

Сравнительный анализ методов расчетов фундаментов на просадочных грунтах

Надежда Сергеевна Никитина¹, Данила Александрович Кравченко²,
Надежда Вячеславовна Ремизова³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Сервис карьерных машин (СКМ); г. Москва, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проектирование свайных фундаментов на просадочных (лёссовых) грунтах представляет одну из наиболее актуальных задач в геотехнике. Широкое распространение таких грунтов и их высокая чувствительность к увлажнению создают риски значительных осадок и деформаций зданий. В связи с этим важно использование современных расчетных методов и моделей, которые позволяют более точно прогнозировать поведение оснований при различных эксплуатационных условиях.

Материалы и методы. Для анализа несущей способности свайных фундаментов применены два подхода: расчеты по нормативной документации и численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 2D. В качестве расчетной модели грунта выбрана Hardening Soil, учитывающая упругие и пластические свойства, а также влияние замачивания и уплотнения. Моделировались буронабивные сваи с уширенной пятой, что дает возможность более реалистично оценивать взаимодействие свай с грунтом.

Результаты. Численные расчеты показали, что при замачивании грунтов максимальная осадка увеличивается с 6,38 до 14,58 см, а при учете собственного веса грунта — до 15,21 см, что приближается к предельно допустимым значениям по СП 22.13330.2016. Использование свай с уширением позволило добиться более равномерного распределения нагрузок и уменьшения деформаций. Дополнительно рассмотрены методы снижения просадочности, включая предварительное замачивание, упрочнение грунтов и дренажные мероприятия.

Выводы. Результаты моделирования подтвердили эффективность применения модели Hardening Soil для анализа осадок на просадочных грунтах. Использование буронабивных свай с уширенной пятой и инженерных мероприятий по упрочнению основания способствуют уменьшению осадок до нормативных значений, обеспечивая надежность и долговечность сооружений. Исследование подчеркивает актуальность комплексного подхода при проектировании фундаментов на сложных грунтах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: просадочные грунты, моделирование осадки, PLAXIS 2D, модель Hardening Soil, модель Soft Soil, модель Мора – Кулона, свайные фундаменты, свайные с уширением фундаменты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина Н.С., Кравченко Д.А., Ремизова Н.В. Сравнительный анализ методов расчетов фундаментов на просадочных грунтах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1083–1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1083-1094

Автор, ответственный за переписку: Надежда Вячеславовна Ремизова, nadevya@yandex.ru.

Comparative analysis of methods of calculation of foundations on subsidence soils

Nadezhda S. Nikitina¹, Danila A. Kravchenko², Nadezhda V. Remizova³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Quarry Machine Service; Moscow, Russian Federation;

³ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Design of pile foundations on subsidence (loess) soils is one of the most urgent tasks in geotechnics. The widespread use of such soils and their high sensitivity to moistening create risks of significant settlements and defor-

mations of buildings. In this regard, it is important to use modern calculation methods and models that allow more accurate prediction of the behaviour of foundations under different operating conditions.

Materials and methods. Two approaches were used to analyze the bearing capacity of pile foundations: calculations according to the normative documentation and numerical modelling in the PLAXIS 2D software package. Hardening Soil was chosen as the design soil model, which takes into account elastic and plastic properties, as well as the influence of soaking and compaction. The bored piles with a widened heel were modelled, which allows for a more realistic assessment of the interaction between the piles and the soil.

Results. Numerical calculations showed that when soils are soaked, the maximum settlement increases from 6.38 to 14.58 cm, and when taking into account the soil's own weight — up to 15.21 cm, which is close to the maximum permissible values according to SP22.13330.2016. The use of widened piles made it possible to achieve a more uniform distribution of loads and reduce deformations. In addition, methods for reducing subsidence are considered, including preliminary soaking, soil strengthening and drainage measures.

Conclusions. The simulation results confirmed the effectiveness of the Hardening Soil model for analyzing settlements on subsidence soils. The use of bored piles with a widened heel and engineering measures to strengthen the foundation helps to reduce settlements to standard values, ensuring the reliability and durability of structures. The work emphasizes the importance of an integrated approach to the design of foundations on complex soils.

KEYWORDS: subsidence soils, settlement modelling, PLAXIS 2D, Hardening Soil model, Soft Soil model, Mohr – Coulomb model, pile foundations with expansion

FOR CITATION: Nikitina N.S., Kravchenko D.A., Remizova N.V. Comparative analysis of methods of calculation of foundations on subsidence soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1083-1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1083-1094 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda V. Remizova, nadevya@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос проектирования фундаментов в условиях просадочных (лессовых) грунтов является актуальным, учитывая большое распространение таких грунтов, они занимают примерно 17 % территории Российской Федерации. Проблематика расчетов и математического моделирования активно обсуждается и за рубежом [1–5]. Неоднородность осадок фундаментов при строительстве на просадочных грунтах, а также их чувствительность к увлажнению вызывают трудности при математическом моделировании, что дает широкое поле для развития и совершенствования работы расчетчика в программных комплексах.

На рис. 1 проиллюстрированы сведения о распространении лессовых грунтов в России [6–11].

Затраты на устройство фундаментов обычно составляют от 10 до 20 % общей стоимости строительства, однако в условиях сложных грунтов, таких как просадочные, эти расходы могут увеличиваться до 15–25 %. Это, в свою очередь, влечет за собой рост стоимости конечного строительного продукта. Оценка геологических условий строительной площадки и тщательное проектирование фундамента позволяют существенно сократить расходы и снизить итоговую стоимость здания или сооружения.

Принимая во внимание распространенность лессовых грунтов, важна разработка эффективных технологий устройства фундаментов на таких основаниях. Указанная тематика стала предметом исследований ряда отечественных ученых, таких как Ю.М. Абелев,

Источник информации: Инженерно-геологическая карта Российской Федерации, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2010 г.
Ответственный исполнитель: С.Н. Чепрыгина
Source of information: Engineering geolical map of the territory of the Russian Federation, FSA "VSEGINGEO", 2010
Responsible executive: S.N. Chepygina



Рис. 1. Карта распространности просадочных грунтов на территории Российской Федерации [1]

Fig. 1. Map of the prevalence of subsidence soils on the territory of the Russian Federation [1]

М.Ю. Абелев, А.М. Абелева, И.В. Аверин, Д.Ю. Чунюк и др. [12–22].

Сравнительный анализ осадок различных типов фундаментов, применяемых на лёссовых грунтах, представляет интерес как для практического, так и теоретического подхода. В настоящей статье приведены результаты компьютерного моделирования, в которых проанализированы осадки фундаментов, выполненных с использованием буронабивных свай с уширенной пятой, в сравнении с данными по существующим зданиям. Такие расчеты позволяют выявить оптимальные технологические решения для возведения фундаментов в просадочных грунтах [23–25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы возведения фундаментов на просадочных грунтах требуют особого подхода из-за специфических физических и механических свойств таких грунтов, которые делятся в основном на три основных типа:

1. Прорезание толщи просадочного грунта сваями.

Часто при строительстве на просадочных (лёссовых) грунтах применяют свайные фундаменты различных конструкций и видов. Это, прежде всего, сваи забивные, вдавливаемые, набивные в пробитых скважинах, прочие сваи с уширениями, как утверждают В.И. Крутов, А.С. Ковалев, В.А. Ковалев [24]:

- забивные сваи, которые используются для создания жесткой структуры, способной передавать нагрузки через просадочный грунт на более устойчивые слои, что дает возможность минимизировать осадку и повысить общую стабильность сооружения;
- вдавливаемые сваи, которые занимают меньше пространства и могут быть установлены в ограниченных условиях, обеспечивая надежную опору для фундаментов;
- набивные сваи, они размещаются в предварительно пробитых скважинах.

Также продолжается разработка новых конструкций свайных фундаментов, используемых при возведении зданий и сооружений на лёссовых грунтах. В качестве примера можно привести работу Ф.Г. Габиева [25].

Использование свайного фундамента позволяет передать нагрузку на более глубокие и стабильные слои грунта, нивелируя тем самым влияние просадочных грунтов.

2. Уплотнение или закрепление просадочного грунта.

Уплотнение просадочных грунтов может включать в себя различные техники, направленные на увеличение их плотности и снижение подвижности. Это могут быть такие методы, как:

- механическое уплотнение с помощью вибрационных установок;

- использование специальных добавок для химического закрепления грунта;
- предварительное замачивание и пригрузка просадочного основания.

Эти методы предназначены для уменьшения просадочности и повышения несущей способности грунтов, а также улучшения их механических свойств. Применение различных способов стабилизации, таких как инъекции цементного раствора или геосинтетиков, помогают повысить несущую способность грунта и снизить его восприимчивость к увлажнению.

3. Метод устройства грунтовых подушек.

Данный метод включает в себя замену просадочного грунта на непросадочный. Это достигается созданием искусственного основания, которое помогает снизить риск деформации. Подушки могут быть выполнены из песка, щебня или других непросадочных материалов. Такой подход не только улучшает стабильность фундамента, но и может уменьшить риски, связанные с динамическими нагрузками.

Поскольку проектирование фундаментов на просадочных грунтах требует комплексного подхода, учитывающего как свойства грунта, так и специфические нагрузки, действующие на основание, важно использование разнообразных методов, в том числе современных технологий, которые позволяют обеспечить безопасность и повысить надежность строений, расположенных на этих сложных грунтах. Открытость к новым подходам и внедрение инноваций по-прежнему имеют решающее значение для успешного проектирования и строительства.

Разработка методов устройства фундаментов на просадочных, или лёссовых, грунтах представляет собой сложную и многоаспектную задачу. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые зависят от конкретных условий проектирования и характеристик грунта.

Основная проблема, возникающая при проектировании фундаментов на грунтах со II типом просадочности, — недооценка влияния дополнительных нагрузок, передаваемых на сваи нагружающего трения, возникающего при просадке грунтов от их собственного веса. Для устранения или уменьшения воздействия сил нагружающего трения на сваю применяют различные способы:

- устройство свайных фундаментов из асбестоцементных труб, что дает возможность уменьшить силы негативного трения на 20–30 % [26];
- использование отхода очистки масел — гудри — в качестве смазки свай, что позволяет снять силы нагружающего трения;
- метод, разработанный Ф. Габиевым, — устройство свай в оболочках из утилизированных покрышек.

Численное моделирование

Численное моделирование на таких платформах, как PLAXIS 2D, позволяет получить более

точные результаты и прогнозировать поведение фундамента в различных условиях. Это особенно актуально для оценки осадки фундамента, которая может существенно повлиять на устойчивость здания и его долговечность. Моделирование помогает решить следующие задачи: расчета осадки, где важно дать ее верную оценку при различных нагрузках и грунтовых условиях; анализа сдвиговых напряжений; дать оценку устойчивости, при которой может произойти разрушение грунта.

Невозможность выделить один универсальный метод, подходящий для всех условий, подчеркивает значимость разработки индивидуальных решений, основанных на местных геологических и гидрогеологических условиях. Исследования, проводимые в данной области, продолжают способствовать созданию более надежных и экономически эффективных методов строительства фундаментов на просадочных грунтах. Таким образом, применение современных программных комплексов в сочетании с теоретическими исследованиями является эффективным в части реализации экономически выгодных проектов.

Задача, решенная авторами, позволяет детально изучить значимость методологического подхода в проектировании фундаментов специализированных зданий, таких как многофункциональные комплексы, особенно при наличии таких специфических геологических условий, как в приведенном далее случае. Рассмотрим ключевые аспекты, связанные с проектированием и моделированием фундамента в сложных геологических условиях.

При изучении инженерно-геологического строения принятого в исследовании участка пробурено 28 скважин глубиной 55–60 м. В ходе изысканий выявлены четвертичные отложения различного генезиса и возраста. В результате анализа проведенных опытных, лабораторных и буровых работ, а также изучения архивных материалов, на площадке изысканий для строительства многофункционального комплекса было выделено 20 инженерно-геологических элементов. Пример одного из разрезов показан на рис. 2.

Расчетная модель

Рассматривая процесс откопки котлована и последующее строительство, следует учесть множество факторов:

1. Типы элементов модели: использование плоских или объемных элементов для свайного поля в программном обеспечении, таком как PLAXIS 2D, имеет свои нюансы. Объемные элементы лучше воспроизводят реальное распределение усилий, поскольку учитывают фактическую толщину свай и ростверка, что уменьшает вероятность завышенных расчетных значений усилий в сваях.

2. Создание так называемой фиктивной плиты, что является важным этапом, позволяющим обеспечить правильное функционирование элементов

Embedded Beam. Фиктивная плита, механически выполняющая функцию бетонной подготовки, обеспечивает необходимые соединения между ростверком и сваями, что обеспечит более надежное распределение нагрузок и уменьшит вероятность возникновения потенциально аварийных ситуаций в дальнейшем.

3. Сборка схемы: в процессе моделирования необходимо установить адекватные нагрузочные схемы, чтобы учесть как статические, так и динамические воздействия на здание, что включает в себя анализ не только вертикальных, но и горизонтальных нагрузок, которые могут действовать на сооружение в процессе эксплуатации, как было установлено Р.А. Мангушевым, И.П. Дьяконовым, В.М. Полуниным [27].

Таким образом, видно, что моделирование фундамента требует комплексного подхода, учитывающего геологическое строение, механические свойства материалов и влияние внешних факторов. Правильное использование специализированных программных средств, таких как PLAXIS, не только облегчает понимание проектируемой конструкции, но и значительно уменьшает риски, связанные с деформациями и разрушениями фундаментов. Важно регулярно проводить верификацию расчетов на основании реальных данных, полученных из полевых исследований и лабораторных испытаний, чтобы гарантировать надежность и безопасность сооружения в целом.

В описываемом расчете моделировались буронабивные сваи $d = 1000$ мм с уширенной пятой $d = 1600$ мм. Шаг свай $3d = 3 \cdot 1 = 3$ м. Сваи объединены бетонным ростверком толщиной 1 м.

Габариты соответствующего здания в плане составляют 65×45 м. Смоделирована развитая подземная часть, представленная двухэтажной парковкой. Вышележащие конструкции при моделировании заменены нагрузкой. В качестве ограждения котлована используется стена в грунте толщиной 800 мм и глубиной 14 м. Стена в грунте дополнительно укреплена грунтовыми анкерами.

Из-за наличия высокого уровня подземных вод предусмотрены мероприятия по осушению и водопонижению. Дополнительно выполнены мероприятия по защите конструкций от воздействия подземных вод.

В качестве модели для грунтовых условий выбрана модель Hardening Soil (HS, модель упрочняющегося грунта), позволяющая в данном случае учитывать упрочнение при сдвиге и сжатии.

Модель Soft Soil для подобных расчетов не применяется, так как из-за необходимости проведения только компрессионных испытаний и дальнейшего автоматического моделирования программой поведения грунта в условиях трехосного сжатия неточно отображает поведение грунта при устройстве котлованов. Такая модель наиболее применима при расчете насыпей и оснований для них. В иных случаях (таких, как, например, рассматриваемая задача) рекомендуется модель Hardening Soil [28].

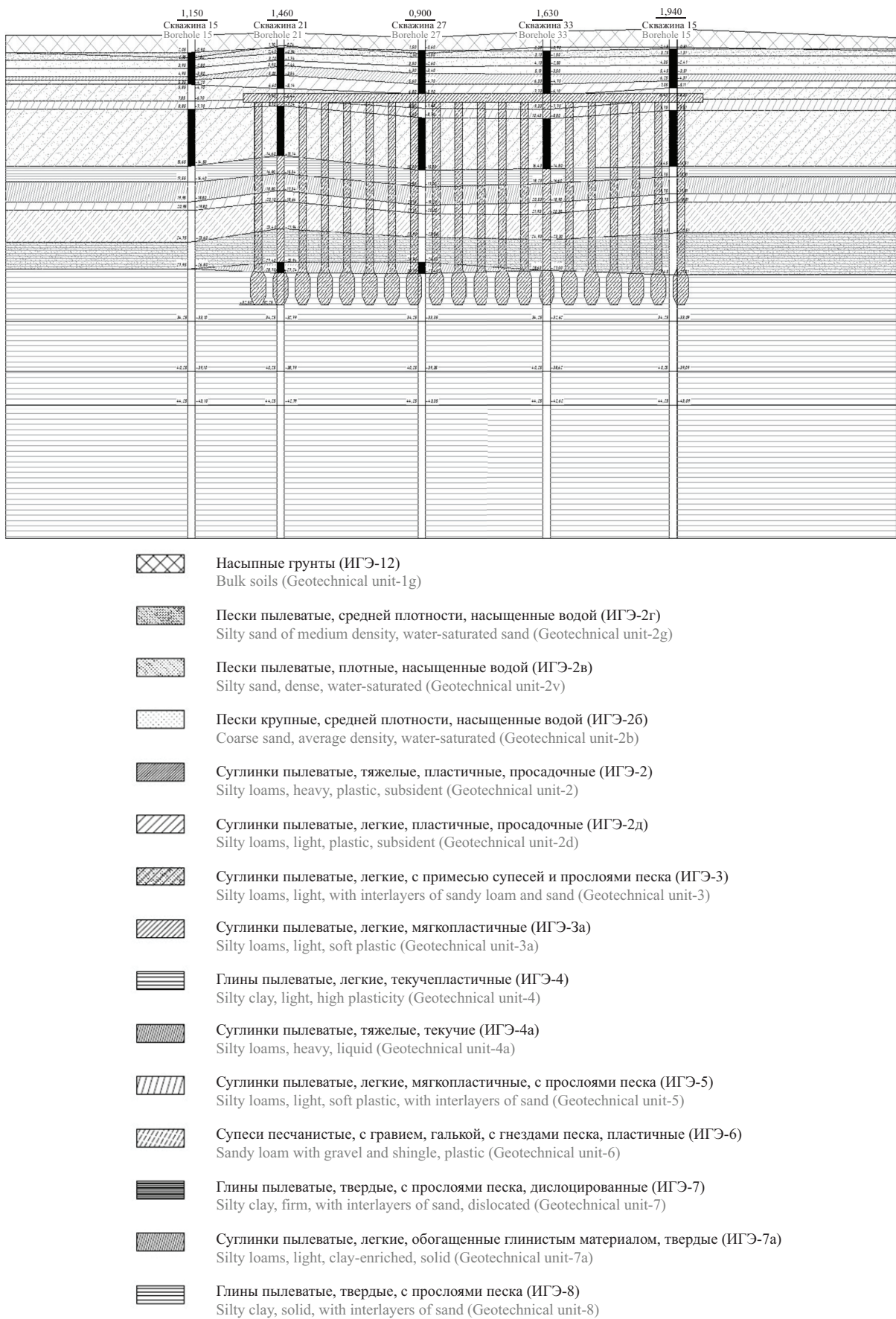


Рис. 2. Геологический разрез на основе пяти скважин

Fig. 2. Geological section based on five wells

Для успешного проведения расчетов на просадку и анализа несущей способности свай в PLAXIS 2D необходимо рассмотреть несколько ключевых аспектов, которые дадут возможность оптимизировать проект и гарантировать выполнение требований строительных норм и правил. При II типе просадочности, когда просадки происходят в том числе от величины собственного веса и превышают 5 см, требуется определить величину просадочной толщи. При этом следует учитывать значения относительной просадочности ϵ_{sl} , которые в рассматриваемом случае находятся в широком диапазоне от значений, меньших 0,001 до 0,071 (для ИГЭ-2).

Принимаем глубину просадочной толщи, равной $H_c = 27,7$ м, до ИГЭ-8 согласно СП 22.13330.2016¹:

Расчет просадки производится по формуле:

$$s_{sl} = \sum \epsilon_{sl,i} \cdot h_i \cdot k_{sl,i}$$
 (1)

При получившемся коэффициенте $k_{sl} = 1$ осадка s_{sl} составила 8,2 см.

Оценка просадочной толщи

В соответствии с условиями, установленными в СП 22.13330.2016, необходимо определить просадочную толщу в пределах $H_c = 27,7$ м до уровня ИГЭ-8. Отметим, что при расчете осадок важно учитывать величину относительной просадочности ϵ_{sl} , которая колеблется между 0,001 и 0,071 для II типа просадочности. Это значение напрямую влияет на расчет максимальной осадки здания и соответственно требует корректного выбора конструктивных решений.

Оценка максимальной осадки

Согласно приложению Г1 СП 22.13330.2016¹, максимальная осадка не должна превышать 15 см.

Для выполнения этого условия необходимо обеспечить подбор свайного поля с учетом геологических условий и свойств грунтов, чтобы минимизировать осадочные деформации, возникающие от собственных нагрузок конструкции. Способы уменьшения осадки могут включать:

- оптимизацию проектирования свай: использование свай с большими диаметрами и уширениями для повышения устойчивости и несущей способности;
- усиление грунтов: применение различных методов, таких как инъекционная замена или механическое уплотнение, позволяющие повысить прочностные характеристики грунта.

Характеристики грунтов для расчета просадочности приведены в таблице.

Моделирование уширенной пяты свай

Стоит отметить, что PLAXIS 2D не позволяет моделировать переменные диаметры свай напрямую, поэтому необходимо использовать индивидуальные элементы для моделирования уширенной пяты, что позволит получить более точные результаты по взаимодействию свай с грунтом и уточнить характеристики осадочных деформаций.

При моделировании уширения сваи была реализована следующая последовательность:

- этап 1. Моделирование основной части сваи в соответствии с внутренними графическими данными о геометрии и механических свойствах;
- этап 2. Создание отдельного элемента, представляющего уширение, и его интеграция с основным элементом сваи на этапе работы;
- этап 3. Анализ взаимодействия грунта и свай с учетом расчетных нагрузок и коэффициентов, соответствующих условиям эксплуатации.

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83, п. 6.1.16.

Характеристики грунтов для расчета просадочности

Soil characteristics for calculating subsidence

Номер слоя Layer number	Номер инженерно-геологического элемента Geotechnical unit number	Толщина слоя h , м Layer thickness h , m	Относительная просадочность ϵ_{sl} Relative drawdown ϵ_{sl}	Коэффициент k_{sl} Coefficient k_{sl}
1	1Г / g	1,8	0,002	1
2	2Г / g	0,9	0,001	
3	2В / v	1	0,001	
4	2Б / b	1	0,001	
5	2	0,4	0,071	
6	2Д / d	0,5	0,063	
7	3	2	0,001	
8	3а	1	0,001	
9	3	6,8	0,001	
10	4	1,9	0,001	
11	4а	2,4	0,001	
12	5	1	0,001	
13	6	3,8	0,001	
14	7	3,2	0,001	

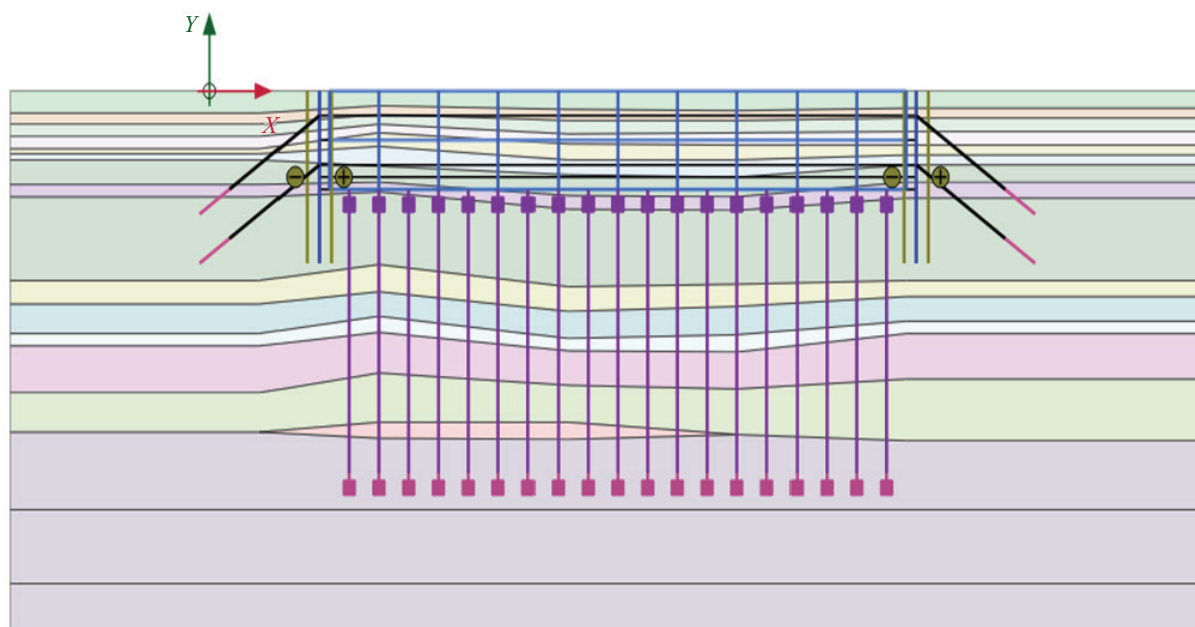


Рис. 3. Расчетная модель задачи в PLAXIS 2D

Fig. 3. Calculation model of the problem in PLAXIS 2D

Расчет несущей способности свай

Согласно СП 24.13330.2011², для определения несущей способности свай по грунту используются различные методы, включая расчет сопротивления по боковой поверхности и сопротивление на основании. Исходя из данного подхода, можно формулировать следующие параметры:

- несущая способность может быть оценена с учетом деформационных характеристик грунта, что важно для оценивания состояния фундамента в условиях просадки;
- для более точного прогнозирования несущей способности свай применяется методика, учитывающая не только статические, но и динамические нагрузки.

Поскольку PLAXIS не позволяет моделировать свайные элементы с переменным диаметром, принято решение смоделировать уширение отдельным элементом и на этапе включения свай в работу активировать оба элемента (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно п. 7.2.2 СП 24.13330.2011, несущая способность свай по грунту равна²:

$$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cr} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (2)$$

где $\gamma_c = 1$ — коэффициент условий работы свай; $\gamma_{cr} = 1$ — коэффициент условий работы грунта под нижним концом свай; $R = 3780$ кПа — расчетное сопротивление грунта под нижним концом свай; $A = 2,01$ м² — площадь опирания свай; $u = \pi D = 3,14 \times 1 = 3,14$ м — наружный периметр поперечного сечения

стволов; $\gamma_{cf} = 0,8$ — коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности свай (для буровой свай).

Итого несущая способность свай:

$$F_d = 1 \cdot (1 \cdot 3780 \cdot 2,01 + 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1316) = 10\,904 \text{ кН}.$$

Расчетная допускаемая нагрузка: $N = 1,15 \times 10\,904 / (1,2 \cdot 1,4) = 7464 \text{ кН} = 746,4 \text{ т}$.

По результатам проведенных на площадке статических испытаний, выполненных на основе архивных материалов, фактическая несущая способность свай должна быть выше. При расчете несущей способности свай-стойки (п. 7.2.1 СП 24.13330.2011):

$$F_d = \gamma_c \cdot R \cdot A, \quad (3)$$

где $\gamma_c = 1$ — коэффициент условий работы свай; $R = 20\,000$ кПа — расчетное сопротивление грунта под нижним концом свай; $A = 2,01$ м² — площадь опирания свай.

Итого несущая способность свай:

$$F_d = 1 \cdot 20\,000 \cdot 2,01 = 40\,200 \text{ кН}.$$

Расчетная допускаемая нагрузка равна: $N = 1,15 \times 40\,200 / (1,2 \cdot 1,4) = 27\,518 \text{ кН} = 2752 \text{ т}$.

Несущая способность свай по материалу определяется по формуле:

$$F_{Rm} = \gamma_c \varphi (\gamma_{cb} \gamma_{cb} R_b A_b + \gamma_a R_{sc} A_s), \quad (4)$$

где $\gamma_c = 1$ — коэффициент условия работы свай при $d > 0,2$ м; $\varphi = 1$ — коэффициент продольного изгиба для низкого ростверка; $\gamma_{cb} = 0,85$ — коэффициент, учитывающий условия работы; $\gamma_{cb} = 0,8$ — коэффициент, учитывающий способ производства;

² СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85, п. 7.2.

$R_b = 19\,500$ кПа — расчетное сопротивление бетона сжатию; A_b — площадь поперечного сечения бетона, м²; $\gamma_d = 1$ — коэффициент условий работы арматуры; $R_{sc} = 435\,000$ кПа — расчетное сопротивление арматуры А500 сжатию; A_s — площадь поперечного сечения арматуры, м².

Значение несущей способности сваи по материалу:

$$F_{Rm} = 1 \cdot 1 \cdot (0,85 \cdot 0,8 \cdot 19\,500 \cdot 2,01 + 1 \cdot 435\,000 \cdot 0,0145) = 32\,960 \text{ кН.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчетов и последующего моделирования в PLAXIS 2D было установлено следующее.

Максимальная осадка здания составила 6,38 см, минимальное значение осадки равно 0,12 см. Максимальная относительная разница осадок составляет 0,001, что соответствует требованиям нормативной документации.

С учетом проведенного расчета просадки от собственного веса грунта максимальная осадка здания составит $s_{\max} = 8,2 + 6,38 = 14,58$ см. Относительная разность осадок с учетом просадки 0,001, что также удовлетворяет требованиям нормативной документации.

Однако, помимо применения буронабивных свай с уширением, также рекомендуется предпринять дополнительные мероприятия по снижению величин как осадок, так и просадок.

Результат расчета в ПК PLAXIS 2D приведен на рис. 4.

В результате испытаний и расчетов по различным методикам были получены следующие величины несущей способности свай:

- по грунту (п. 7.2.2 СП 24.13330.2011):
 $F_d = 3780 \cdot 1,093 + 3,71 \cdot 0,8 \cdot 1316 = 804 \text{ т;}$
- по грунту (п. 7.2.1 СП 24.13330.2011):
 $F_d = 1 \cdot 20\,000 \cdot 1,093 = 2186 \text{ т;}$
- по материалу:
 $F_{Rm} = 1 \cdot 1 \cdot (0,85 \cdot 0,8 \cdot 19\,500 \cdot 1,093 + 1 \times 43\,500 \cdot 0,0145) = 2080 \text{ т.}$

Согласно требованиям ГОСТ 5686–2012³, несущая способность сваи по материалу равна 2080 т, в качестве максимальной нагрузки принимается значение не более 2000 т.

Характеристики грунтового массива определены по результатам полевых и лабораторных испытаний, а также с помощью архивных данных о строительстве на данной местности.

При расчетах и моделировании получены следующие результаты:

- максимальная осадка — 7,01 см;
- максимальная относительная разность осадок здания — 0,0011.

Результаты расчета в ПК PLAXIS 2D представлены на рис. 5.

³ ГОСТ 5686–2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями, п. 8.2.4.

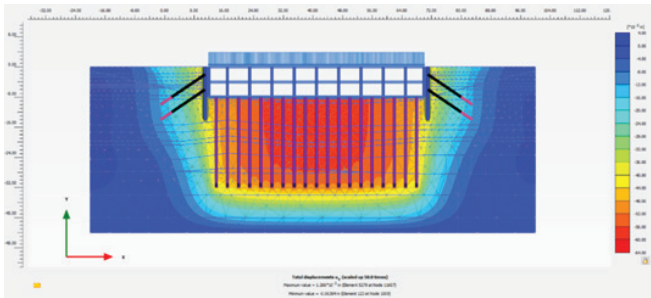


Рис. 4. Результаты моделирования в PLAXIS 2D. Осадка здания

Fig. 4. Simulation results in PLAXIS 2D. Building settlement

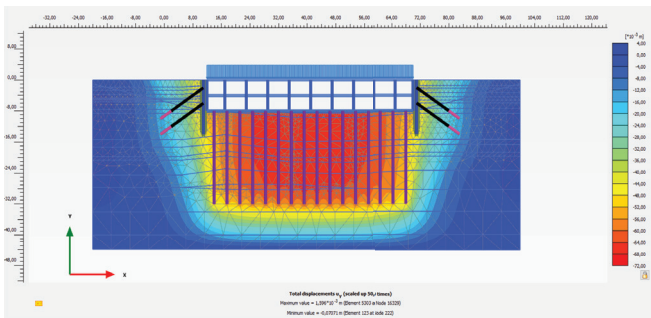


Рис. 5. Результаты моделирования в ПК PLAXIS 2D. Осадка здания

Fig. 5. Simulation results in PC PLAXIS 2D. Building settlement

В соответствии с табл. Г1 СП 22.13330.2016 для каркасных зданий с железобетонным и стальным каркасом и монолитными железобетонными перекрытиями значения предельных деформаций составляют:

- максимальная осадка — не более 15 см;
- максимальная относительная разность осадок здания — не более 0,003.

Таким образом, согласно реализуемой методике расчета требования СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83 по предельно допустимым деформациям выполняются.

Проведенные расчеты в ПК PLAXIS 2D показали высокую эффективность данного инструмента для оценки осадок и их динамики на стадии проектирования и эксплуатации. Использование модели Hardening Soil обеспечивает более точное и адекватное описание поведения просадочных грунтов по сравнению с традиционными моделями (Кулона – Мора, Soft Soil), учитывая их пластическое поведение, уплотнение и влияние замачивания.

Исследования подтвердили, что замачивание грунта приводит к существенному увеличению осадок вследствие снижения прочности структурных связей и перераспределения порового давления. Результаты расчетов продемонстрировали, что при замачивании максимальная осадка здания увеличивается с 6,38 до 14,58 см, а при учете собственного веса грунта может достигать 15,21 см, что приближается к предельно допустимому значению. Максимальная относительная разность осадок при этом

составила 0,001, что соответствует установленным нормативным требованиям ($\leq 0,003$).

Для минимизации величин осадок и просадок рекомендуется использование комплекса инженерных решений, включая применение буронабивных свай с уширением в нижней части, что обеспечивает повышение несущей способности основания и снижение деформаций. Увеличение глубины забивки свай также способствует равномерному распределению нагрузок и уменьшению осадок.

Предварительное замачивание грунта показало свою эффективность как метод управляемого проявления просадочных деформаций до начала строительства, что позволяет избежать значительных осадок в процессе эксплуатации. Наряду с этим применение дренажных систем предотвращает переувлажнение грунта и снижает вероятность его просадки. Использование легких строительных материалов и методов упрочнения грунтов (механическое уплотнение, химическое закрепление) способствует повышению устойчивости основания.

В процессе эксплуатации критически важной является организация системы мониторинга осадок для своевременного выявления отклонений от расчетных значений и принятия необходимых корректирующих мер.

Таким образом, совокупность проведенных расчетов и принятых проектных решений подтверждает возможность обеспечения надежности и долговечности сооружений при строительстве на просадочных грунтах при условии соблюдения проектных рекомендаций и соответствия нормативным требованиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alarcón Posse A.J., Rodríguez Rebolledo J.F., Buriticá García J.A., Caicedo Hormaza B., Rodríguez-Rincón E. Validation of a 3D numerical model for piled raft systems founded in soft soils undergoing regional subsidence // *Soils and Rocks*. 2021. Vol. 44. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.28927/SR.2021.053620
2. Alnuaim A.M., El Naggar M.H., El Naggar H. Performance of micropiled rafts in clay: numerical investigation // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 99. Pp. 42–54. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.02.020
3. Rebolledo J.F.R., León R.F.P., Camapum de Carvalho J. Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília // *Soils and Rocks*. 2019. Vol. 42. Issue 1. Pp. 61–74. DOI: 10.28927/SR.421061
4. Sinha A., Hanna A.M. 3D numerical model for piled raft foundation // *International Journal of Geomechanics*. 2017. Vol. 17. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000674
5. Zhang L., Liu H. Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 101. Pp. 209–224. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.08.004
6. Сергеев Е.М., Ларионов А.К., Комиссарова Н.Н. Лессовые породы СССР. Т. 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования. М., 1986. 273 с.
7. Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C., Wang S.J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China // *Engineering Geology*. 2004. Vol. 76. Issue 1–2. Pp. 65–77. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.006
8. Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation : a review // *Water*. 2021. Vol. 13. Issue 19. P. 2660. DOI: 10.3390/w13192660
9. Cigna F., Tapete D. Urban growth and land subsidence: multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 811. P. 152211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152211
10. Mohebbi Tafreshi G., Nakhaei M., Lak R. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran // *Geojournal*.

2021. Vol. 86. Issue 3. Pp. 1203–1223. DOI: 10.1007/s10708-019-10129-8

11. Mehrnoor S., Robati M., Kheirkhah Zarkesh M.M., Farsad F., Baikpour S. Land subsidence hazard assessment based on novel hybrid approach: BWM, weighted overlay index (WOI), and support vector machine (SVM) // *Natural Hazards*. 2023. Vol. 115. Issue 3. Pp. 1997–2030. DOI: 10.1007/s11069-022-05624-0

12. Пантюшина Е.В. Лессовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 127–130. EDN MSAYPU.

13. Абелев М.Ю., Козьмодемьянский В.Г., Бахронов Р.Р. Устройство уплотненных песчаных оснований многоэтажных зданий при строительстве на слабых грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 10. С. 69–73. EDN SWMCJV.

14. Будикова А.М., Отенберген Н.О. Инженерно-геологические исследования лессовых просадочных грунтов // *Проблемы науки*. 2018. № 4 (28). С. 43–46. EDN YWULGZ.

15. Филоненко И.Н. Анализ взаимодействия конструкции с просадочным грунтом основания // *Молодой исследователь Дона*. 2018. № 3 (12). С. 144–146. EDN LWLQOK.

16. Астахов В.И., Пестова Л.Е., Шкатова В.К. Лёссовиды Российской Федерации: распространение и возраст // *Региональная геология и металлогения*. 2021. № 87. С. 42–60. DOI: 10.52349/08697892_2021_87_42-60. EDN LVSOXJ.

17. Швецов Г.И., Гапилов Ю.А., Носков И.В. Исследование совместной работы песчаной подушки и ее основания из лессовых просадочных грунтов // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 102–104. EDN KZCLAL.

18. Носков И.В. Аварийное состояние зданий при локальном замачивании лессовых просадочных грунтов // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 60–62. EDN KZCKWP.

19. Выскребенцев В.С. Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов при статических и динамических нагрузках // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 3. С. 38–42. EDN VNUVOP.

20. Вяткина Е.И. Исследование изменений характеристик микроструктуры лессового просадочного грунта при различных механических воздействиях // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 13–22. EDN JWPEKQ.

21. Лебзак В.Н. Изменение прочностных и деформационных характеристик лессовых просадочных грунтов при длительной эксплуатации зданий и сооружений // *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 240–246. EDN OCSKJV.

22. Стешенко Д.М., Козубаль Я.В., Головань Р.Н., Абдураимова М.А., Зеленко А.А., Ревезук А.А. Применение комплексной технологии устройства фундаментов на просадочных грунтах при строительстве многоэтажного жилого дома в Ростове-на-Дону // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 587–598. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.587-598. EDN XQWEEN.

23. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. 3-е изд., доп. и перераб. М. : АСВ, 2023. 1084 с.

24. Крутов В.И., Попсуенко И.К. Устранение просадок лёссовых грунтов от их собственного веса путем армирования лёссовой толщи // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1976. № 5. С. 17–19. EDN WCGLPN.

25. Габиров Ф.Г. Разработка инновационных конструкций свайных фундаментов на просадочных грунтах // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. № 1. С. 34–43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03. EDN JJOTFJ.

26. Соколов Н.С. Технические возможности устройства буроинъекционных свай // *Социально-гуманитарные, естественные и технические исследования: проблемы теории и практики : мат. IV Всеросс. науч.-практ. конф.* 2024. С. 146–150. EDN OJNRIK.

27. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полуниев В.М. Численные расчеты в геотехнической практике. М. : Изд-во АСВ, 2023. 316 с.

28. Толмачев Д.А., Рамазанов А.Г. Определение несущей способности одиночной сваи путем моделирования испытаний в программном комплексе Plaxis 2D // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 7 (103). С. 616–622. EDN NQATER.

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; NikitinaNS@mgsu.ru;

Данила Александрович Кравченко — инженер производственно-технического отдела; **Сервис карьерных машин (СКМ);** 109052, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 29–33, стр. 1, офис 1309; kieran.jv.x@gmail.com;

Надежда Вячеславовна Ремизова — ассистент кафедры геотехники; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; nadevya@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alarcón Posse A.J., Rodríguez Rebolledo J.F., Buriticá García J.A., Caicedo Hormaza B., Rodríguez-Rincón E. Validation of a 3D numerical model for piled raft systems founded in soft soils undergoing regional subsidence. *Soils and Rocks*. 2021; 44(1):1-15. DOI: 10.28927/SR.2021.053620
2. Alnuaim A.M., El Naggar M.H., El Naggar H. Performance of micropiled rafts in clay: numerical investigation. *Computers and Geotechnics*. 2018; 99:42-54. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.02.020
3. Rebolledo J.F.R., León R.F.P., Camapum de Carvalho J. Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*. 2019; 42(1):61-74. DOI: 10.28927/SR.421061
4. Sinha A., Hanna A.M. 3D numerical model for piled raft foundation. *International Journal of Geomechanics*. 2017; 17(2). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000674
5. Zhang L., Liu H. Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017; 101:209-224. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.08.004
6. Sergeev E.M., Larionov A.K., Komissarova N.N. *Loess rocks of the USSR. Vol. 1. Engineering-geological features and problems of rational use*. Moscow, 1986; 273. (rus.).
7. Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C., Wang S.J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*. 2004; 76(1-2):65-77. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.006
8. Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation : a review. *Water*. 2021; 13(19):2660. DOI: 10.3390/w13192660
9. Cigna F., Tapete D. Urban growth and land subsidence: multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of The Total Environment*. 2022; 811:152211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152211
10. Mohebbi Tafreshi G., Nakhaei M., Lak R. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Geojournal*. 2021; 86(3):1203-1223. DOI: 10.1007/s10708-019-10129-8
11. Mehrnoor S., Robati M., Kheirkhah Zarkesh M.M., Farsad F., Baikpour S. Land subsidence hazard assessment based on novel hybrid approach: BWM, weighted overlay index (WOI), and support vector machine (SVM). *Natural Hazards*. 2023; 115(3):1997-2030. DOI: 10.1007/s11069-022-05624-0
12. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovskiy Vestnik*. 2011; 1:127-130. EDN MSAYPU. (rus.).
13. Abelev M.Yu., Kozmodemyanskiy V.G., Bakhronov R.R. Arrangement of compacted sand bases of multistory buildings constructed on soft soils. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 10:69-73. EDN SWMCJV. (rus.).
14. Budikova A.M., Otepbergen N.O. Engineering-geological studies of loess subsidence soils. *Problems of Science*. 2018; 4(28):43-46. EDN YWULGZ. (rus.).
15. Filonenko I.N. Interaction analysis of constructions and subsiding soil. *Young Don Researcher*. 2018; 3(12):144-146. EDN UWLQOK. (rus.).
16. Astakhov V.I., Pestova L.E., Shkatova V.K. Loessoids of the Russian Federation: distribution and age. *Regional Geology and Metallogeny*. 2021; 87:42-60. DOI: 10.52349/08697892_2021_87_42-60. EDN LVSOXJ. (rus.).
17. Shvetsov G.I., Gatilov Yu.A., Noskov I.V. Study of the joint work of a sand cushion and its base made of loess subsidence soils. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:102-104. EDN KZCLAL. (rus.).
18. Noskov I.V. Emergency condition of buildings during local soaking of loess subsidence soils. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:60-62. EDN KZCKWP. (rus.).
19. Vyskrebentsev V.S. Strength properties of loess subsidence soils under static and dynamic loads. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 3:38-42. EDN VNUVOP. (rus.).
20. Vyatkina E.I. Study of changes in the characteristics of the microstructure of loess subsidence soil under various mechanical influences. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:13-22. EDN JWPEKQ. (rus.).
21. Lebzak V.N. Changes in the strength and deformation characteristics of loess subsidence soils during long-term operation of buildings and structures. *Polzunovskiy Vestnik*. 2011; 1:240-246. EDN OCSKJV. (rus.).
22. Steshenko D.M., Kozubal Ja., Golovan R.N., Abduraimova M.A., Zelenko A.A., Reveguk A.A. Use of integrated technology of foundation installation on collapsible soils in construction of high-rise building in Rostov-on-Don. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(5):(116):587-598. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.587-598. EDN XQWEEH. (rus.).
23. *Geotechnician's Handbook. Foundations, foundations and underground structures / under the general ed. V.A. Ilyichev and R.A. Mangusheva*. 3rd ed., add. and revised Moscow, ASV, 2023; 1084. (rus.).
24. Krutov V.I., Popsuenko I.K. Elimination of subsidence of loess soils from its own weight by reinforcing the loess layer. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1976; 5:17-19. EDN WCGLPN. (rus.).
25. Gabibov F.G. Development of innovative pile foundation designs on subsidence soils. *Construction and*

Geotechnics. 2022; 13(1):34-43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03. EDN JJOTFJ. (rus.).

26. Sokolov N.S. Technical possibilities of drilling piles. *Social and humanitarian, natural and technical research: problems of theory and practice : proceedings of the IV All-Russian scientific and practical conference*. 2024; 146-150. EDN OJNRIK. (rus.).

27. Mangushev R.A., Dyakonov I.P., Polunin V.M. *Numerical calculations in geotechnical practice*. Moscow, ASV Publishing House, 2023; 316. (rus.).

28. Tolmachev D.A., Ramazanov A.G. Test simulation of single pile bearing capacity by Plaxis 2D. *Engineering journal of Don*. 2023; 7(103):616-622. EDN NQATER. (rus.).

Received February 20, 2025.

Adopted in revised form on February 23, 2025.

Approved for publication on May 5, 2025.

B I O N O T E S: **Nadezhda S. Nikitina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; NikitinaNS@mgsu.ru;

Danila A. Kravchenko — engineer of the Production and Technical Department; **Quarry Machine Service**; office 1309, 29–33, build. 1, Nizhegorodskaya st., Moscow, 109052, Russian Federation; kieran.jv.x@gmail.com;

Nadezhda V. Remizova — assistant of the Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2 Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; nadevya@yandex.ru.

Authors' contribution: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.