h = 11.0$ m, $d = 0.6$ m, spacing = 0.9 m			1,331	12.36
DPT piles	$d = 350$ mm, spacing = 1.4 m, length = 15 m		49	735*	19.62
	$d = 350$ mm, spacing = 1.4 m, length = 25 m			1,225*	8.8

Note: * — DPT pile volume calculation disregarded pile enlargements.

- Upper Carboniferous deposits of the Khamovniki Formation, lower (Ratmirovskaya) subformation (C3hm1), occur at depths of 59.0–62.5 m, corresponding to absolute elevations of 89.00–91.00 m, and are represented by limestones more than 4.5 m thick.

The hydrogeological conditions of the site are characterized by the presence of a supra-Jurassic aquifer complex. Groundwater was encountered at depths of 9.0–11.5 m, corresponding to absolute elevations of 140.00–141.00 m. The aquifer is unconfined.

A total of 16 engineering-geological elements (EGEs) were identified at the construction site. The list of EGEs and the recommended physical and mechanical characteristics of soils for the Hardening Soil model in the Plaxis software package are provided in Table 1.

MATERIALS AND METHODS

Two foundation-improvement technologies were considered in this study to reduce the predicted deformations of foundation soils [1–3].

Jet Grouting (jet grouting) is a ground improvement technology based on the energy of a high-pressure cement grout jet [4–6].

Three types of Jet Grouting technology are distinguished [7]:

- Jet 1 (single-fluid). Only a cement jet is used for cutting and mixing. The diameter of soil-cement columns depends on the soil type: 500–600 mm for clayey soils and 700–800 mm for sandy soils;
- Jet 2 (double-fluid). The cement jet is assisted by a compressed-air flow, which increases the energy and pile diameter. It is particularly effective in clayey soils, where greater energy is required for high-quality mixing;
- Jet 3 (triple-fluid). A double jet of water and air is used to cut the soil being improved and remove soil

particles, after which cement grout is supplied through a separate nozzle. This method ensures maximum pile strength and forms large-diameter elements.

Advantages of Jet Grouting [8]:

- predictable results;
- high productivity (up to 300 linear meters of jet piles per day);
- applicability in confined conditions (basements, near existing buildings, and on slopes) [9];
- possibility of installing jet piles beneath existing foundations (piles 300–700 mm in diameter can be constructed through a 100 mm opening);
- possibility of installing jet piles in water-saturated soils.

Ground improvement using discharge-pulse piles (DPT piles), also known as the discharge-pulse technology, is a method for constructing bored injection piles by means of pulsed electric current.

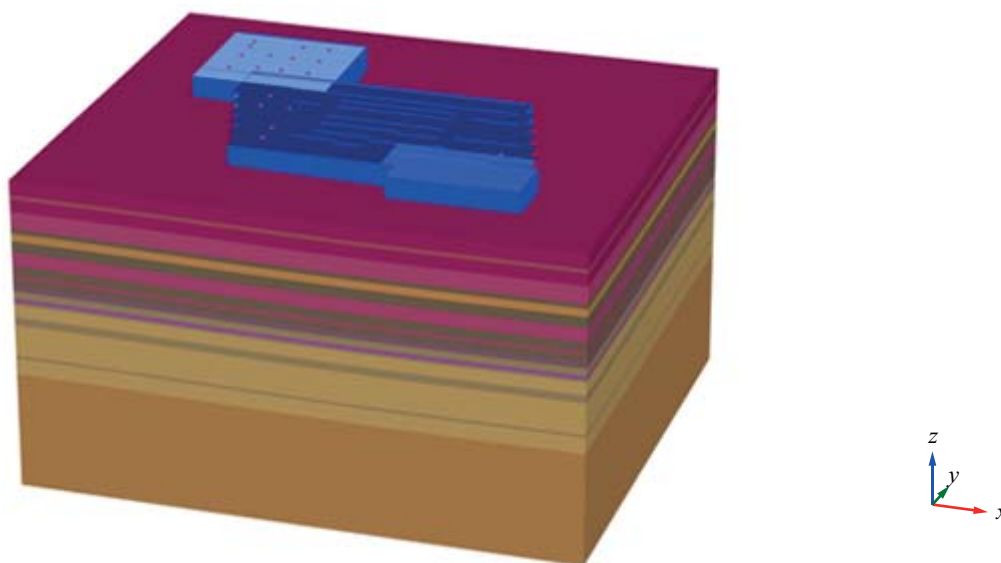
The concrete mix placed in a borehole is subjected to pulsed electric current using a special emitter. High-voltage electric discharges generate electric explosions. Owing to the electrohydraulic effect, the pile body expands locally, including in the toe zone [10–14].

As a result [15]:

- the borehole diameter increases by a factor of two or more;
- the pile is firmly anchored in the ground and can withstand high vertical and horizontal loads;
- the surrounding soil is compacted and cemented, which increases the strength of the structure [16].

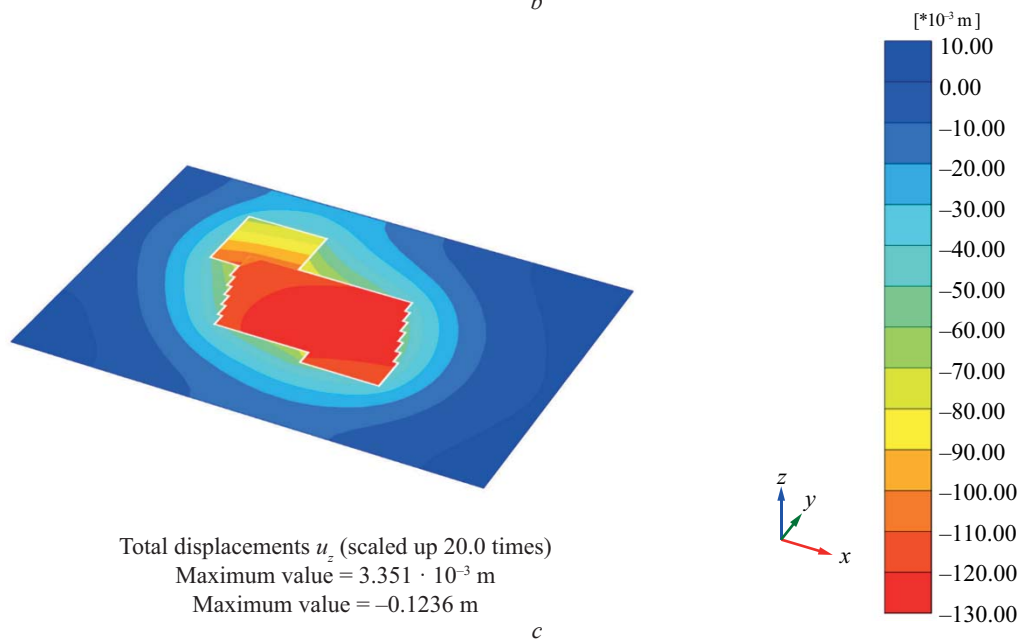
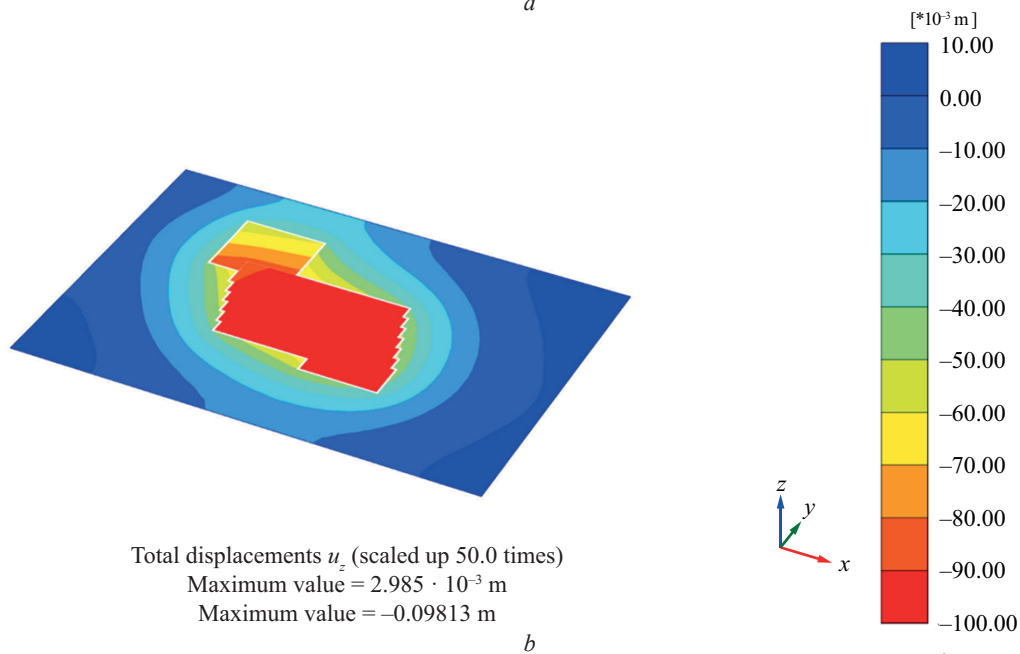
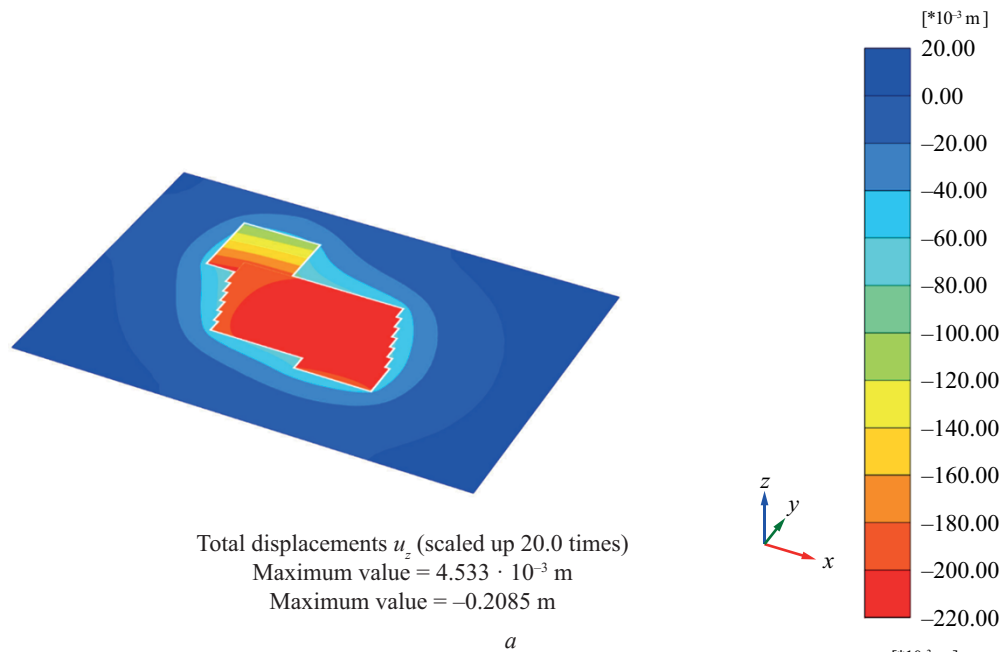
Advantages of DPT:

- work performance in a lower room with a ceiling height of at least 2.4 m (from a basement, semi-basement, or first floor);



Deformed mesh $|u|$ (scaled up 5.00 times)
Maximum value = 0.3967 m (at node 139,672)

Fig. 1. Calculation model



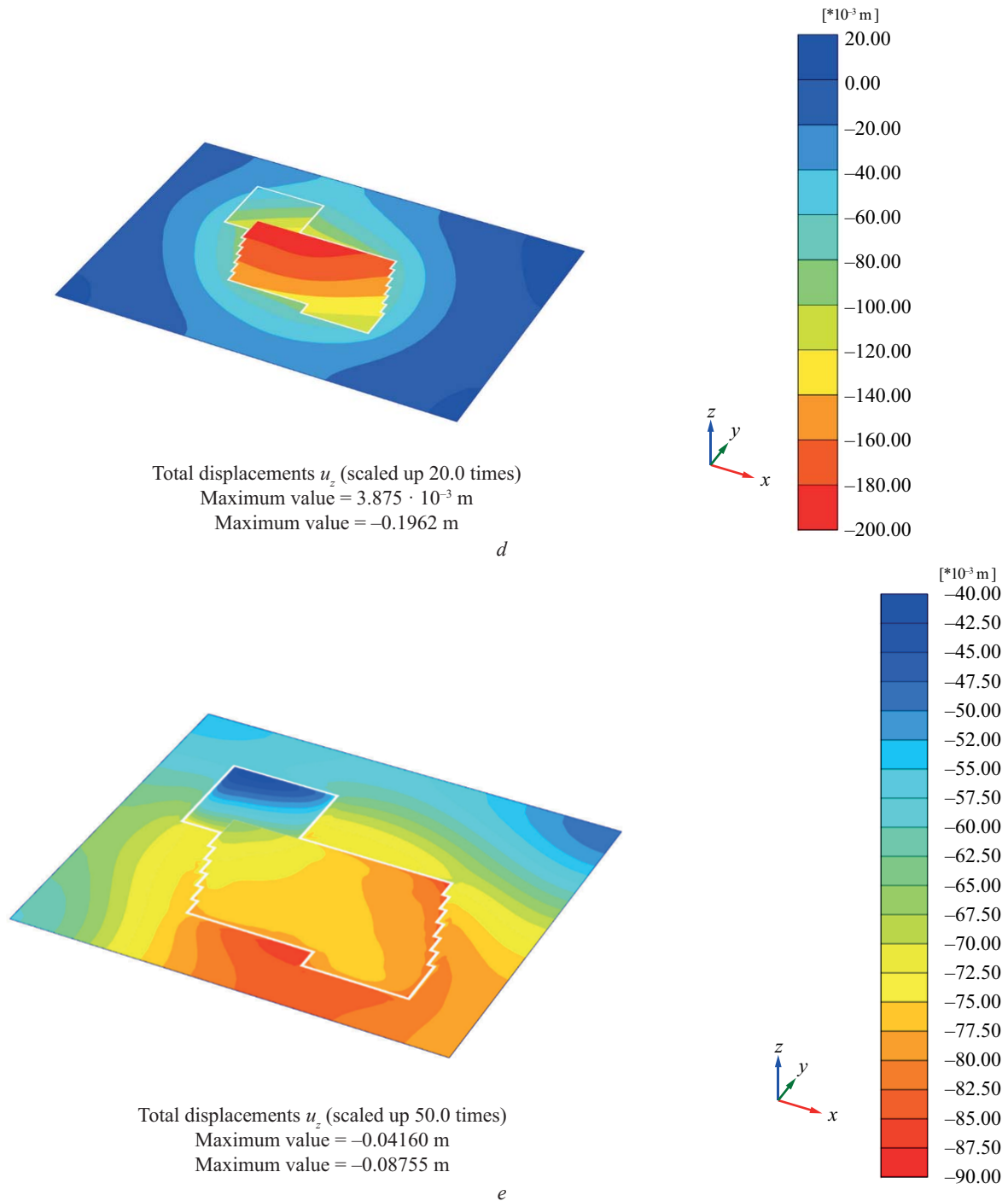


Fig. 2. Vertical displacements: *a* — building on natural ground; *b* — foundation soil improved by Jet Grouting to a depth of 12.8 m; *c* — foundation soil improved by Jet Grouting to a depth of 11.0 m; *d* — foundation soil with DPT piles driven to a depth of 15.0 m; *e* — foundation soil with DPT piles driven to a depth of 25.0 m

- drilling without casing in weak soils when bore-hole walls may collapse;
- the bearing capacity of piles constructed using DPT is up to 2.5 times higher than that of piles constructed using other technologies.

RESEARCH RESULTS

Calculations were made for the following alternative options to select the best foundation:

1. Foundation slab on natural ground.
2. Foundation-soil improvement using Jet Grouting:
 - installation depth of 15.0 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m;
 - installation depth of 12.8 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m;
 - installation depth of 11.0 m, pile spacing of 0.9 m, pile diameter of 0.6 m.

3. Construction of DPT pile foundations:
 - pile length of 15.0 m, pile spacing of 1.4 m, pile diameter of 0.35 m;
 - pile length of 25.0 m, pile spacing of 1.4 m, pile diameter of 0.35 m.

The calculation results are presented in Table 2. Settlement values exceeding the allowable value are highlighted in red. Table 2 also presents the number and volume of piles within a 10×10 m site area, with the depth depending on the type of additional measures selected and equal to the depth of the jet-pile mass or the length of the DPT piles.

Based on the assessment of predicted deformations of the designed building, it was established that displacements and relative deformations of the foundation on natural ground exceed the permissible limits [17–20]. Additional measures are required to ensure the integrity and safe operation of the designed building.

Summarized calculation results are provided in Table 2.

The Plaxis 3D calculation results are shown in Fig. 1 and 2.

CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from the study:

1. The use of additional measures at the considered construction site can help minimize predicted deformations during construction of the designed building.
2. The requirements for the second group of limit states can be satisfied using several options of additional measures:
 - construction of a soil-cement mass using Jet Grouting with depths of 11.0 and 12.8 m;
 - construction of a pile foundation using DPT with 350 mm diameter piles that are 25 m long in a 1.4×1.4 m grid.
3. Given the work performance rates for different options, as well as the required pile depths, the optimal solution in the presented case is to use Jet Grouting to improve the foundation soil to a depth of 11.0 m.

REFERENCES

1. Bazarov Zh.V., Filippova E.V. Technologies for soil stabilization via cement grouting. *Effective Building Structures: Theory and Practice : Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference*. 2021; 14-22. EDN RJSURE. (rus.).
2. Shchuklinov S.P., Nefedova V.K. Technology jet-grouting — modern method of construction on soft ground. *St. Petersburg School of Flow-Based Construction Organization : 1st All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of the Birth of Professor Viktor Alekseevich Afanasyev*. 2018; 88-92. EDN XWNMCD. (rus.).
3. Znamensky V.V., Chunyuk D.Yu., Morozov E.B. Construction of excavation retaining systems in constrained urban conditions. *Housing Construction*. 2012; 9:60-62. EDN NSDYTB. (rus.).
4. Shashkin A.G., Bogov S.G. Use of Jet Grouting technology for the construction of an underground space in weak clayey soils. *Housing Construction*. 2014; 9: 27-33. EDN SMVCNX. (rus.).
5. Moiseeva Y.A., Tokareva Y.A., Kaloshina S.V. Comparative characteristics of Jet Grouting systems Jet-1, Jet-2, Jet-3. *Modern Technologies in Construction: Theory and Practice*. 2018; 1:425-430. EDN XQZULB. (rus.).
6. Prokopenko D.V., Byhovtsev V.E., Kirgintseva S.V. Analytical method for determining the bearing capacity of the pile-rit in subgrade. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2014; 6(87):129-132. EDN TDOVON. (rus.).
7. Ter-Martirosyan Z.G., Eremin V.Ya., Budanov A.A. Justification of the calculation method for the bearing capacity of soil beneath the base of RIT-type friction piles. *Achievements, Problems, and Promising Directions in the Development of the Theory and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering : Proceedings of Academic Readings on Geotechnics and the International Meeting of Department Heads*. 2006; 122. (rus.).
8. Kubetskiy V.L., Eremin V.I. Application of rit piles in foundations of high-rise buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 4:240-245. EDN PABGXJ. (rus.).
9. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Method of control and forecasting parameters and strength of jet-piles at the production of works. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017; 2(13):41-50. EDN YLGAMV. (rus.).
10. Lomov P.O., Lanis A.L., Razuvaev D.A., Kavardakov M.G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021; 13(5):357-365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040. EDN DKSADH.
11. Chunyuk D.Yu. Qualitative analysis of components the geotechnical risk in underground construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2010; 4-4:136-143. EDN RTSDWZ. (rus.).
12. Bogdanov A.S. Advantages of the geotechnical technology of jet grouting. *Fundamental Science and Technology : Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2020; 221-233. EDN UVAIBS. (rus.).
13. Bondar S.P., Chigarev A.G. Jet-Grouting technology: an effective solution for foundations on weak soils. *Scientific MEGAFEST 2025 : Collection of articles from*

the International Research Competition. 2025; 13-17. EDN PEHHJT. (rus.).

14. Bykhoutsev V.E., Prokopenko D.V., Curganova L.A. Calculation of piles-cit on the first limiting condition. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 2015; 3(24):90-93. EDN UNFMDL. (rus.).

15. Galavetdinov V.Z., Davydenko B.Y., Eremin V.V. Effectiveness of discharge — pulse technology in complex geological conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015; 3:181-186. EDN TJYGAV. (rus.).

16. Triantafyllidis Th., Schäfer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations. *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2007; 2:683-688.

17. Galimnurova O.V., Galimnurov I.R., Samofeev N.S. To the efficiency of use discharge-pulse technology piles in the reconstruction of buildings and structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(2):62. EDN TCESOD. (rus.).

18. Chuniuk M.S. The use of jet-grouting technology in new construction, as an alternative to traditional pile foundations. *Construction Economics*. 2023; 4:264-266. EDN ZXOJXX. (rus.).

19. Gryaznova E.M., Gavrilo A.N., Chunyuk D.Yu., Borchev K.S. *Geotechnical monitoring in construction : textbook*. Moscow, 2016; 80. EDN ZGASEV. (rus.).

20. Abbott K.W., Levi-Faur D., Snidal D. Theorizing regulatory intermediaries: The RIT model. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*. 2017; 670(1):14-35. DOI: 10.1177/0002716216688272

Received December 21, 2025.

Adopted in revised form on February 5, 2026.

Approved for publication on March 2, 2026.

BIONOTES: **Serafima M. Selviyan** — Senior Lecturer at the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1104084, Scopus: 57209301023, ORCID: 0000-0003-0288-0550; SelviyanSM@mgsu.ru;

Ulyana O. Moskovkina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; moskovkina.u@mail.ru;

Ekaterina A. Sofronova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; soka280204@gmail.com;

Daria D. Antropova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; antrdari@yandex.ru.

Contributions of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors claim no conflict of interest.