

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.159.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206

Цифровые методы прогнозирования осадок фундаментов

Надежда Сергеевна Никифорова, Даниил Дмитриевич Пирогов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях реконструкции зданий с освоением подземного пространства контроль деформаций фундаментов имеет ключевое значение. Традиционные критерии, основанные только на величинах осадки и относительной ее неравномерности, не позволяют в полной мере учитывать пространственное распределение деформаций и взаимосвязь с инженерно-геологическими и конструктивными факторами.

Материалы и методы. Применена цифровая методика прогнозирования деформаций оснований реконструируемых зданий, базирующаяся на аппроксимации осадки кубическими сплайнами и последующем анализе ее производных функций (угла наклона и кривизны). Методика включает: формализацию алгоритма построения непрерывных профилей осадки и вычисления ее производных по данным геодезического мониторинга; проверку корректности методики на выборке объектов реконструкции в Москве и Санкт-Петербурге с различными параметрами котлованов, протяженностью и ориентацией стен, а также инженерно-геологическими условиями; использование методов машинного обучения (МО) для выявления связей между геометрическими параметрами котлованов, характеристиками грунтов и наблюдаемыми деформациями.

Результаты. Построенные поля осадки и ее производных позволили локализовать зоны максимальных деформаций между марками и зафиксировать случаи превышения предельных значений, установленных нормативами. Методы МО продемонстрировали возможность прогнозирования параметров деформаций (C' , D') по внешним данным о геометрии и грунтовых характеристиках, обеспечив приемлемую точность на ограниченной выборке.

Выводы. Применение кубической сплайн-аппроксимации осадок основания, реконструируемых с устройством подземной части зданий и вычисления углов наклона и кривизны подошвы фундамента, расширяет традиционный инструментальный анализа, позволяя выявлять локальные зоны деформаций, недоступные при линейном приближении. Интеграция с алгоритмами МО открывает перспективу использования методики для прогноза поведения оснований в новых проектах реконструкции с освоением подземного пространства в условиях плотной городской застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: осадка, угол наклона, кривизна подошвы фундамента, реконструкция зданий, кубическая сплайн-аппроксимация, машинное обучение, прогноз деформаций, информационное моделирование (BIM), подземное строительство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никифорова Н.С., Пирогов Д.Д. Цифровые методы прогнозирования осадок фундаментов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 195–206. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206

Автор, ответственный за переписку: Даниил Дмитриевич Пирогов, daniel2000mail@mail.ru.

Digital methods for predicting foundation settlements

Nadezhda S. Nikiforova, Daniil D. Pirogov

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

ABSTRACT

Introduction. In the context of building reconstruction with underground space development, monitoring foundation deformations is of critical importance. Traditional criteria based solely on settlement magnitudes and their relative non-uniformity do not fully capture the spatial distribution of deformations and their correlation with geotechnical and structural factors.

Materials and methods. A digital methodology for predicting deformations of the foundations of reconstructed buildings was applied, based on the approximation of settlement by cubic splines and subsequent analysis of its derivative functions (angle of inclination and curvature). The methodology includes: formalization of the algorithm for constructing continuous settlement profiles and calculating their derivatives from geodetic monitoring data; validation of the methodology using case studies of reconstruction projects in Moscow and St. Petersburg with varying excavation parameters, wall lengths and orientations, as well as geotechnical conditions; application of machine learning methods to identify relationships between excavation geometry, soil parameters, and observed deformations.

Results. The constructed fields of settlement and its derivatives made it possible to localize zones of maximum deformations between benchmarks and to record cases of exceeding normative threshold values. Machine learning methods demonstrated the ability to predict deformation parameters (C' , D') from external data on geometry and soil properties, providing acceptable accuracy on a limited dataset.

Conclusions. The application of cubic spline approximation of settlements in reconstructed buildings with underground parts, along with the calculation of slope and curvature of the foundation base, expands the traditional analysis toolkit,

enabling identification of local deformation zones inaccessible to linear approximation. Integration with machine learning algorithms offers prospects for predicting foundation behavior in new reconstruction projects with underground development under dense urban conditions.

KEYWORDS: settlement, slope, foundation curvature, building reconstruction, cubic spline approximation, machine learning, deformation prediction, Building Information Modelling (BIM), underground construction

FOR CITATION: Nikiforova N.S., Pirogov D.D. Digital methods for predicting foundation settlements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):195-206. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.195-206 (rus.).

Corresponding author: Daniil D. Pirogov, daniel2000mail@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль деформаций фундаментов при реконструкции с освоением подземного пространства остается одной из ключевых задач геотехники, поскольку углубление котлованов, изменение схемы восприятия нагрузок зданий приводят к перераспределению напряжений и росту дополнительных деформаций. При этом не всегда есть возможность измерить осадки, например, во внутренних помещениях, в том числе по причине отсутствия доступа.

В практике оценки состояния основания здания используются установленные предельные показатели — максимальная осадка и относительная разность осадок, регламентируемые действующими нормативными документами¹. Однако опыт реконструкции исторических объектов показывает, что пространственная картина деформаций формируется под воздействием совокупности факторов, таких как этажность, этапность производства работ, неоднородность основания и конструктивные особенности фундаментов. Поэтому для корректной диагностики требуется более детализированное описание деформаций, чем то, которое обеспечивают точечные измерения. Дополнительную сложность создает то обстоятельство, что не всегда представляется возможным организовать мониторинг во внутренних помещениях, что ограничивает полноту данных наблюдений².

В качестве критериев дополнительных деформаций оснований вышеуказанные документы предлагают максимальную осадку, относительную разность осадок и крен. В частности, табл. 13.19 из Справочника геотехника и табл. Ж1 из ГОСТ Р 56198–2014 дополнительно вводят такой параметр, как кривизна подошвы фундамента. Кроме того, разность углов наклона

подошвы фундамента также рассматривается как критерий дополнительных деформаций в табл. 13.19, что согласуется с пунктом Л3 Приложения Л СП 22.13330.2016 (с Изменениями 1–5), в котором указывается, что «при геотехническом мониторинге сооружений окружающей застройки... допускается проводить фиксацию иных контролируемых параметров... в том числе дополнительную разность углов наклона подошвы фундамента и др...».

В ряде исследований предложено расширять систему оценки деформаций за счет новых показателей. Так, В.А. Ильичев, П.А. Коновалов и Н.С. Никифорова отмечают необходимость применения кривизны подошвы фундамента и разности углов наклона как дополнительных критериев [1, 2]. Эти параметры позволяют выявлять локальные концентрации деформаций, которые не фиксируются при классическом анализе только по осадкам. Одновременно говорится о том, что «живучесть» исторических зданий во многих случаях превышает нормативные пределы по относительной неравномерности осадок, что подчеркивает В.А. Шашкин [3–5].

С развитием информационного моделирования в строительстве появилась возможность рассматривать геотехнические данные не изолированно, а как часть общей цифровой среды. Включение параметров грунтов и оснований в BIM-модели позволяет обеспечить их доступность для всех участников проекта, связать результаты мониторинга с атрибутами конструктивных элементов и использовать алгоритмы анализа сведений и ИИ для выявления скрытых закономерностей [6–8]. Такой подход упрощает обмен информацией, повышает точность оценки и облегчает управление рисками в процессе реконструкции [9–11]. В международной практике показано, что BIM способен эффективно поддерживать работу с геотехнической информацией, включая прогноз деформаций и контроль устойчивости [12, 13].

В предлагаемой работе рассмотрен цифровой метод анализа, который переводит дискретные наблюдения по нивелирным маркам в непрерывные поля характеристик. Для этого выполняется построение замкнутых кривых осадки по контурам на основе кубических сплайнов и восстановление поперечных профилей с последующей аппроксимацией полиномом третьей степени. Такой подход дает возможность, помимо традиционных показателей (s и $\Delta s/\Delta x$), рассчитывать локальный угол наклона θ

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. М. : Минстрой России, 2016; ТСН 50-302–2004. Санкт-Петербург. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. СПб. : Правительство Санкт-Петербурга, 2004; ГОСТ Р 56198–2014. Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования. М. : Стан-дартинформ, 2019.

² Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. 3-е изд., доп. и перераб. / под ред. В.А. Ильичёва, Р.М. Мангушева. М. : АСВ, 2023. 1084 с.

и кривизну ρ как дополнительные диагностические функции.

Визуализация результатов реализуется в цифровой среде программирования, где поля характеристик отображаются в плане и перспективе с градиентным кодированием зон «норма/превышение». Такой формат облегчает локализацию проблемных участков и формирует основу для интеграции данных мониторинга в цифровые модели реконструируемых объектов.

Цель исследования — разработка и апробация цифровой методики прогнозирования деформаций оснований реконструируемых зданий на основе аппроксимации осадки кубическими сплайнами и анализа производных функций (угла наклона и кривизны).

Для реализации цели были поставлены задачи:

- формализовать алгоритм построения сплайн-кривых осадки по данным геодезических наблюдений;
- реализовать вычисление производных функций θ и ρ и сопоставление их с нормативными предельными значениями;
- выполнить визуализацию полученных полей осадки и производных характеристик для выявления локальных зон превышений;
- прогнозировать осадку зданий при реконструкции здания с устройством подземной части, используя параметры линейной аппроксимации (C' , D') в моделях машинного обучения (МО) (Lasso, Ridge, ElasticNet), что позволяет учесть параметры реконструируемых зданий и характеристики грунта.

Современные исследования подтверждают эффективность интеграции алгоритмов МО и цифровых моделей в геотехнике, включая интерполяцию свойств грунтов [14–16], а также использование physics-informed моделей для прогноза деформаций и устойчивости [17–19]. Интеграция этих методов с BIM-средой дополнительно облегчает визуализацию и обмен данными [20–22].

Необходимость такого подхода связана с ограниченностью общепринятого метода визуализации деформации оснований, который оперирует только отдельными точками измерений и не отражает реальный характер их распределения между точками наблюдения. Сплайн-аппроксимация деформации оснований переводит дискретные данные измерений в непрерывные функции, а использование алгоритмов МО дает возможность прогнозировать деформации оснований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования анализировались здания и сооружения, реконструируемые с освоением подземного пространства в условиях плотной исторической застройки, усиление фундаментов которых осуществлялось буронагреционными сваями.

Рассматривались:

- здание Старого Гостиного двора (далее — СГД) в Москве, реконструкция которого подробно описана в ряде публикаций по геомониторингу^{3, 4, 5};
- реконструкция дома Несвицкой, расположенного на Смоленской-Сенной площади в Москве, сведения о реконструкции и мониторинге приведены в соответствующих материалах^{6, 7};
- комплекс «Неглинная плаза», ограниченный ул. Рождественка, ул. Неглинная, Кисельным пер., Трубной пл. в Москве^{8, 9};
- комплекс зданий, расположенных на углу Херсонской и Исполкомской улиц в центре Санкт-Петербурга (Геотехнический мониторинг, ул. Херсонская д. № 12, 2011 г., ООО «Центр геотехнического мониторинга»).

Исходные данные осадок включали результаты геодезического мониторинга и инженерно-геологических изысканий. Для каждого объекта фиксировались геометрические параметры: глубина котлована H_k ; длина исследуемого поперечного профиля фундамента R ; расстояние от котлована до ближайшей стены реконструируемого здания L ; ориентация стены по отношению к котловану $\sin(\alpha)$, где α — угол между стеной и ограждением котлована. Дополнительно учитывались характеристики грунтового массива: сцепление c ; угол внутреннего трения φ и модуль деформации E , а также максимальное

³ Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Бахолдин Б.В., Никифорова Н.С. Реконструкция фундаментов здания Старого Гостиного Двора в Москве и сопровождающий ее мониторинг // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 4–5. С. 43–46.

⁴ Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Геомониторинг как составная часть мероприятий по обеспечению безопасности исторической застройки (на примере реконструкции Старого Гостиного Двора в Москве) // Гуманизм и строительство на пороге третьего тысячелетия : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. С. 27–28.

⁵ Коновалов П.А., Коновалов В.П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 5-е изд. М. : АСВ, 2011. 384 с.

⁶ Никифорова Н.С., Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф. Геотехнические проблемы при строительстве уникальных объектов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 5. С. 2–8.

⁷ Никифорова Н.С., Зехниев Ф.Ф., Астафьев С.В., Буртовая О.В. Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания // Вестник гражданских инженеров. СПб., 2009. № 2 (19). С. 126–130.

⁸ Ильичёв В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 17–20.

⁹ Никифорова Н.С. Обеспечение сохранности зданий в зоне влияния подземного строительства. 2-е изд. М. : МИСИ – МГСУ, 2016. 154 с.

Исходные данные исследуемых объектов реконструкции

Initial data of the studied reconstruction objects

Объект Object	H_k , м / m	c , кПа / kPa	φ , °	E , МПа / MPa	$\text{Sin}(\alpha)$	P_{\max} , кПа / kPa	P_{\min} , кПа / kPa
СГД OGD	4,6	2	30	35	0,84–1	512–418	481–407
Несвицкая Nesvitskaya	11,5	25	20	29	1	570	360
Неглинная Neglinnaya	11; 21	20	13	10	1	945–308	550–238
СПб SPb	9,9	20	23	20	0,87–1	310	310

и минимальное давление по подошве фундамента на исследуемом участке здания после реконструкции (P_{\max} и P_{\min}). Совокупность этих параметров определяет условия формирования осадок и их распределение вдоль контура здания. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры (таблица).

Для восстановления профиля осадки использовалась интерполяция кубическими полиномами. Такой подход позволяет построить непрерывную функцию осадки и определить ее производные: угол наклона подошвы фундамента и кривизну. На основе этих значений формировались эпюры, отражающие характер деформаций в пределах изучаемых участков. Методика обоснована необходимостью выявления опасных зон и сопоставления полученных значений с нормативными предельными критериями.

Техническая реализация выполнена в среде Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib, что предоставляет возможность автоматизированной обработки данных и построения графиков.

Выбор этого метода обусловлен его универсальностью: он применим при ограниченном числе наблюдений, обеспечивает плавное восстановление осадок между точками замеров и позволяет корректно учитывать сочетание геометрических и геотехнических факторов, характерное для реконструкции в стесненных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В практике геотехнического мониторинга осадки зданий фиксируются по отдельным маркам, и для их наглядного представления обычно строится эпюра — точки соединяются прямыми линиями. Такой классический подход прост и понятен, но имеет очевидный недостаток: профиль получается угловатым, что не отражает плавного характера распространения осадки основания между точками наблюдений. В результате теряется часть информации о том, как реально развиваются деформации на участке между марками.

В настоящем исследовании для преодоления этого ограничения применяется метод кубической сплайн-интерполяции. Его суть заключается в том, что через все измеренные точки проводится не набор прямых, а единая сплаженная кривая, которая согласуется с каждым значением наблюдений. В отличие от полилинии (прямых отрезков, соединенных концами друг с другом), сплайн позволяет корректно восстанавливать плавные изменения осадки, исключая резкие «изломы», не имеющие физического смысла.

Преимущество такого подхода состоит в том, что становится возможным анализировать не только абсолютные значения осадок в точках наблюдений, но и их распределение вдоль всего рассматриваемого контура реконструируемого здания. Для анализа выбранных зданий строились непрерывные кривые осадки, аппроксимирующие значения по нивелирным маркам. В качестве аппроксимирующей функции применялся кубический сплайн — кусочный полином третьей степени, определяемый отдельно на каждом интервале между соседними марками. Для интервала $[x_i, x_{i+1}]$, где $h_i = x_{i+1} - x_i$, сплайн имеет вид:

$$s(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i,$$

где коэффициенты (a_i, b_i, c_i, d_i) определяются из условий интерполяции и гладкости.

На рис. 1 показан пример построения кривой осадки вдоль фасада по данным нивелирных марок. Непрерывные сплайны отображают плавное распределение осадок вдоль периметра и служат исходной основой для дальнейшего анализа деформаций.

Для восстановления поперечного профиля осадки поперечных стен (между внутренним и внешним контурами) используется метод четырех диаграмм, если нет данных измерений осадок. В каждом разрезе фиксируется пара центральных марок — одна на внутреннем контуре и соответствующая ей на внешнем. Дополнительно учитываются соседние точки этих марок, что позволяет построить четыре альтернативные аппроксимации поперечного профиля.

Все варианты строятся по одному принципу: центральные марки внутреннего и внешнего контура остаются общими, а в качестве дополнительных

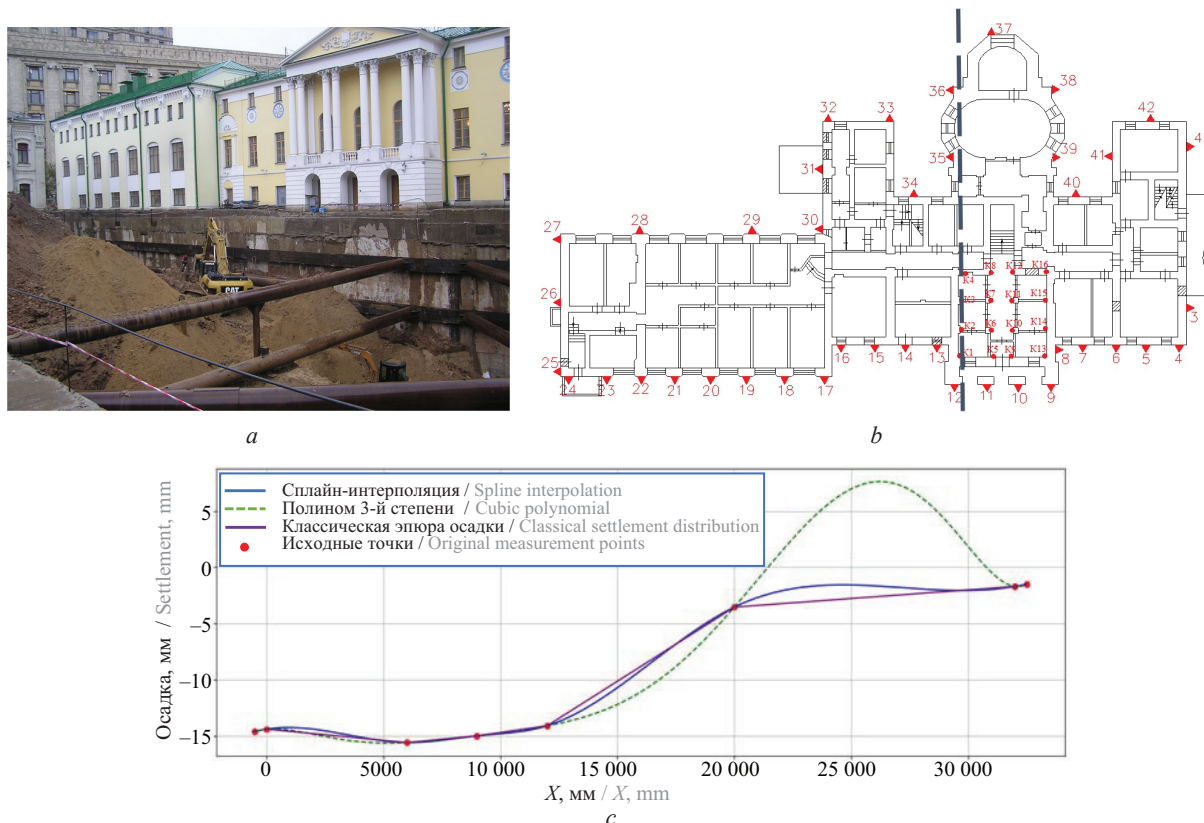


Рис. 1. Исторический памятник — дом А.И. Несвицкой: *a* — освоение подземного пространства; *b* — схема расположения геодезических марок на плане; *c* — сравнение способов отображения профиля осадки на примере разреза от марки 11 до марки 37: классическая эпюра (линии между исходными точками), аппроксимация полиномом третьей степени и кубическая сплайн-интерполяция. Красные точки — результаты наблюдений

Fig. 1. Historical monument — A.I. Nesvitskaya House: *a* — development of underground space; *b* — layout of geodetic benchmarks on the plan; *c* — comparison of settlement profile representation methods on the example of the section from benchmark 11 to benchmark 37: classical diagram (lines between initial points), third-degree polynomial approximation, and cubic spline interpolation. Red dots — monitoring results

опорных точек берутся соседние точки слева и справа. В итоге формируются четыре комбинации, каждая из которых дает собственный сплайновый профиль.

Полученные линии затем усредняются, и в качестве итогового принимается участок, ограниченный центральными марками внутреннего и внешнего контуров. Подход, проиллюстрированный на рис. 2, позволяет сгладить случайные ошибки отдельных точек. Усредненный профиль применяется для дальнейшей аппроксимации осадок полиномом третьей степени.

Поперечный профиль осадки, полученный усреднением четырех диаграмм, аппроксимируется полиномом третьей степени. Полином имеет вид:

$$s(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d.$$

Таким образом, аналитическая аппроксимация в виде полинома третьей степени позволяет перейти от дискретных разрезов к формированию непрерывного поля осадок по всему периметру здания. На изображении хорошо просматриваются промежуточные значения между марками, что дает возможность оценивать распределение деформаций

не только в отдельных точках, но и вдоль всего фундамента.

На рис. 3 приведены профили осадки для всей выборки объектов реконструкции. Каждая линия соответствует отдельному случаю наблюдений, при этом различные типы штриховок отображают группы зданий с разными значениями физико-механических характеристик грунтов, нагрузками на фундамент и глубиной котлована.

На этом этапе выполнено сопоставление результатов с нормативными предельными деформациями. В соответствии с табл. Е.1 предельные дополнительные деформации для реконструируемых сооружений СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» для многоэтажных бескаркасных зданий из кирпича или крупных блоков, относящихся к III категории технического состояния, предельная дополнительная осадка принимается равной 30 мм. Данное значение использовано в качестве контрольного уровня на графиках (горизонтальная красная линия). Такая форма представления позволяет определить зоны, требующие усиления.

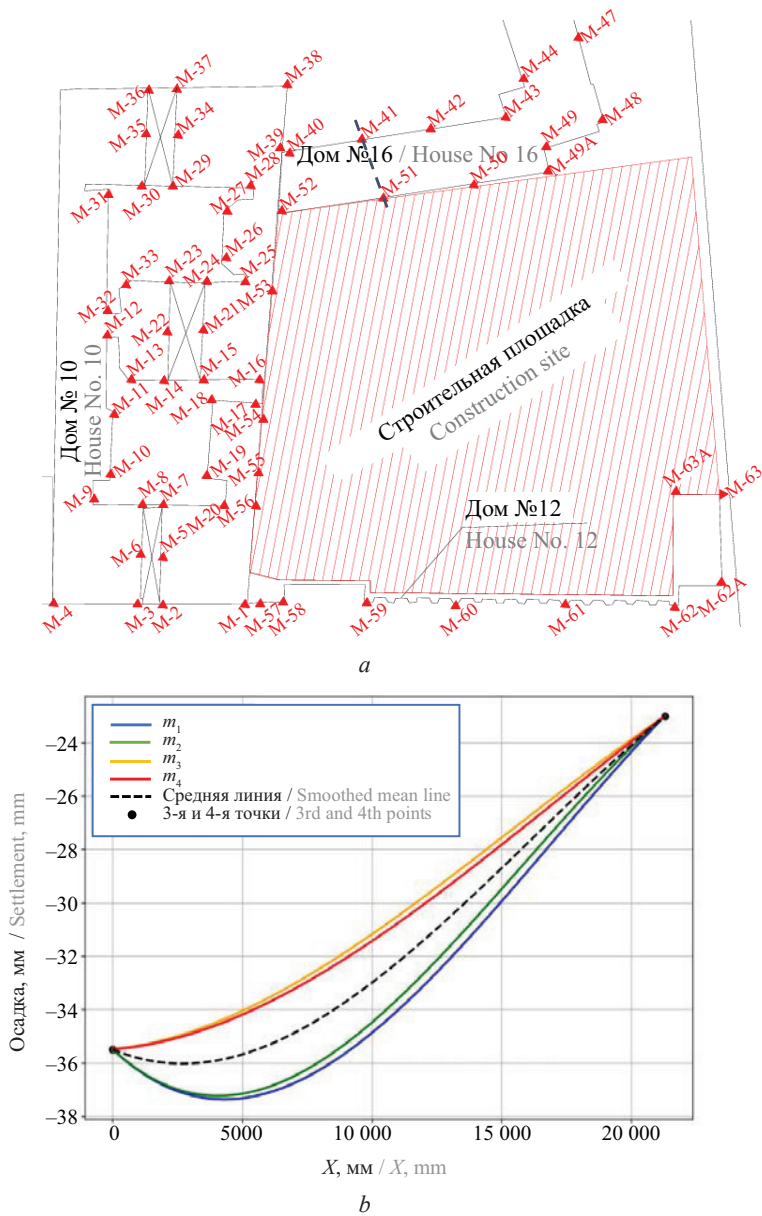


Рис. 2. Здание, расположенное по адресу ул. Исполкомская, д. 16 в Санкт-Петербурге: *a* — схема расположения геодезических марок на плане; *b* — построение поперечного профиля осадки методом четырех диаграмм на примере разреза от марки 51 до марки 41

Fig. 2. Building located at 16 Ispolkomskaya Street, St. Petersburg: *a* — layout of geodetic benchmarks on the plan; *b* — construction of the transverse settlement profile using the four-diagram method on the example of the section from benchmark 50 to benchmark 41

В геотехнической практике основным параметром служит осадка, а угол наклона оценивается косвенно как отношение приращения осадки к длине отрезка, т.е. через показатель $\frac{\Delta s}{\Delta x}$:

$$\frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{s(x + \Delta x) - s(x)}{\Delta x}$$

Такая величина отражает средний уклон на базе, но не позволяет задать его как функцию, определенную в каждой точке. Использование аппроксимации кубическим полиномом дает возможность ввести локальный угол наклона, обозначаемый символом θ ,

который вычисляется как первая производная функции осадки:

$$\theta(x) = 3ax^2 + 2bx + c.$$

Тем самым угол наклона рассматривается не как усредненная характеристика, а как непрерывная функция, позволяющая анализировать распределение уклонов вдоль всего профиля.

На рис. 4 показано распределение углов наклона для поперечных стен зданий. Превышение нормативного предела, установленного СП 22.13330.2016 0,0012 рад, выявлено только на 7 поперечных стенах реконструируемых зданий.

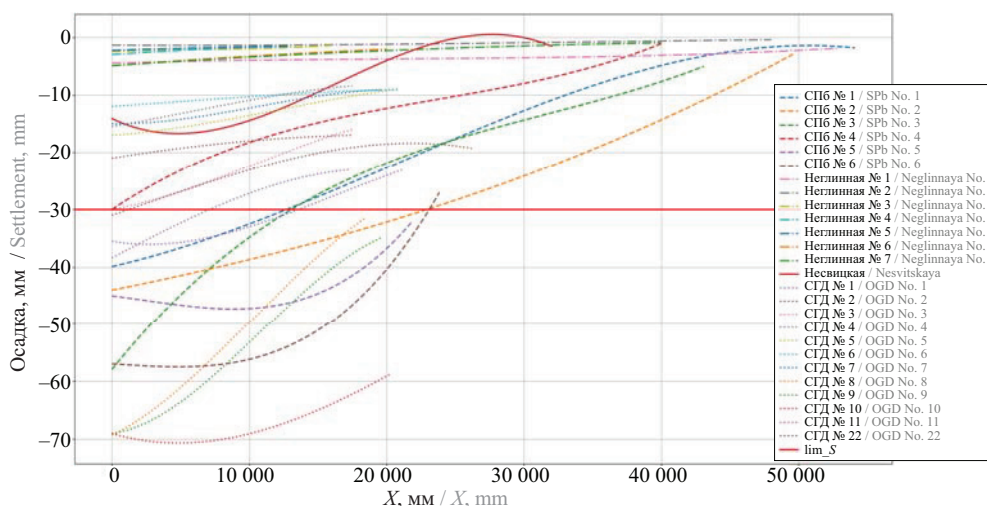


Рис. 3. Графики распределения осадки $S(x)$ для поперечных стен, где 0 — ближайшая к котловану точка

Fig. 3. Settlement distribution curves $S(x)$ for transverse walls, where 0 is the point closest to the excavation

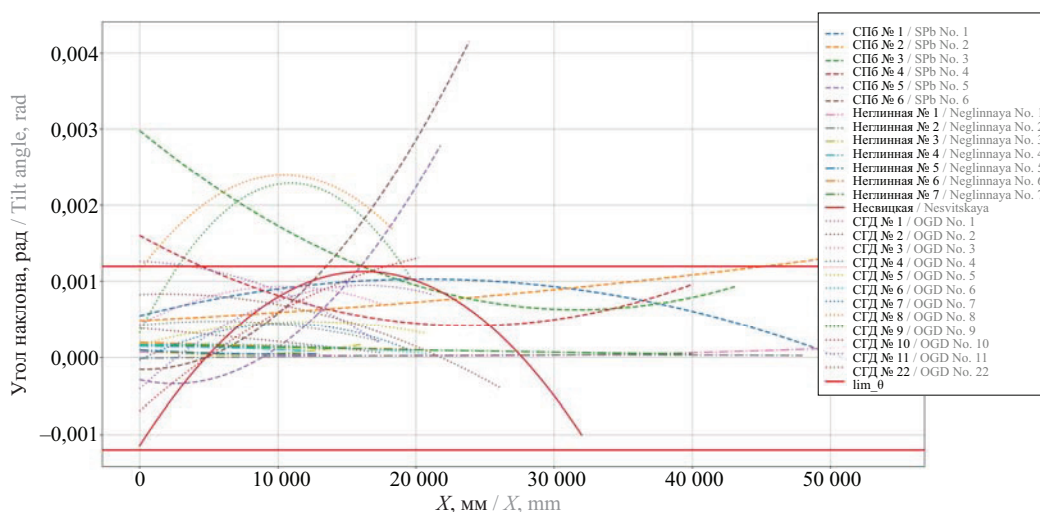


Рис. 4. Графики распределения угла наклона подошвы фундаментов $\theta(x)$ для выборки объектов реконструкции

Fig. 4. Distribution curves of foundation tilt angle $\theta(x)$ for the specimen of reconstruction objects

Поскольку функция угла наклона $\theta(x)$ получена в аналитическом виде, становится возможным вычислить и кривизну профиля, которая обозначается символом ρ и соответствует второй производной функции осадки:

$$\rho(x) = 6ax + 2b.$$

Предлагаемая методика расширяет традиционный набор показателей: к осадке $s(x)$ и относительной разности осадок $\Delta s/\Delta x$ добавляются непрерывные функции угла наклона $\theta(x)$ и кривизны $\rho(x)$, согласно требованиям ГОСТ Р 56198–2014. Этот подход позволяет детальнее прогнозировать деформации основания реконструируемых памятников и формировать основу для цифрового анализа и визуализации.

На рис. 5 представлено распределение кривизны для поперечных стен зданий. В качестве ориентировочного предельного уровня принято значение

$10 \cdot 10^{-8}$ 1/мм, которое при практически применении подлежит адаптации в зависимости от категории технического состояния здания по СП 22.13330.2016. Превышения зафиксированы только на семи поперечных стенах реконструируемых зданий.

Задача прогнозирования деформаций оснований при реконструкции осложняется тем, что полные ряды наблюдений по геотехническим объектам собираются редко, а доступные данные зачастую фрагментарны. В таких условиях классические эмпирические зависимости и аналитические решения не всегда позволяют достоверно описать развитие осадок. Для преодоления этого ограничения предложено использовать методы машинного обучения, которые способны выявлять скрытые связи между геометрическими параметрами сооружения, инженерно-геологическими характеристиками грунтов и наблюдаемыми деформациями основания.

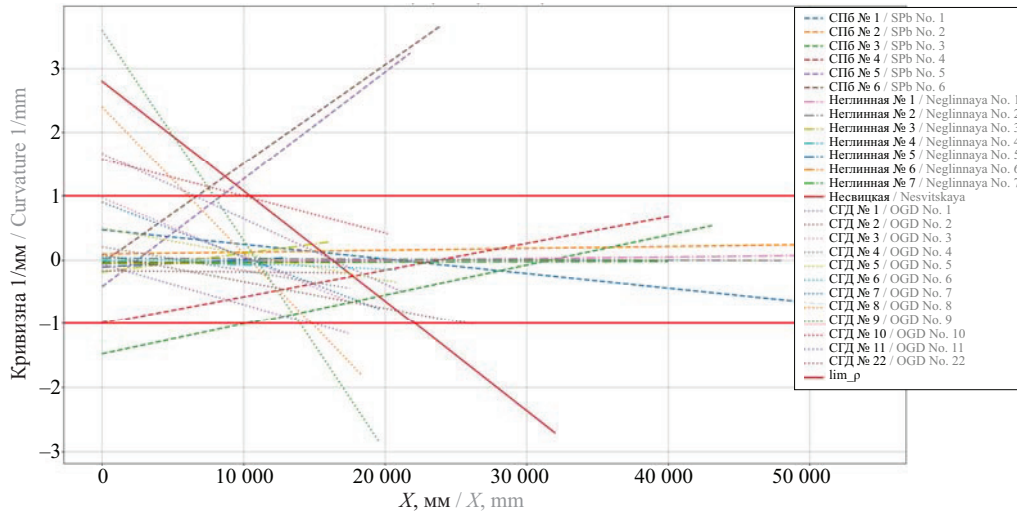


Рис. 5. Графики распределения кривизны $\rho(x)$ для выборки объектов реконструкции

Fig. 5. Distribution curves of foundation base curvature $\rho(x)$ for the specimen of reconstruction objects

Для прогноза осадок реконструируемого здания принята упрощенная аппроксимация в виде полинома первой степени:

$$S(x) = C'x + D',$$

где коэффициент C' отражает наклон профиля осадки вдоль стены, а коэффициент D' задает базис смещения по вертикали; x — координата точки на фундаменте ($x = 0$ у котлована) по поперечной стене здания. Линейная форма выбрана потому, что она проще в обучении и позволяет уловить базовые зависимости даже на небольшой выборке. В дальнейшем по мере накопления сведений модель может быть расширена до полинома более высокого порядка с учетом кривизны подошвы фундамента.

С целью аппроксимации связей применены линейные модели с регуляризацией Lasso, Ridge и ElasticNet. Эти методы различаются способом борьбы с переобучением: Lasso «обнуляет» мало-значимые параметры, Ridge равномерно сглаживает вклад всех факторов, а ElasticNet сочетает оба подхода. В инженерном понимании это значит, что алгоритмы по-разному выделяют главные влияющие факторы: Lasso оставляет только наиболее значимые (например, угол поворота стены или модуль деформации грунта); Ridge распределяет влияние между всеми параметрами; а ElasticNet дает промежуточное, более сбалансированное решение.

Результаты анализа показали, что коэффициент C' , характеризующий угол наклона линии осадки, в наибольшей степени зависит от ориентации стены относительно котлована $\sin(\alpha)$. Дополнительно заметное влияние оказывают угол внутреннего трения грунта φ и модуль деформации E , однако их вклад выражен слабее и не столь однозначен. Геометрические параметры конструкции — расстояние от котлована до ближайшего торца стены L , глубина котлована H_k и длина стены R — практи-

чески не влияют на значение C' . Ниже приведены формулы осадки, полученные каждой моделью:

$$S_{Ridge} = \left(2,2 \cdot 10^{-3} \sin \alpha - 4,3 \cdot 10^{-9} L \frac{1}{m} - 2,2 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - 5,0 \cdot 10^{-9} R \frac{1}{m} + 4,3 \cdot 10^{-6} c \frac{1}{\text{kPa}} + 5,0 \cdot 10^{-5} \varphi \frac{1}{1^\circ} - 4,7 \cdot 10^{-5} E \frac{1}{\text{MPa}} - 1,2 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 6,0 \cdot 10^{-7} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 1,3 \cdot 10^{-3} \right) x + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 9,9 \cdot 10^{-4} H_k \frac{1}{m} + 3,9 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} - 4,9 \cdot 10^{-2} c \frac{1}{\text{kPa}} - 2,4 \varphi \frac{1}{1^\circ} + 2,3 E \frac{1}{\text{MPa}} + 1,4 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 56;$$

$$S_{Lasso} = \left(2,2 \cdot 10^{-3} \sin \alpha - 3,0 \cdot 10^{-9} L \frac{1}{m} - 2,5 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - 4,1 \cdot 10^{-9} R \frac{1}{m} + 3,0 \cdot 10^{-5} \varphi \frac{1}{1^\circ} - 4,2 \cdot 10^{-5} E \frac{1}{\text{MPa}} - 2,4 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 7,0 \cdot 10^{-7} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 8,2 \cdot 10^{-4} \right) x + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 1,7 \cdot 10^{-3} H_k \frac{1}{m} + 3,9 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} + 0,87 c \frac{1}{\text{kPa}} + 8,8 \cdot 10^{-2} \varphi \frac{1}{1^\circ} +$$

$$\begin{aligned}
& + 2,5E \frac{1}{\text{МПа}} + 1,4 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - \\
& - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 140; \\
S_{\text{ElasticNet}} = & \left(4,6 \cdot 10^{-4} \sin \alpha - 1,3 \cdot 10^{-8} H_k \frac{1}{m} - \right. \\
& \left. - 1,5 \cdot 10^{-7} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} + 4,2 \cdot 10^{-4} \right) x + \\
& + 14 \sin \alpha + 1,1 \cdot 10^{-4} L \frac{1}{m} + 1,1 \cdot 10^{-3} H_k \frac{1}{m} + \\
& + 3,8 \cdot 10^{-5} R \frac{1}{m} + 6,5 \cdot 10^{-2} c \frac{1}{\text{kPa}} - 2,1 \varphi \frac{1}{1^\circ} + \\
& + 2,3E \frac{1}{\text{МПа}} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_{\max} \frac{1}{\text{kPa}} - \\
& - 3,0 \cdot 10^{-2} P_{\min} \frac{1}{\text{kPa}} - 66.
\end{aligned}$$

Коэффициент D' , определяющий базис смещения кривой осадки, формируется под воздействием более широкого набора факторов. Наибольшее значение здесь имеют ориентация стены $\sin(\alpha)$, сцепление грунта c , угол внутреннего трения φ и модуль деформации E . Кроме того, существенный вклад вносят и геометрические характеристики: глубина котлована H_k , расстояние от стены до котлована L и длина стены R . Иными словами, величина D' отражает как физико-механические характеристики грунтов основания, так и особенности компоновки подземного сооружения.

Линейные модели позволяют выделить ключевые параметры, влияющие на осадку реконструируемого здания.

Проведенное сравнение трех моделей машинного обучения (Lasso, Ridge и Elastic Net) показало различия в точности прогнозирования коэффициента C' и сходные результаты для коэффициента D' .

Для C' наилучшие результаты продемонстрировали модели Lasso и Ridge: значения средних ошибок сопоставимы между собой. В то же время ElasticNet показал худшее качество: ошибки оказались выше.

Для коэффициента D' существенных различий между моделями не выявлено: все три алгоритма

продемонстрировали одинаковые результаты. Таким образом, на текущий момент оптимальными для описания зависимости коэффициента C' являются модели Lasso и Ridge, тогда как ElasticNet оказался наименее эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика сплайн-аппроксимации показала возможность перехода от точечных геодезических наблюдений к прогнозированию осадки между марками. Построение непрерывной кривой осадки фундамента реконструируемого здания позволяет восстановить профиль деформаций по всему контуру фундамента здания, выявлять локальные участки превышений и анализировать распределение осадки не только в фиксированных точках, но и в промежутках между ними. Такой подход повышает информативность наблюдений и делает возможной оценку состояния всего контура фундамента.

Построенные профили осадки, угла наклона и кривизны показали, что именно кривизна является наиболее чувствительным параметром к изменению деформационного состояния и может рассматриваться как основной дополнительный критерий деформаций. Использование этого показателя предоставляет возможность точнее фиксировать потенциально опасные зоны, чем классическое построение полилинейных эпюр осадки по прямым линиям.

Применение методов МО (Lasso, Ridge, ElasticNet) позволило установить зависимости между коэффициентами аппроксимации и характеристиками котлована и основания: глубиной выемки, протяженностью стены, расстоянием до котлована, физико-механическими характеристиками грунтов основания, а также давлением по подошве фундамента. Это открывает возможность прогнозировать осадку реконструируемого с устройством подземной части здания.

Точность прогноза на текущем этапе ограничена из-за небольшого объема базы объектов и отсутствия ряда значимых факторов в модели. Тем не менее результаты подтверждают перспективность предложенного подхода. Дальнейшее развитие связано с расширением выборки, включением новых характеристик и уточнением математического аппарата, что позволит повысить надежность прогноза и внедрить методику в практику реконструкции зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Новые методы измерения деформаций зданий и критерии их оценки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. № 4. С. 8–12. EDN LLWFKS.
2. Ильичев В.А., Никифорова Н.С. Методы определения кривизны и разности углов наклона фунда-

ментов как критериев деформаций оснований зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 3. С. 14–17. EDN YNJLHV.

3. Шашкин В.А. Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 32–45. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-32-45. EDN CITCIO.

4. Шашкин В.А. Конструкция фундаментов зданий рядовой застройки XVIII – начала XIX в. (на примере г. Санкт-Петербурга) // Геотехника. 2022. Т. 14. № 3. С. 6–20. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-3-6-20. EDN GIYETQ.

5. Шашкин В.А. Обеспечение безопасности исторических зданий, получивших «сверхнормативные» деформации вследствие влияния нового строительства // Геотехника. 2024. Т. 16. № 4. С. 24–39. DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-4-24-37. EDN VQVXCE.

6. Svensson M. GeoBIM for Optimal Use of Geotechnical Data // Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting. 2016. Pp. 66–121.

7. El Sibaii M., Granja J., Bidarra L., Azenha M. Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). 2022. Vol. 27. Pp. 393–415. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.019

8. Tawelian L.R., Mickovski S.B. The implementation of geotechnical data into the BIM process // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. Pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.115.

9. Beck J., Jürgens S., Henke S. Automating stability analysis using BIM-FEA-Integration // Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024.

10. Berdigulyjov M., Popa H. The implementation and role of geotechnical data in BIM process // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 85. P. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/20198508009.

11. Разводовский Д.Е., Шулятьев С.О., Ставницер Л.П. Применение BIM в геотехнике // Жилищное строительство. 2018. № 11. С. 3–8. EDN VOFZRW.

12. Fonsati A., Cosentini R.M., Tundo C., Osello A. From Geotechnical Data to GeoBIM Models: Testing Strategies for an Ex-Industrial Site in Turin // Buildings. 2023. Vol. 13 (9). P. 2343. DOI: 10.3390/buildings13092343.

13. Liu N. et al. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction // Scientific Reports. 2023.

14. Utepov Y., Aldungarova A., Mukhamejanova A., Awwad T., Karaulov S., Makasheva I. Voxel Interpolation of Geotechnical Properties and Soil Classification Based

on Empirical Bayesian Kriging and Best-Fit Convergence Function // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 14. P. 2452. DOI: 10.3390/buildings15142452

15. Zaid R. 3D visualization of interpolating geotechnical strata in a BIM environment (Case study of Civil3D) // Misan Journal of Engineering Sciences. 2024. Vol. 5. Issue 2. Pp. 10–18.

16. Красильников В.П., Андрианов А.В., Красильников П.А., Мещерякова О.Ю. Перспективы и проблемы внедрения BIM-технологии в отечественную строительную отрасль // Геотехника. 2022. Т. 14. № 2. С. 6–17. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-2-6-17. EDN SQYXBG.

17. Yuan B., Choo C.S., Yeo L.Y., Wang Y., Yang Z., Guan Q. et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper // Geomechanics and Geoengineering. 2025. Vol. 20. Issue 5. Pp. 1128–1159. DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029

18. Dahal A., Lombardo L. Towards physics-informed neural networks for landslide prediction // ArXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.06785

19. Болдырев Г.Г., Иорисов И.Х., Редин А.В., Дивеев А.А. BIM геотехника и перспективы ее развития в Российской Федерации // Геотехника. 2020. Т. 12. № 4. С. 6–22. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-6-22. EDN VRURKI.

20. Satyanaga A., Aventian G.D., Makenova Y., Zhakiyeva A., Kamaliyeva Z., Moon S.W. et al. Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering // Infrastructures. 2023. Vol. 8. Issue 6. P. 103. DOI: 10.3390/infrastructures806103

21. Самосват В.В. Трехмерная цифровая модель геологической среды как ключевой элемент BIM-технологии и высшая ступень цифровизации строительства // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». 2020. № 3.

22. Кудреватых О.А., Середин В.В., Андрианов А.В., Красильников В.П. К вопросу о выборе программного обеспечения для создания BIM в инженерной геологии // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023. № 1. С. 283–296.

Поступила в редакцию 20 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никифорова — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5504-0887, РИНЦ ID: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Даниил Дмитриевич Пирогов — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; daniel2000mail@mail.ru.

Вклад авторов:

Никифорова Н.С. — научное руководство, постановка задачи, редактирование текста.

Пирогов Д.Д. — сбор и обработка материалов, математическая обработка данных, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Il'ichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. New methods of measuring building deformations and criteria for their estimation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 4:8-12. EDN LLWFKS. (rus.).
2. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S. Methods for the determination of curvatures and the difference between the slopes of foundations as the criteria of deformation of the basements of buildings and structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 3:14-17. EDN YNJLHV. (rus.).
3. Shashkin V.A. Accumulated deformations of the historical development of St. Petersburg. *Housing Construction*. 2023; 12:32-45. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-32-45. EDN CITCIO. (rus.).
4. Shashkin V.A. Construction of foundations of range buildings in the XVIII – early XIX century (by example of Saint Petersburg). *Geotechnics*. 2022; 14(3):6-20. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-3-6-20. EDN GIYETQ. (rus.).
5. Shashkin V.A. Provision of safety of historical buildings subjected to “excess” deformations caused by new construction. *Geotechnics*. 2024; 16(4):24-39. DOI: 10.25296/2221-5514-2024-16-4-24-37. EDN VQVXCE. (rus.).
6. Svensson M.. GeoBIM for optimal use of geotechnical data. *Proceedings of the Nordic Geotechnical Meeting (NGM)*. 2016; 66-121.
7. El Sibaii M., Granja J., Bidarra L., Azenha M. Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations // *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2022. Vol. 27. Pp. 393–415. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.019.
8. Tawelian L.R., Mickovski S.B. The implementation of geotechnical data into the BIM process. *Procedia Engineering*. 2016; Vol. 143. Pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.115.
9. Beck J., Jürgens S., Henke S. Automating stability analysis using BIM-FEA-Integration // *Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024*.
10. Berdigylyjov M., Popa H. The implementation and role of geotechnical data in BIM process // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 85. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/20198508009
11. Razvodovsky D.E., Shulyatiev S.O., Stavnitser L.R. The use of BIM in geotechnics. *Housing Construction*. 2018; 11:3-8. EDN VOFZRW. (rus.).
12. Fonsati A., Cosentini R.M., Tundo C., Osello A. From Geotechnical Data to GeoBIM Models: Testing Strategies for an Ex-Industrial Site in Turin. *Buildings*. 2023. Vol. 13(9). Article 2343. DOI: 10.3390/buildings13092343.
13. Liu N. et al. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction // *Scientific Reports*. 2023.
14. Uteпов Y., Aldungarova A., Mukhamejanova A., Awwad T., Karaulov S., Makasheva I. Voxel Interpolation of Geotechnical Properties and Soil Classification Based on Empirical Bayesian Kriging and Best-Fit Convergence Function. *Buildings*. 2025; 15(14):2452. DOI: 10.3390/buildings15142452
15. Zaid R. 3D visualization of interpolating geotechnical strata in a BIM environment (Case study of Civil3D). *Misan Journal of Engineering Sciences*. 2024; 5(2):10-18.
16. Krasilnikov V.P., Andrianov A.V., Krasilnikov P.A., Meshcheriakova O.Yu. Prospects and problems of introducing BIM technology in the domestic construction industry. *Geotechnics*. 2022; 14(2):6-17. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-2-6-17. EDN SQYXBG. (rus.).
17. Yuan B., Choo C.S., Yeo L.Y., Wang Y., Yang Z., Guan Q. et al. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper. *Geomechanics and Geoengineering*. 2025; 20(5):1128-1159. DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029
18. Dahal A., Lombardo L. Towards physics-informed neural networks for landslide prediction. *ArXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.06785
19. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh., Redin A.V., Diveev A.A. BIM geotechnics and perspectives of its development in the Russian Federation. *Geotechnics*. 2020; 12(4):6-22. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-6-22. EDN VRURKI. (rus.).
20. Satyanaga A., Aventian G.D., Makenova Y., Zhakiyeva A., Kamaliyeva Z., Moon S.W. et al. Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering. *Infrastructures*. 2023; 8(6):103. DOI: 10.3390/infrastructures8060103
21. Samosvat V.V. Three-dimensional digital model of the geological environment as a key element of BIM technology and the highest stage of construction digitalization. *Independent electronic journal “GeoInfo”*. 2020; (3). (rus.).
22. Kudrevatykh O.A., Seregin V.V., Andrianov A.V., Krasilnikov V.P. On the selection of software for creating BIM in engineering geology. Proceedings of Tula State University. *Earth Sciences*. 2023; 1:283-296. (rus.).

Received October 20, 2025.

Adopted in revised form on November 17, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

B I O N O T E S: **Nadezhda S. Nikiforova** — Doctor of Technical Sciences, 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; SPIN-code: 5504-0887, ID RSCI: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Daniil D. Pirogov — postgraduate student 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; daniel2000mail@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nadezhda S. Nikiforova — scientific supervision, problem statement, text editing.

Daniil D. Pirogov — data collection and processing, mathematical analysis, manuscript writing.

The authors declare no conflict of interest.