

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.159.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113

Практическое применение стохастических расчетов конечной осадки оснований плитных фундаментов

Михаил Петрович Кропоткин¹, Игорь Константинович Фоменко²,
Андрей Александрович Горлов²

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

² Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование геотехнических систем сопряжено с проблемой неточности и неполноты данных о моделируемой системе. Существующие детерминистические методы расчета оснований не позволяют количественно оценить риски, связанные с пространственной изменчивостью свойств грунтов. Цель исследования — демонстрация применения стохастического подхода на основе рандомизированного метода конечных элементов (МКЭ) для оценки надежности и риска превышения допустимых осадок фундаментов храмового комплекса в Москве.

Материалы и методы. Использованы результаты инженерно-геологических изысканий на основе данных электро-контактного динамического зондирования (ЭДЗ), в ходе которого была проанализирована неоднородность механических свойств грунта в пространстве. Для прогнозирования конечной осадки основания применялись два подхода: детерминированный расчет по методу послойного суммирования и численное моделирование методом конечных элементов в OPTUM G2. Стохастический анализ проведен с применением метода случайных конечных элементов (Random Finite Element Method — RFEM), в котором пространственная изменчивость параметров грунта задается с помощью теории случайного поля. Заданы вертикальные и горизонтальные корреляционные расстояния, коэффициенты вариации деформационных характеристик грунта для каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ).

Результаты. Детерминированные расчеты методом послойного суммирования показали осадки в пределах 22–51 мм, не превышающие допустимых значений. Однако численное моделирование с помощью МКЭ выявило значительно большие осадки (56–118 мм в зависимости от принятого модуля деформации насыпных грунтов). Вероятностный анализ продемонстрировал, что при модуле деформации насыпных грунтов 5 МПа вероятность превышения предельной осадки для фундамента I составляет 61 %, для фундамента II — 23 %. Установлена высокая вероятность (около 9 %) возникновения недопустимой неравномерности осадки между фундаментами II и III.

Выводы. Показано, что традиционные детерминистические методы расчета могут не выявлять потенциально опасные сценарии работы основания. Применение стохастической методологии (RFEM) позволяет количественно оценить надежность основания и риски превышения предельных деформаций. Для внедрения современных методов расчета требуется уточнение нормативной базы, в частности, методики определения глубины зоны влияния и обработки данных полевых исследований с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неопределенность, осадка, стохастический подход, зона влияния, ЭДЗ, пространственная изменчивость грунтов, физико-механические свойства грунтов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кропоткин М.П., Фоменко И.К., Горлов А.А. Практическое применение стохастических расчетов конечной осадки оснований плитных фундаментов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1101–1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113

Автор, ответственный за переписку: Михаил Петрович Кропоткин, singeos@yandex.ru.

Practical application of stochastic calculations of the final precipitation of plate foundations

Mikhail P. Kropotkin¹, Igor K. Fomenko², Andrey A. Gorlov²

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

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modelling of geotechnical systems faces the challenge of inaccuracy and incompleteness of data about the system being modelled. Existing deterministic methods for foundation design do not allow for a quantitative assessment of

risks associated with the spatial variability of soil properties. The aim of this research is to demonstrate the application of a probabilistic-stochastic approach based on the Random Finite Element Method (RFEM) for assessing the reliability and risk of exceeding allowable settlements of the foundations of a temple complex in Moscow.

Materials and methods. The study used engineering geological investigation data obtained by electric-contact dynamic sounding (ECDS) to analyze the spatial heterogeneity of soil mechanical properties. Two approaches were used to predict the final precipitation of the base: deterministic calculation using the layer-by-layer summation method and numerical modelling using the finite element method in OPTUM G2. Stochastic analysis was performed using the Random Finite Element Method (RFEM), in which the spatial variability of soil parameters is determined using random field theory. Vertical and horizontal correlation distances, as well as coefficients of variation for the deformation characteristics of the soil, were defined for each engineering-geological element.

Results. Deterministic calculations using the layer-by-layer summation method showed settlements in the range of 22–51 mm, not exceeding allowable limits. However, numerical modelling using FEM revealed significantly larger settlements (56–118 mm, depending on the assumed deformation modulus of the fill soils). Probabilistic analysis demonstrated that with a fill soil deformation modulus of 5 MPa, the probability of exceeding the limiting settlement for Foundation I is 61 %, and for Foundation II, 23 %. A high probability (approximately 9 %) of the occurrence of inadmissible differential settlement between Foundations II and III was established.

Conclusions. It is shown that traditional deterministic calculation methods may fail to identify potentially hazardous foundation performance scenarios. The application of stochastic methodology (RFEM) allows for a quantitative assessment of foundation reliability and the risks of exceeding limiting deformations. The implementation of modern calculation methods requires refinement of the regulatory framework, particularly regarding the methodology for determining the depth of the influence zone and the processing of field test data considering the spatial variability of soil properties.

KEYWORDS: uncertainty, settlement, stochastic approach, zone of influence, electric-contact dynamic sounding (ECDS), spatial variability of soils, physico-mechanical properties of soils

FOR CITATION: Kropotkin M.P., Fomenko I.K., Gorlov A.A. Practical application of stochastic calculations of the final precipitation of plate foundations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1101-1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113 (rus.).

Corresponding author: Mikhail P. Kropotkin, singeos@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Неточность и неполнота исходных данных ведут к неопределенности при моделировании сложных систем. Особенно критичен этот вопрос в строительстве, где обеспечение надежности зданий и сооружений определяет безопасность их эксплуатации. В геотехническом проектировании приняты два базовых концептуальных утверждения, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Абсолютно надежное геотехническое решение не существует.
2. Количественная оценка и управление надежностью возможны при использовании стохастического подхода [1–3].

В настоящей статье для расчета конечной осадки основания фундамента применялись метод конечных элементов (МКЭ) и рандомизированный метод конечных элементов (RFEM). Расчеты осадок выполнены в программном комплексе (ПК) OPTUM G2. Для определения физико-механических свойств, корреляционных расстояний и коэффициента вариации свойств грунтов использовались результаты статического и электроконтактного динамического зондирования (ЭДЗ).

Следует учитывать, что использование данных методов требует частичного пересмотра и дополнения действующих нормативных документов, в частности, в области расчета глубины активной зоны. Это, в свою очередь, значительно повысит качество инженерно-геологических данных и возможность их применения при численных расчетах [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные проблемы были рассмотрены на примере проектировавшегося храма в ЮАО г. Москвы. Внешний вид храма показан на рис. 1. Здание представляет собой проект храмового сооружения с габаритами в плане 63 × 25 м. Важной конструктивной особенностью является отсутствие подвала. Основные несущие конструкции запроектированы в виде неполного железобетонного каркаса с наружными несущими стенами из ячеистобетонных блоков. Планируемый тип фундамента — железобетонные плиты на естественном основании, каждая часть здания опирается на свой фундамент (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид проектируемого храма. Фундамент I находится под колокольной, фундамент III в правой части после арки

Fig. 1. External view of the designed temple. Foundation I is under the bell tower, Foundation III is in the right part beyond the arch

В ходе проведения инженерно-геологических изысканий на территории указанного объекта было пробурено пять инженерно-геологических скважин глубиной от 10 до 20 м, проведено 4 испытания грунтов методом статического зондирования и 3 испытания методом электроконтактного динамического зон-

дирования. Расположение выработок и направление линий инженерно-геологических разрезов показаны на рис. 2.

Согласно техническому заданию, глубина заложения всех фундаментов 2,0 м от дневной поверхности. Средние давления под подошвой трех плитных

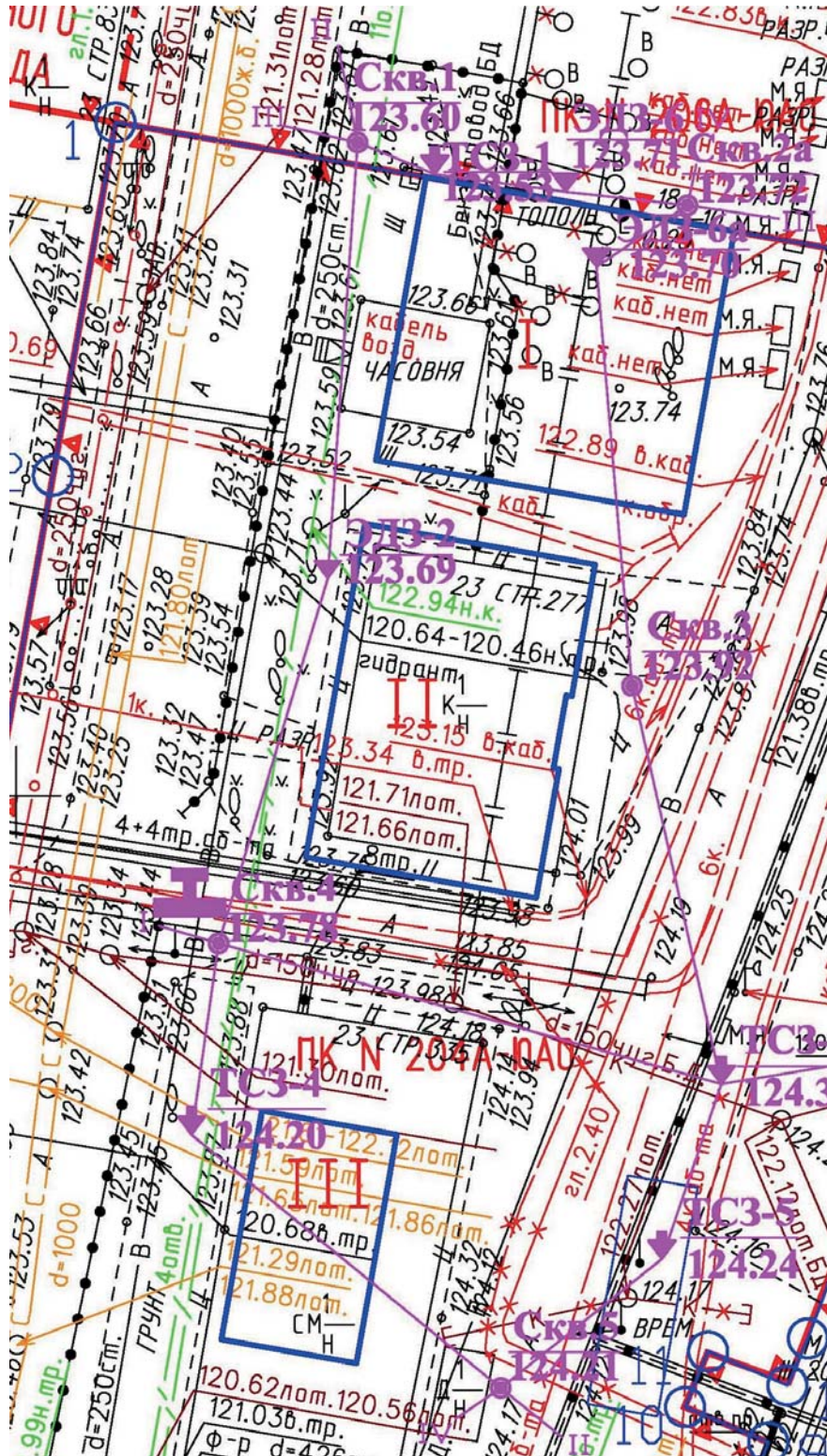


Рис. 2. Схема расположения фундаментов, выработок и расчетного разреза (II–II)

Fig. 2. Layout of foundations, boreholes/wells and the design cross-section (II–II)

фундаментов приведены на рис. 3. Предельные величины осадок оснований фундаментов: максимальная осадка не более 120 мм, максимальная относительная деформация не более 0,002.

Площадка строительства расположена на второй надпойменной террасе р. Москва. Современные верхне-четвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III-IV}) представлены песками от пылеватых до средней крупности и суглинками различной консистенции, мощность их 4,0–8,0 м. С поверхности они перекрыты толщей техногенных насыпных грунтов (tQ_{IV}) мощностью 3,4–6,4 м. Грунты слежавшиеся представлены песками от пылеватых до средней крупности, дресвой, реже супесями пластичными и суглинками тугопластичными. Подстилаются аллювиальные отложения верхнеюрскими глинами и алевроитами киммериджского (J_3km) и оксфордского ярусов (J_3ox)¹.

Реальные грунты основания обладают значительной изменчивостью физико-механических свойств (табл. 1) как закономерной, так и случайной. Осо-

бенно ярко изменчивость и анизотропность свойств выражены у техногенных грунтов. Это обусловлено тем, что сдвиговая прочность и деформируемость их зависят не только от наиболее сохранившихся частей и блоков исходных грунтов, но и от зон между ними. Эти зоны, представляющие собой ослабленные участки с нарушенной структурой, существенно влияют на поведение массива в целом. Между тем при инженерно-геологических исследованиях, как правило, для лабораторного изучения монолиты отбираются из наиболее сохранившихся частей и блоков. При этом свойства таких образцов сильно отличаются от свойств массива основания, завышая реальные характеристики.

Более достоверную информацию о свойствах насыпных грунтов можно получить с помощью полевых методов, в частности статического и динамического зондирования. Поскольку статическое зондирование общеизвестно, коротко опишем особенности аппаратуры и обработки результатов использованного метода динамического зондирования.

Электроконтактное динамическое зондирование представляет собой комплексный полевой метод, применяемый для изучения песчаных и глинистых грунтов. Помимо классического динамического зондирования, методика включает в себя токовый каротаж,

¹ Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях для строительства храма блаженной Ксении Петербургской в Даниловском по адресу: г. Москва, Автозаводская улица, вл. 23, стр. 277 // ООО НПП «Сингеос». 2021.

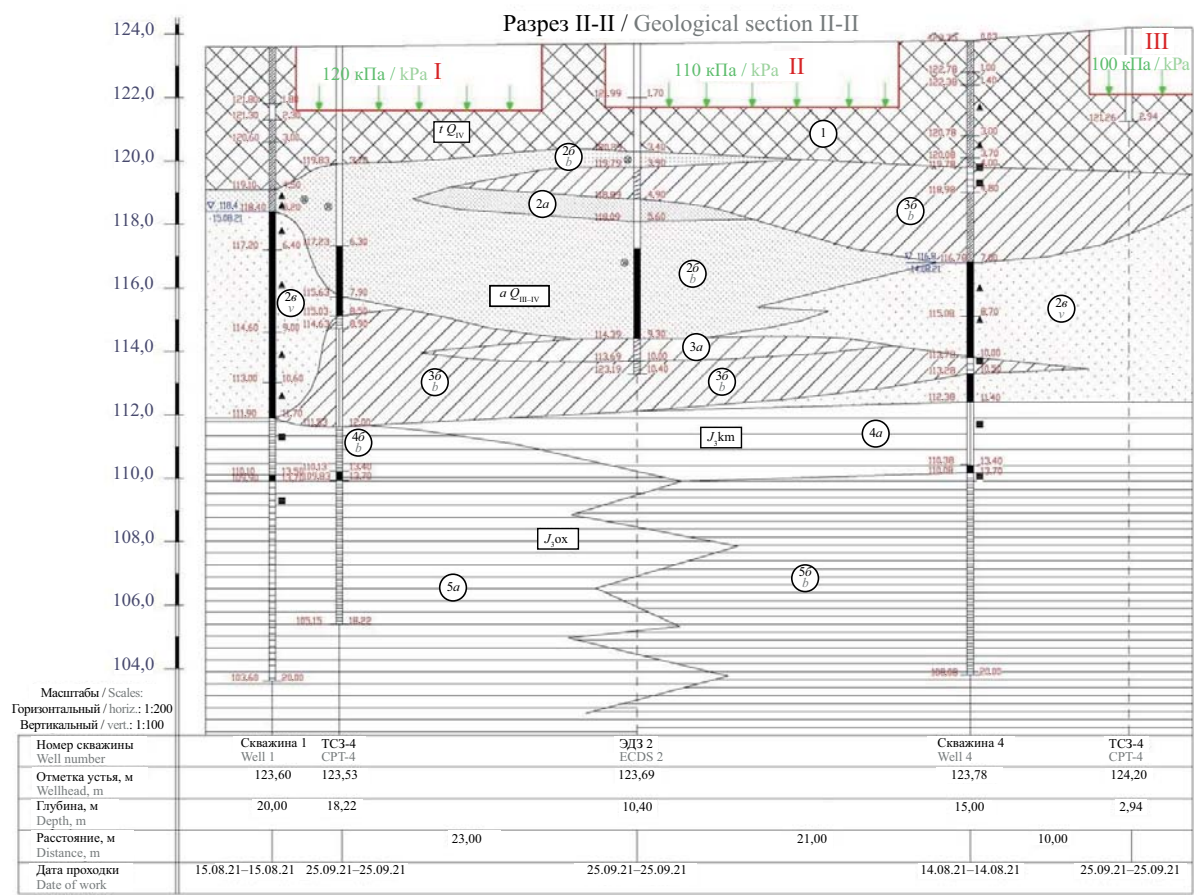


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез, по которому выполнены расчеты осадок

Fig. 3. Engineering-geological section used for settlement calculations

Табл. 1. Используемые физико-механические свойства грунтов

Table 1. Physical and mechanical properties of soils used in the analysis

Геологический индекс Geological index	Номер инженерно-геологических элементов Number of engineering-geological elements	Описание грунтов / Soil description	Плотность грунта γ , т/м ³ / Soil density, γ , t/m ³	Модуль деформации E , МПа / Deformation modulus E , MPa	Угол внутреннего трения φ , ° Angle of internal friction φ , °	Удельное сцепление C , кПа / Cohesion C , kPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio
tQ _{IV}	1	Насыпной грунт Bulk soil	16,5	8/5*	18	6	0,29
aQ _{III+IV}	2a	Песок пылеватый, рыхлый, влажный Sand (dusty, loose, moist)	16,8	4,5	19	0,5	0,33
	2б / b	Песок пылеватый, реже мелкий, средней плотности с линзами плотного, влажный и водонасыщенный Sand (dusty, less often fine, of medium density with dense lenses, moist and water saturated)	17,6	17	28	2,5	0,33
	2в / v	Песок средней крупности, средней плотности с линзами плотного, водонасыщенный Sand (medium size, medium density with dense lenses, water saturated)	18	41	36,5	2	0,31
	3a	Суглинок мягкопластичный, редко текучепластичный Loam (soft-ductile, rarely fluid ductile)	18,9	6,5	12	15	0,35
	3б / b	Суглинок тугопластичный, реже полутвердый с линзами супеси пластичной / Loam (ductile, less often semi-solid with lenses of ductile sandy loam)	19,3	18	18,5	28	0,35
J _{3km}	4a	Алевриты и глины легкие полутвердые, с прослоями тугопластичных / Loams and clays (sandy, semi-solid, with layers of ductile loams/clays)	19,2	20	17,5	40	0,39
	4б / b	Алевриты и глины легкие твердые Loams and clays (sandy, solid)	18,4	27	21,5	60	0,4
J _{3ox}	5a	Глины пылеватые полутвердые Clays (dusty, semi-solid)	17,5	20	17,5	65	0,41
	5в / v	Глины пылеватые твердые Clays (dusty, solid)	17,7	26	19	63	0,42

Примечание: * — в числителе нормативный модуль деформации по объекту в целом, в знаменателе то же по выработкам, находящимся в районе расчетного разреза II–II.

Note: * — in the numerator: design deformation modulus for the entire structure; in the denominator: the same for excavations located within the area of design cross-section II–II.

при котором в ходе погружения зонда фиксируются изменения силы тока на электроде в его наконечнике. Данные токового каротажа дают возможность разделить грунты по литологическому составу. Параллельно результаты динамического зондирования характеризуют физико-механические свойства этих грунтов. Совместная интерпретация обоих видов сведений

формирует таким образом целостную картину строения и характеристик грунтового массива.

Благодаря простоте конструкции и компактности установка ЭДЗ может применяться в условиях, где использование стандартного оборудования нецелесообразно или невозможно. На рис. 4 показаны комплектация и внешний вид установки. Процедуры

тарировки приборов и наконечников, а также специфика методики полевых работ детально изложены в литературных источниках² [5, 6].

Одним из ключевых преимуществ этого метода является возможность получить большое количество данных об условном динамическом сопротивлении грунта ρ_d , которые можно математически обработать. Использование специальной методики позволяет приблизительно оценить прочностные и деформационные свойства массива, включая ослабленные зоны, механические характеристики которых изучить другими методами не всегда представляется возможным. Кроме того, результаты ЭДЗ дают возможность провести количественный анализ неоднородности массива и применить эту информацию в стохастических расчетах.

При обработке результатов зондирования сведения, полученные с глубины до 1,0 м, исключены из анализа. Также были исключены аномально высокие показания динамического сопротивления грунта, обусловленные присутствием крупных включений, в основном фрагментов строительного мусора.

Обработка данных ЭДЗ выполнялась в рамках действующих нормативов и методических указаний [6, 7]. В ходе анализа были применены эмпирические зависимости, установленные в исследованиях Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве³. На основе этой информации в расчетную методику интегрированы дополнительные поправочные коэффициенты, учитывающие упругие деформации колонны штанг и специфику взаимодействия зонда с грунтовой средой.

Для насыпных грунтов данные ЭДЗ (с шагом записи 10 см) интерпретировались по особому алгоритму. В расчет принимались только минимальные поинтервальные значения динамического сопротивления грунта ρ_d , характерные для краевых зон отдельных обломков, участков их контакта и заполняющих прослоев более слабого, неструктурированного и часто более влажного грунта. Именно эти элементы определяют прочностные и деформационные свойства насыпного массива в целом. Отобранные значения ρ_d подвергались статистическому анализу и пересчитывались в механические характеристики с использованием пониженных (на 20–40 % в зависимости от параметров грунта) коэффициентов перехода по сравнению с грунтами ненарушенного сложения.

Аналогичный принцип был применен при обработке данных статического зондирования. Результаты обоих видов зондирования статистически обоб-

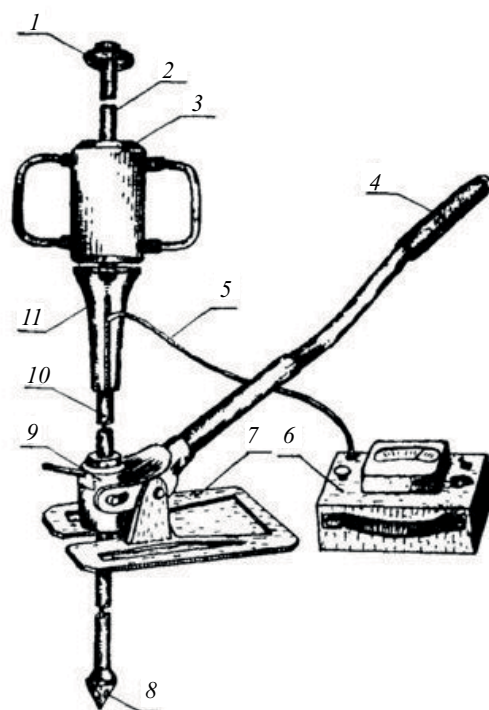


Рис. 4. Общий вид установки электроконтактного динамического зондирования: 1 — ограничитель высоты подъема молота; 2 — направляющая штанга; 3 — молот; 4 — рычаг извлекающего устройства; 5 — кабель, соединяющий контакты наконечника с измерительным прибором; 6 — измерительный прибор; 7 — опорная плита; 8 — инвентарный наконечник; 9 — самозахватывающий механизм; 10 — штанги; 11 — упор для молота

Fig. 4. General view of the electric-contact dynamic sounding setup: 1 — hammer lift height limiter; 2 — guide rod; 3 — hammer; 4 — extraction device lever; 5 — cable connecting the tip contacts to the measuring instrument; 6 — measuring instrument; 7 — base plate; 8 — inventory tip; 9 — self-latching mechanism; 10 — rods; 11 — hammer stop

щались по слоям, и на основе описанной методики определялись расчетные характеристики грунтов как для отдельной точки, так и для массива в целом.

Для последующего стохастического моделирования методом RFEM вертикальное корреляционное расстояние (CL_y) устанавливалось по эмпирическому методу Ванмарке (рис. 5). Этот метод основан на усреднении расстояний между последовательными пересечениями реализацией поля своего тренда. С достоверностью 80 % пространственную корреляцию можно оценить по формуле:

$$CL_y = 0,8 \frac{\sum h_i}{n}, \quad (1)$$

где h — длина i -го участка пересечения линии тренда, м; n — количество этих участков пересечения линии тренда.

Горизонтальное корреляционное расстояние CL_x рассчитывается по аналогичной методике. Измерялось расстояние между точками зондирования, в ко-

² Руководство по электроконтактному динамическому зондированию грунтов. М. : ВНИИ трансп. стр-ва, 1983. 62 с.

³ Изменения свойств грунтов под влиянием природных и антропогенных воздействий : сб. науч. тр. / под ред. Р.С. Зиянгинова. М. : Стройиздат, 1981. 131 с.

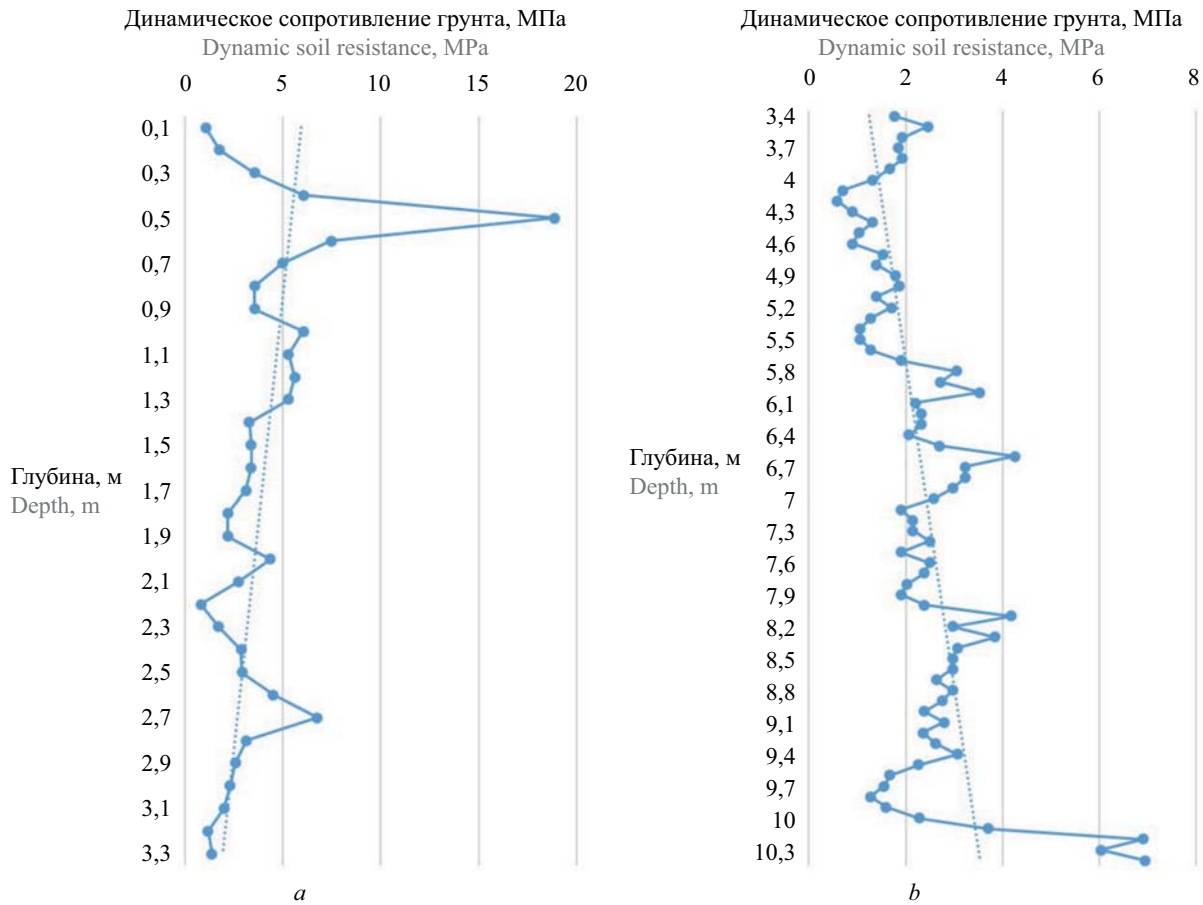


Рис. 5. Графики к определению вертикального корреляционного расстояния CL_y по ЭДЗ: *a* — насыпные грунты; *b* — природные грунты

Fig. 5. Graphs for determining the vertical correlation distance CL_y from ECDS data: *a* — bulk soils; *b* — natural soils

торых были получены параметры грунтов (данные динамического сопротивления, либо лобовое сопротивление) и относительно горизонтальной линии определялось количество интервалов пересечения.

Коэффициент вариации рассчитывался на основе всего массива данных. Значения коэффициентов вариации приведены в табл. 2.

Первоначально расчеты осадок всех трех фундаментов зданий раздельно выполнены методом послойного суммирования в соответствии с СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» п. 5.6.31. Расчет осадки в ПК OPTUM G2 выполнялся МКЭ, стохастические расчеты осадок реализованы с использованием рандомизированного метода конечных элементов (RFEM). Это относительно новый метод вероятностного анализа, в котором используется комбинация двумерной теории случайных полей и метода конечных элементов.

Пространственная изменчивость свойств грунта при применении данного подхода моделируется с помощью теории случайных полей [8], согласно этой теории, свойства грунта в пределах каждого ИГЭ или расчетного геологического элемента (РГЭ) представляют собой случайную величину. Эта величина описывается функцией распределения вероятностей

и обнаруживает статистическую связь со значениями в соседних зонах массива [9–14]. Параметры грунта задаются в узлах конечно-элементной сетки модели. Между узлами устанавливается корреляционная зависимость, определяемая вертикальным и горизонтальным корреляционными расстояниями, а также коэффициентами вариации параметров. Функция автокорреляции может быть оценена на основе сведений натурных или лабораторных испытаний, выполненных в различных точках массива, и рассчитана с использованием функции коэффициента корреляции Маркова:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \exp \left\{ - \sqrt{ \left(\frac{2\tau_x}{\theta_x} \right)^2 + \left(\frac{2\tau_y}{\theta_y} \right)^2 } \right\}, \quad (2)$$

где $R(\tau_x, \tau_y)$ — коэффициент автокорреляции, τ_x и τ_y — абсолютные расстояния между двумя точками в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно; θ_x и θ_y — корреляционные расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно [15].

Важной особенностью выполненных численных расчетов является методика расчета глубины актив-

Табл. 2. Параметры при стохастическом расчете
Table 2. Parameters used in the stochastic analysis

Номер ИГЭ EGE number	Коэффициенты вариации, % Coefficients of variation, %	Корреляционное расстояние X, м Correlation distance X, m	Корреляционное расстояние Y, м Correlation distance Y, m
1	26	6,5	0,38
3б / b	29	6,5	0,70
2б / b	29	6,5	0,70
2а	29	6,5	0,70
2в / v	29	6,5	0,70
3а	29	6,5	0,70
4б / b	29	6,5	0,70
4а	29	6,5	0,70
5а	14	30 (предполагаемое расстояние estimated distance)*	1 (предполагаемое расстояние estimated distance)*
5б / b	14	30 (предполагаемое расстояние estimated distance)*	1 (предполагаемое расстояние estimated distance)*

Примечание: * — данные корреляционные расстояния приняты на основе ранее выполненных расчетов для аналогичных грунтов.
Note: * — these correlation distances are adopted based on previously performed calculations for similar soils.

ной зоны, она определена согласно К. Терцаги [16], по формуле:

$$Z_l = 2B(1 + \log L/B), \tag{3}$$

где B — ширина; L — длина фундамента.

Корректность назначения граничных условий, в частности размеров (глубины) активной зоны, ключевым образом влияет на эффективность применения численного моделирования, а значит и качество результата [1–4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом послойного суммирования получены следующие результаты (при модуле деформации насыпных грунтов 8 МПа):

- 1. Плита I — сжимаемая толщина — 11,7 м, расчетная осадка — 51,4 мм.
- 2. Плита II — сжимаемая толщина — 9,3 м, расчетная осадка — 31,0 мм.
- 3. Плита III — сжимаемая толщина — 9,8 м, расчетная осадка — 21,8 мм.

Таким образом, полученные расчетные осадки значительно меньше предельно допустимых по техническому заданию. Неравномерность осадок между фундаментами I и II может оказаться выше допустимой, между фундаментами II и III она находится в допустимых пределах.

Результаты численных расчетов осадки фундаментов (рис. 6) в зависимости от принятого модуля деформации насыпных грунтов приведены в табл. 3.

Средние величины расчетных осадок, при численном моделировании, значительно больше полученных методом послойного суммирования. Отметим, что при расчете методом послойного суммирования разность осадок больше между плитами I и II и меньше между плитами II и III, численные расчеты показали обратное соотношение.

Обработка данных, получаемых при стохастическом расчете, определение стандартного отклонения и среднего значения общих деформаций позволяют построить кумулятивную кривую функции распределения (рис. 7), на основе которой устанавливается вероятность превышения заданного значения осадки (табл. 4).

При анализе возможной неравномерности осадок (табл. 5) необходимо учитывать, что наиболее неблагоприятным является случай, когда на одном из соседних фундаментов осадки с заданной вероятностью максимальны, а на другом — минимальны.

Расчет с помощью МКЭ показал недопустимо большую разность осадок между фундаментами II и III не только в стохастической, но и в детерминированной постановке. Вероятностный расчет продемонстрировал возможность, причем весьма реальную (*вероятность события = $0,3 \cdot 0,3 = 9\%$), превышения допустимой неравномерности осадок в 1,5–2 и более раз, что явно ведет к аварийной ситуации.

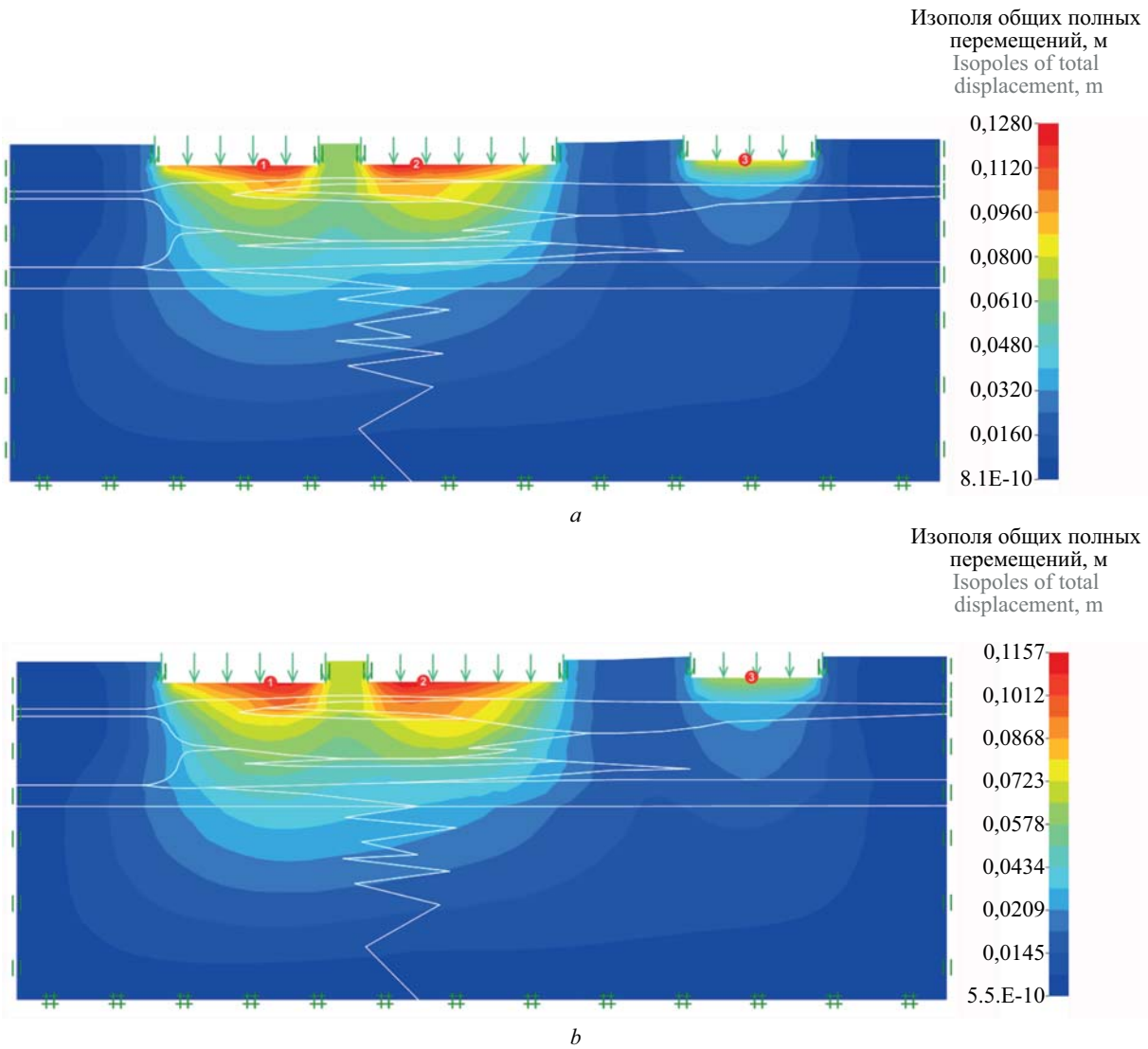


Рис. 6. Результат стохастического расчета осадки фундамента: *a* — модуль деформации насыпных грунтов 5 МПа; *b* — модуль деформации насыпных грунтов 8 МПа

Fig. 6. The result of stochastic calculation of the foundation precipitation: *a* — the modulus of deformation of bulk soils is 5 MPa; *b* — the modulus of deformation of bulk soils is 8 MPa

Табл. 3. Осадки фундаментов по результатам детерминированного и стохастического расчетов

Table 3. Foundation settlements from deterministic and stochastic analysis results

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Номер плитного фундамента Plate foundation number	Детерминированный расчет, см Deterministic calculation, cm	Стохастический расчет (вероятность 50 %), см Stochastic calculation (probability 50 %), cm
5	I	11,8	12,2
	II	11	11,4
	III	7	7,3
8	I	10,7	11,1
	II	10	10,5
	III	5,6	5,8

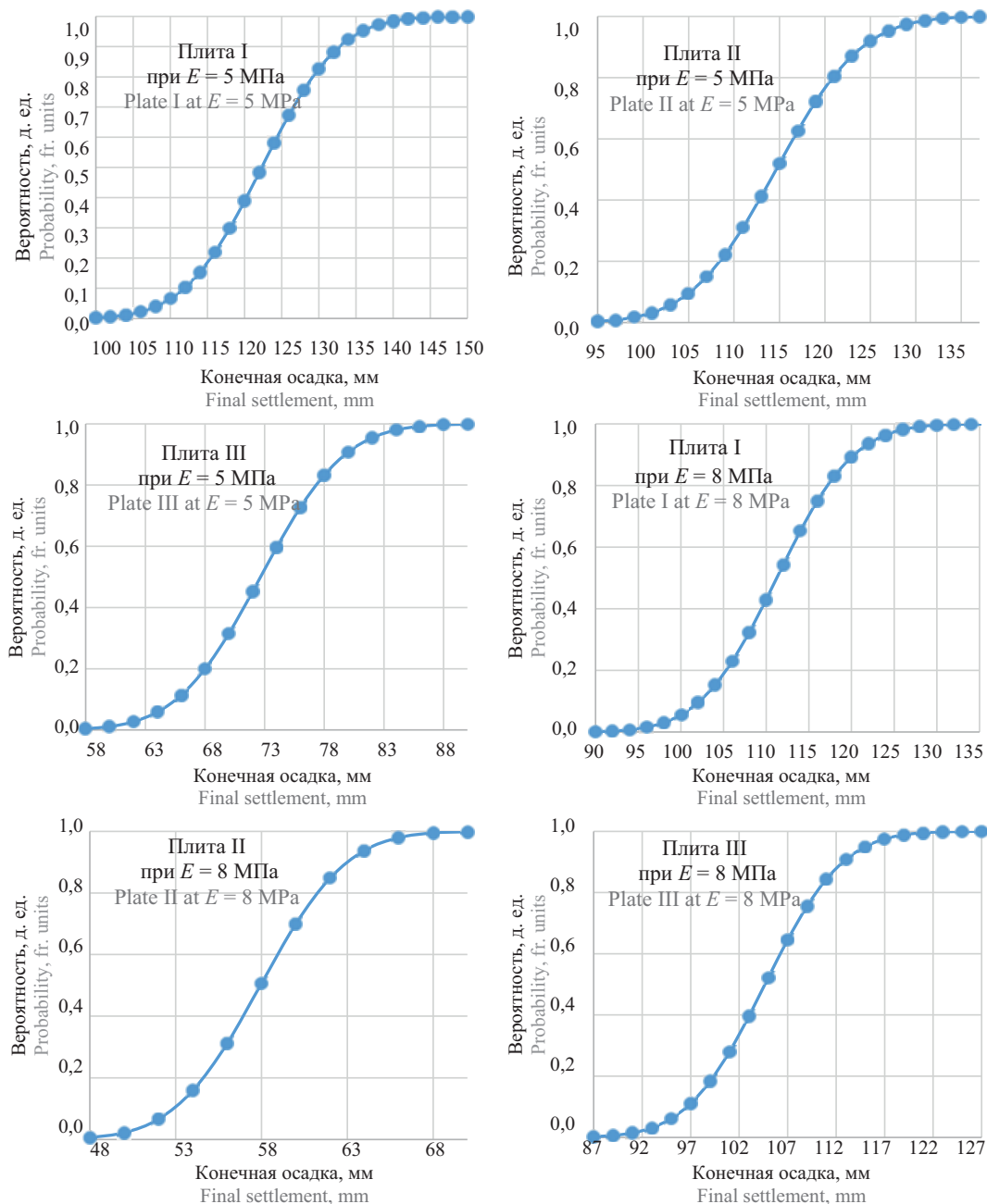


Рис. 7. Кумулятивные кривые функции распределения общих деформаций по результатам стохастического расчета при разном модуле деформации насыпных грунтов

Fig. 7. Cumulative distribution functions of total deformations from stochastic analysis results for different deformation moduli of fill soils

Табл. 4. Вероятность превышения допустимых величин осадок фундаментов

Table 4. Probability of exceeding allowable foundation settlements

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа / Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Номер плитного фундамента Plate foundation number	Вероятность превышения предельной осадки, % / Probability of exceeding the limiting settlement, %
5	I	61
	II	23
	III	0
8	I	10
	II	1
	III	0

Табл. 5. Возможность превышения допустимых неравномерностей осадок
Table 5. Probability of exceeding allowable differential settlements

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Сравниваемые плиты Compared plates	Вероятность* Probability*	Разность осадок, мм Difference in settlements, mm	Расстояние, м Distance, m	Допустимая разность осадок, мм / Allowable settlement difference, mm
5	I–II	0,3	127 – 111 = 16	4,6	9
	II–III	0,3	118 – 70 = 48	13,0	26
8	I–II	0,3	115 – 101 = 14	4,6	9
	II–III	0,3	108 – 56 = 52	13,0	26

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующая методология расчетов, основанная на детерминистическом подходе, должна в конечном итоге трансформироваться в концепцию применения вероятностных подходов в геотехнике. Стохастическая методология позволяет оценить не только формальную надежность основания на базе целого ряда не всегда оправданных допущений (нормальный закон распределения свойств, отсутствие трендов и т.д.), но и выполнить расчет надежности, количественный и качественный анализ риска⁴ [17]. Через выявление основных факторов, обуславливающих неопределенность, может быть выполнено доизучение массива оптимальным образом.

В случаях, когда количество точек статического и/или динамического зондирования недостаточно, или они полностью отсутствуют, можно рекомендовать проведение вероятностных расчетов осадок с использованием общих инженерно-геологических закономерностей строения массивов.

В центральном регионе европейской части РФ средняя мощность выделяемых ИГЭ и РГЭ состав-

⁴ Engineer Technical Letter 1110-2-547. United States Army Corps of Engineers. Engineering and Design: Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering. Department of the Army, Washington, DC, USA. 1997.

1. Griffiths D.V. Geotechnical probability: From FOSM to RFEM // 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk (ISGSR 2022). 2022. Pp. 1–14. DOI: 10.3850/978-981-18-5182-7_00-00-006.xml

2. Mohapatra D., Rahaman O., Kumar J. An Adaptive-Based Finite Element Limit Analysis Approach for Geo-mechanics Problems // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Pp. 1055–1065. DOI: 10.1007/978-981-15-6086-6_85

ляет 2–4 м, соответственно вертикальные корреляционные расстояния ориентировочно можно принять 1–2 м. Для насыпных грунтов эти расстояния, как правило, ниже — 0,3–1,0 м. Средние расстояния между скважинами, рекомендуемые нормативными документами на основе огромного опыта изысканий, для II категории сложности инженерно-геологических условий, составляют около 30 м, в связи с чем горизонтальные корреляционные расстояния во флювиогляциальных, озерно-ледниковых и грунтах высоких террас можно ориентировочно принимать 15 м, в моренных грунтах — 20–25 м соответственно, в грунтах пойм рек — 5–10 м, в насыпных грунтах — 3–10 м, в меловых и юрских отложениях — 20–25 м. При этом надо отдавать себе отчет в сниженной точности оценок при использовании подобных закономерностей.

Внедрение современных методов расчетов требует также корректного определения ключевых параметров модели, таких как, например, глубина сжимаемой толщи. Сравнение различных подходов к ее определению показывает, что использование методов, описанных в нормативных документах, может привести к существенным погрешностям в получаемых результатах. Важно продолжать процесс совершенствования нормативной базы и методических рекомендаций для обеспечения достоверности получаемой инженерно-геологической информации.

3. Phoon K.-K. Reliability-based design in Geotechnical Engineering. London and New-York : Taylor & Francis, 2008. DOI: 10.1201/9781482265811

4. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горлов А.А., Аверин И.В., Шубина Д.Д. Оценка сжимаемой толщи оснований фундаментов при численном моделировании // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 65–70. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.08.65-70. EDN ERSYVS.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 7, 2026
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 7, 2026

5. Буянов В.В., Кропоткин М.П., Пригода В.Я. Полевые работы по исследованию грунтов методом электродинамического зондирования // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 46–53. EDN RCDKCP.

6. Пригода В.Я. Методические рекомендации по производству электродинамического зондирования при инженерно-геологических изысканиях. М. : ЦНИИС, 1980.

7. Asadollahi S.M., Fakher A., Javankhoshdel S. A Case Study of the Measurement of the Spatial Correlation Length of Soil Parameters Using SPT and CPT Field Tests Data // Atlantis Highlights in Engineering. 2023. Pp. 666–678. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_62

8. Vanmarcke E. Random Fields, Analysis and Synthesis. Cambridge : MIT Press, 1983. 393 p.

9. Baninajarian L., Javankhoshdel S., Bashir R. Probabilistic Analysis of an Embankment Under Extreme Rainfall Events Considering Spatial Variability of Soil Strength Parameters // Atlantis Highlights in Engineering. 2023. Pp. 79–89. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_8

10. Dastpak P., Sousa R.L., Salles-Najar F., Javankhoshdel S., Dias D. Probabilistic Analysis of a Nailed Wall: Use of the Random Field Theory and Ordered Weighted Averaging Method // International Journal of Geomechanics. 2024. Vol. 24. Issue 12. DOI: 10.1061/ijgnai.gmeng-9887

11. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. Issue 3. Pp. 665–683. DOI: 10.1139/t02-034

12. Биндер К., Хеерман Д.В. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. М. : Физматлит, 1995. 141 с.

13. Жданов Э.Р., Маликов Р.Ф., Хисматуллин Р.К. Компьютерное моделирование физических явлений и процессов методом Монте-Карло. Уфа : БГПУ, 2005. 124 с. EDN VVVBSR.

14. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. М. : Академия, 2006. 366 с. EDN QMQLKT.

15. Javankhoshdel S., Cami B., Bathurst R.J., Corum B. Probabilistic analysis of layered slopes with linearly increasing cohesive strength and 2D spatial variability of soil strength parameters using non-circular RLEM approach // IFCEE 2018. 2018. Pp. 113–142. DOI: 10.1061/9780784481585.014

16. Terzaghi K., Peck R., Mesri G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1996. 549 p.

17. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta : GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.

Поступила в редакцию 28 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 31 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Петрович Кропоткин** — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; singeos@yandex.ru;

Игорь Константинович Фоменко — доктор геолого-минералогических наук; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; ifolga@gmail.com;

Андрей Александрович Горлов — аспирант; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; andrey.gorlov10@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Griffiths D.V. Geotechnical probability: From FOSM to RFEM. 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk (ISGSR 2022). 2022; 1-14. DOI: 10.3850/978-981-18-5182-7_00-00-006.xml

2. Mohapatra D., Rahaman O., Kumar J. An Adaptive-Based Finite Element Limit Analysis Approach for Geo-mechanics Problems. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020; 1055-1065. DOI: 10.1007/978-981-15-6086-6_85

3. Phoon K.-K. Reliability-based design in Geotechnical Engineering. London and New-York, Taylor & Francis, 2008. DOI: 10.1201/9781482265811

4. Fomenko I.K., Zerkal O.V., Gorlov A.A., Averin I.V., Shubina D.D. Estimation of the compressible thickness of the foundations in numerical modeling. Industrial and Civil Engineering. 2024; 8:65-70. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.08.65-70. EDN ERSYVS. (rus.).

5. Buyanov V.V., Kropotkin M.P., Prigoda V.Ya. *Fields works for soil investigation by the electrodynamic testing method. Engineering Survey*. 2013; 8:46-53. EDN RCDKCP. (rus.).
6. Prigoda V.Ya. *Methodological Recommendations for Electrodynamic Probing in Engineering Geological Surveys*. Moscow, TsNIIS, 1980. (rus.).
7. Asadollahi S.M., Fakher A., Javankhoshdel S. A Case Study of the Measurement of the Spatial Correlation Length of Soil Parameters Using SPT and CPT Field Tests Data. *Atlantis Highlights in Engineering*. 2023; 666-678. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_62
8. Vanmarcke E. *Random Fields, Analysis and Synthesis*. Cambridge, MIT Press, 1983; 393.
9. Baninajarian L., Javankhoshdel S., Bashir R. Probabilistic Analysis of an Embankment Under Extreme Rainfall Events Considering Spatial Variability of Soil Strength Parameters. *Atlantis Highlights in Engineering*. 2023; 79-89. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_8
10. Dastpak P., Sousa R.L., Salles-Najar F., Javankhoshdel S., Dias D. Probabilistic Analysis of a Nailed Wall: Use of the Random Field Theory and Ordered Weighted Averaging Method. *International Journal of Geomechanics*. 2024; 24(12). DOI: 10.1061/ijgnai.gmeng-9887
11. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002; 39(3):665-683. DOI: 10.1139/t02-034
12. Binder K., Heerman D.W. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. Moscow, Fizmatlit, 1995; 141. (rus.).
13. Zhdanov E.R., Malikov R.F., Khismatullin R.K. *Computer Simulation of Physical Phenomena and Processes by the Monte Carlo Method*. Ufa, BSPU, 2005; 124. EDN VVVBSR. (rus.).
14. Mikhailov G.A., Voitishchek A.V. *Numerical Statistical Modeling*. Moscow, Academy, 2006; 368. EDN QMQLKT. (rus.).
15. Javankhoshdel S., Cami B., Bathurst R.J., Corum B. Probabilistic analysis of layered slopes with linearly increasing cohesive strength and 2D spatial variability of soil strength parameters using non-circular RLEM approach. *IFCEE 2018*. 2018; 113-142. DOI: 10.1061/9780784481585.014
16. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1996; 549.
17. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. *An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1*. Calgary, Alberta, GEO-SLOPE International Ltd., 2004; 396.

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on March 31, 2026.

Approved for publication on March 31, 2026.

B I O N O T E S: **Mikhail P. Kropotkin** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; singeos@yandex.ru;

Igor K. Fomenko — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; ifolga@gmail.com;

Andrey A. Gorlov — postgraduate student; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; andrey.gor10@yandex.ru.

Author contributions: all authors have contributed equally to the preparation of this publication.

The authors declare no conflict of interest.