

УДК 004.942+624.131.37

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.001)

## Анализ устойчивости водонасыщенных грунтов при циклическом воздействии: математические модели и прогнозы

Н.Р. Тишин<sup>1,2✉</sup>, О.Р. Озмидов<sup>2</sup>, А.В. Пролетарский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО МОСТДОРГЕОТРЕСТ, Москва, Российская Федерация

**Резюме.** В статье рассматривается математическое моделирование разжижения грунтов под воздействием динамических нагрузок, таких как сейсмические штормовые или техногенные циклические воздействия. Процесс разжижения, при котором грунт теряет прочность и несущую способность, имеет критическое значение для оценки безопасности строительных объектов, особенно в районах с повышенной сейсмической активностью или с водонасыщенными грунтами. Для моделирования использовались несколько подходов, включая следующие функции: экспоненциальная функция из работы Н. Bilge et al. (2009), логарифмическая функция из работы V. Lentini et al. (2018), Пауэр-функция (степенная), предложенная С. Guoxing et al. (2018), дополнительная логарифмическая функция из исследования Е. Meziane et al. (2021), гиперболическая функция, предложенная авторами, которые аппроксимировали устойчивость грунта к циклическим воздействиям. В исследовании были проанализированы данные лабораторных испытаний для различных типов грунтов, объединенных в инженерно-геологические элементы. Каждая функция была проанализирована с точки зрения точности аппроксимации, с использованием метода наименьших квадратов, что позволило минимизировать отклонения между экспериментальными и теоретическими значениями. При оценке функций учитывалось, как каждая из них ведет себя при большом числе циклов нагружения, что важно для прогнозирования разжижения при интенсивных и продолжительных нагрузках. Выбор оптимальной функции производился с помощью сравнения метрик MSE и  $R^2$ , представленных в таблицах результатов. Применение результатов исследования имеет практическое значение в геотехническом проектировании, особенно для расчета фундаментов и подземных конструкций в условиях потенциально разжижаемых грунтов. Выбор наиболее подходящей функции для моделирования разжижения грунтов позволяет предсказать устойчивость грунтов при длительных и интенсивных циклических нагрузках, минимизируя риск деформации и разрушения конструкций.

**Ключевые слова:** разжижение грунтов, математическое моделирование, геотехническая инженерия, динамические нагрузки, функция разжижения грунтов, потенциал разжижения.

**Для цитирования:** Тишин Н.Р., Озмидов О.Р., Пролетарский А.В. Анализ устойчивости водонасыщенных грунтов при циклическом воздействии: математические модели и прогнозы. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1765> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.001

## Analysis of the stability of water-saturated soils under cyclic influence: mathematical models and forecasts

N. R. Tishin<sup>1,2✉</sup>, O.R. Ozmidov<sup>2</sup>, A.V. Proletarsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup>JSC MOSTDORGEOTREST, Moscow, the Russian Federation

**Abstract.** The article discusses the mathematical modeling of soil liquefaction under the influence of dynamic loads, such as seismic, storm, or technogenic cyclic impacts. The liquefaction process, in which soil loses strength and bearing capacity, is critical for assessing the safety of construction objects, especially in areas with increased seismic activity or water-saturated soils. Several approaches were used for modeling, including the following functions: the exponential function from the work of H. Bilge et al. (2009), the logarithmic function from the work of V. Lentini et al. (2018), the power function (polynomial) proposed by C. Guoxing et al. (2018), an additional logarithmic function from the study of E. Meziane et al. (2021), and a hyperbolic function proposed by the authors of this article, which approximated the soil's resistance to cyclic impacts. The study analyzed laboratory test data for various soil types, combined into engineering-geological elements. Each function was analyzed in terms of approximation accuracy using the least squares method, which minimized the deviations between experimental and theoretical values. When evaluating the functions, consideration was given to how each behaves under a large number of loading cycles, which is important for predicting liquefaction under intense and prolonged loads. The selection of the optimal function was made by comparing the MSE and  $R^2$  metrics presented in the results tables. The application of the research results has practical significance in geotechnical design, especially for calculating foundations and underground structures in conditions of potentially liquefiable soils. Choosing the most suitable function for modeling soil liquefaction allows predicting soil stability under long-term and intense cyclic loads, minimizing the risk of deformation and destruction of structures.

**Keywords:** soil liquefaction, mathematical modeling, geotechnical engineering, dynamic loads, soil liquefaction function, liquefaction potential.

**For citation:** Tishin N.R., Ozmidov O.R., Proletarsky A.V. Analysis of the stability of water-saturated soils under cyclic influence: mathematical models and forecasts. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1765> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.001

## Введение

Разжижение грунтов представляет собой явление, при котором при воздействии циклических нагрузок грунт теряет свои прочностные и несущие свойства, переходит в текучее состояние. Данное явление сопровождается разрывом структурных связей грунта<sup>1</sup> [1, 2]. Процесс разжижения грунта можно наглядно представить, используя модель рыхлоуложенных несвязных частиц (шаров). В нормальном состоянии частицы (шары) образуют структуру с множеством точек контакта (Рисунок 1а). Однако если структура разрушается, например, смещением верхнего ряда частиц, они временно занимают положение, при котором контакт между ними утрачивается (Рисунок 1б). В этом состоянии частицы верхнего ряда под действием силы тяжести стремятся провалиться в промежутки между нижними рядами, создавая более плотную укладку (Рисунок 1в).

Поскольку пространство между частицами заполнено водой, этот процесс перемещения замедляется, так как вода должна вытесниться. Временное отсутствие контактов между частицами (шариками), когда они находятся в «подвешенном» состоянии, приводит к разжижению. В таком состоянии грунт теряет способность передавать давление от собственного веса или внешней нагрузки, что делает его склонным к растеканию.

<sup>1</sup> Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Оценка потенциала грунтов к разжижению. ГеоИнфо. URL: <https://geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/ocenka-potenciala-gruntov-k-razzhizheniyu-40984.shtml> (дата обращения: 20.06.2024).

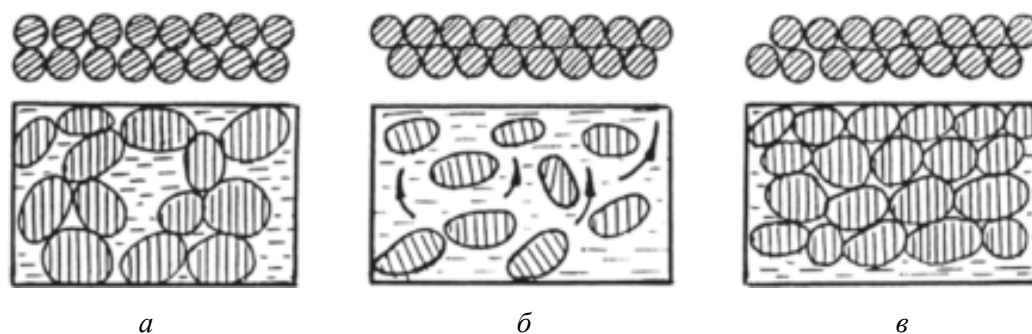


Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая переход несвязных водонасыщенных грунтов в разжиженное состояние: а – нормальное состояние грунта; б – разжиженное состояние грунта, связи между частицами разрушены; в – уплотненный грунт после отжатия воды и оседания частиц

Figure 1 – A diagram illustrating the transition of disconnected water-saturated soils to a liquefied state: a – the normal state of the soil; б – the liquefied state of the soil, the bonds between the particles are destroyed; c – compacted soil after squeezing water and settling of particles

Явление разжижения грунтов особенно характерно для водонасыщенных песчаных и мелкозернистых почв и может происходить, например, при землетрясениях.

Cyclic Resistance Ratio (CRR) – это показатель сопротивления грунта циклическим нагрузкам или способность грунта противостоять разжижению, определяемый как значение циклического сдвигового напряжения (Cyclic Stress Ratio, CSR), при котором при заданном цикле N происходит разжижение грунта. Коэффициент приведенного CSR (1) показывает соотношение между амплитудой максимального касательного напряжения в грунте и эффективным вертикальным обжимающим давлением. Потенциал разжижения (или Liquefaction Potential,  $F_L$ ) (1) – это способность грунта подвергаться разжижению при определенных условиях. Потенциал разжижения зависит от ряда факторов: состава и плотности грунта, уровня подземных вод, интенсивности и продолжительности динамической нагрузки. Определение функции CRR от количества циклов нагружения позволяет прогнозировать, при каком уровне повторяющихся нагрузок произойдет разжижение грунта. Это критически важно для строительства инфраструктуры на потенциально нестабильных грунтах, так как позволяет рассчитывать параметры фундамента и предотвращать возможные катастрофические последствия.

$$\begin{cases} CSR = \frac{\tau_{\alpha}}{\sigma_1'} \\ F_L = \frac{CRR}{CSR} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\alpha}$  – среднее значение ожидаемых циклических напряжений сдвига при землетрясении,  $\sigma_1'$  – вертикальное эффективное напряжение.

Оценка разжижения грунтов необходима для минимизации рисков, связанных с разрушением зданий и сооружений. Разжижение грунтов является одной из ключевых причин серьезных повреждений и разрушений зданий и инфраструктуры после землетрясений [3, 4]. Известные землетрясения, такие как Ниигатское землетрясение 1964 года, землетрясение в Кобе 1995 года, Спитакское землетрясение 1988 года, Нефтегорское землетрясение 1995 года и Олюторское землетрясение 2006 года, показали, что наибольшие повреждения получили строения, возведенные на водонасыщенных грунтах, разжижение которых произошло под воздействием сейсмических волн [5]. Землетрясение магнитудой 7,4 вызвало значительное

разжижение грунтов на Тибетском плато в Китае, что привело к разрушению зданий и инфраструктуры. Исследование [6] детализирует ущерб, причиненный разжижением грунтов.

В российской практике исследование разжижения особенно актуально для районов с повышенной сейсмичностью и насыщенными грунтовыми водами, таких как Баренцево море и Куйбышевское водохранилище. Согласно исследованию Моргунова К.П. и Колосова М.А. [2], неучет свойств разжижения при строительстве гидротехнических сооружений может привести к значительным разрушениям, так как водонасыщенные пески подвержены утрате своей устойчивости.

Российские стандарты, такие как ГОСТ Р 56353-2022 «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов» и СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», устанавливают критерии для оценки сейсмостойкости сооружений, особенно в условиях возможного разжижения. Научные исследования подтверждают, что точное определение функции разжижения и CSR позволяет оптимизировать конструктивные решения и улучшить долговечность объектов. Например, работы российских ученых и публикации таких исследователей, как Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. по теме разжижения грунтов подтверждают важность учета данного явления при проектировании зданий и сооружений [7].

### Материалы и методы

В данной работе был произведен анализ качества аппроксимации лабораторных данных различными функциями, моделирующими линии разжижения при различных числах циклов. Для аппроксимации лабораторных данных заданными функциями был использован метод наименьших квадратов, минимизирующий сумму квадратов отклонений теоретических и фактических значений (2), реализованный с помощью библиотеки python numpy:

$$S = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (2)$$

где  $y_i$  – фактические значения исходного ряда,  $\hat{y}_i$  – расчетные (теоретические) значения исходного ряда.

Для сравнения качества аппроксимации заданными функциями реальных лабораторных данных были построены и проанализированы функции ошибок:

$$\varepsilon = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}. \quad (3)$$

Отображение результатов моделирования и обработки производилось с использованием библиотеки python matplotlib.

Для анализа выбраны следующие функции:

1. Экспоненциальная функция из работы Н. Bilge et al. [8]:

$$N = \alpha \cdot e^{\beta \cdot CSR}. \quad (4)$$

Выразим CSR через N для удобства:

$$CSR = \frac{\ln(\frac{N}{\alpha})}{\beta}. \quad (5)$$

2. Логарифмическая функция из работы V. Lentini et al. [9]:

$$CSR = \alpha \cdot \log(N) + \beta. \quad (6)$$

3. Пауэр-функция (степенная) из работы С. Guoxing et al. [10]:

$$N = \alpha \cdot CSR^\beta. \quad (7)$$

Выразим CSR через N для удобства:

$$CSR = \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (8)$$

4. Логарифмическая функция из работы E. Meziane et al. [11]:

$$CSR = \frac{\alpha - \ln(N)}{\beta}. \quad (9)$$

5. Гиперболическая функция, предложенная авторами исследования:

$$CSR = \frac{\beta}{N^{1-\alpha}}. \quad (10)$$

В функциях (4)–(10), параметры  $\alpha, \beta$  – это коэффициенты, определяемые эмпирически.

Анализируем поведение функций при бесконечном числе циклов нагружения:

1. Экспоненциальная функция (4):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln\left(\frac{N}{\alpha}\right)}{\beta} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln(N) - \ln(\alpha)}{\beta} = \begin{cases} \infty, & \text{если } \beta > 0 \\ -\infty, & \text{если } \beta < 0 \end{cases}. \quad (11)$$

2. Логарифмическая функция (6):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \alpha \cdot \log(N) + \beta = \begin{cases} \infty, & \text{если } \beta > 0 \\ -\infty, & \text{если } \beta < 0 \end{cases}. \quad (12)$$

3. Пауэр-функция (степенная) (7):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \begin{cases} \infty, & \text{если } \beta > 0 \\ 0, & \text{если } \beta < 0 \end{cases}. \quad (13)$$

4. Логарифмическая функция (9):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\alpha - \ln(N)}{\beta} = \begin{cases} -\infty, & \text{если } \beta > 0 \\ \infty, & \text{если } \beta < 0 \end{cases}. \quad (14)$$

5. Гиперболическая функция (10):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\beta}{N^{1-\alpha}} = \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha > 1 \\ \beta, & \text{если } \alpha = 1 \\ \infty, & \text{если } \alpha < 1 \end{cases}. \quad (15)$$

Из формул (11)–(15) видно, что только Пауэр-функция и гиперболическая функция могут иметь конечный предел при определенных параметрах. Поскольку нередко решается задача экстраполяции лабораторных данных, например, вычисление цикла разрушения при штормовом воздействии, которое может насчитывать больше 30000 циклов, требуется контроль и проверка параметров для функций, не имеющих конечного предела, равного 0. Это связано с тем, что значение CSR не задается отрицательным.

Поскольку функция быстро убывает на начальном участке (1–200 циклов), и при этом медленно убывает при возрастании N после начального участка, для наглядности отображения данных был выбран логарифмический масштаб по оси N (Рисунок 2).



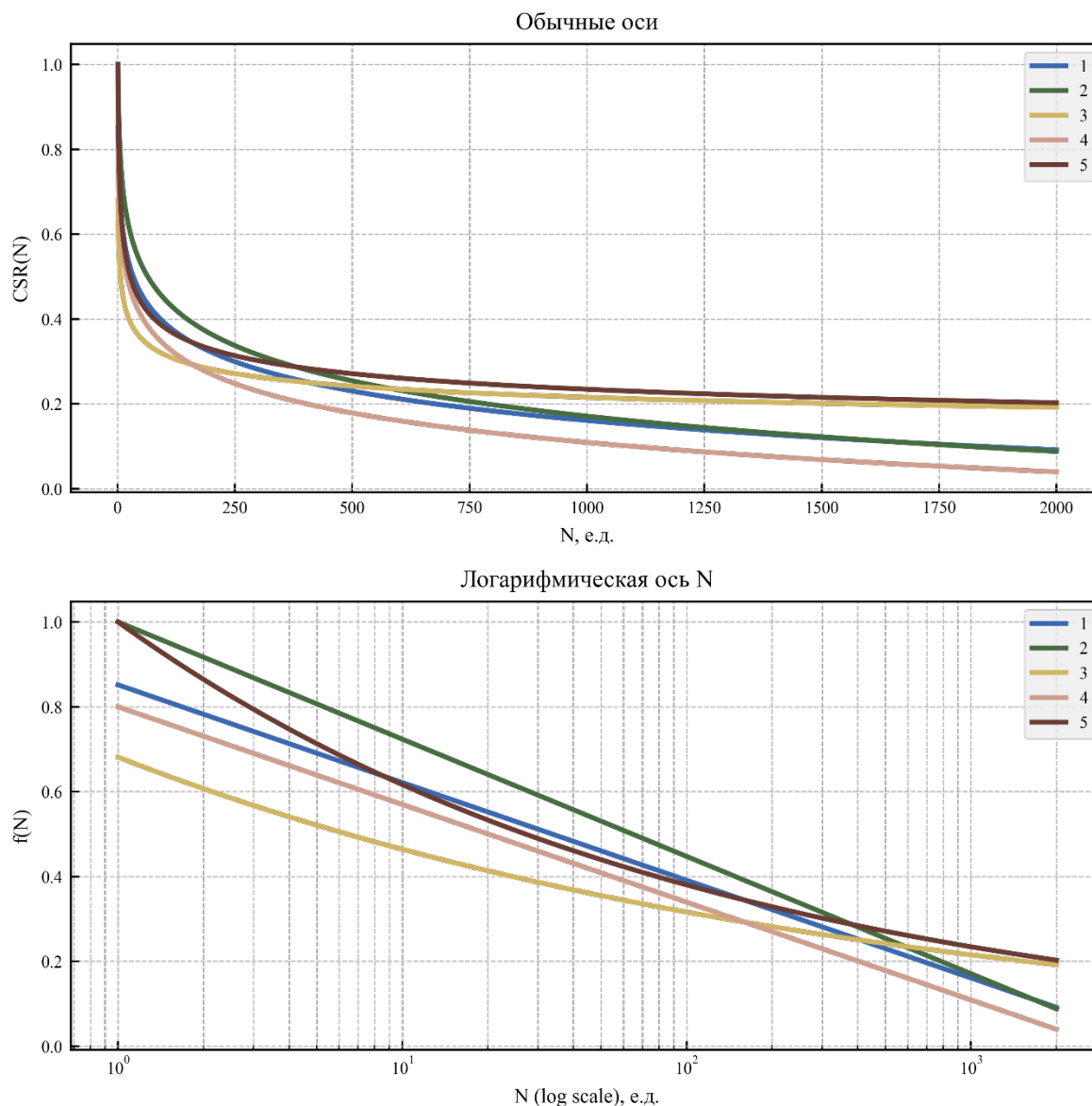


Рисунок 2 – Графики исследуемых функций с произвольными параметрами:  
1 – экспоненциальная функция (4) [8], 2 – логарифмическая функция (6) [9], 3 – Пауэр-функция (степенная) (7) [10], 4 – логарифмическая функция (9) [11], 5 – гиперболическая функция (10), предложенная авторами исследования

Figure 2 – Graphs of the studied functions with arbitrary parameters: 1 – exponential function (4) [8], 2 – logarithmic function (6) [9], 3 – Power function (7) [10], 4 – logarithmic function (9) [11], 5 – hyperbolic function (10), proposed by the authors of the study

### Результаты

Для анализа были использованы образцы из одного объекта, результаты динамических испытаний, проведенные по методикам, представленным в ГОСТ Р 56353-2022 «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов», были объединены в инженерные геологические элементы (ИГЭ). Каждый ИГЭ содержит 6 испытаний. Данные по результатам испытаний и типам грунтов представлены в Таблице 1. На Рисунке 3 изображены лабораторные данные.

Подготовка данных, а также их выборка осуществлялись с помощью системы комплексного хранения данных геологических лабораторных испытаний [12], разработанной лабораторией АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ».

Таблица 1 – Результаты лабораторных испытаний  
Table 1 – Laboratory test results

№	ИГЭ	Наименование грунта	CSR, д.е.	Цикл разрушения N <sub>fail</sub> , ед.
1	7	Суглинок тугопластичный	0,3	7
2		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,2	78
3		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,21	142
4		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,15	288
5		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,15	309
6		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,14	558
7	4	Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,31	8
8		Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,2	117
9		Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,18	189
10		Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,16	259
11		Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,16	189
12		Глина легкая тугопластичная пылеватая	0,15	414
13	5	Песок пылеватый однородный	0,37	10
14		Песок пылеватый однородный	0,24	61
15		Песок пылеватый однородный средней плотности	0,21	171
16		Песок пылеватый однородный	0,19	208
17		Песок пылеватый однородный	0,19	354
18		Песок пылеватый однородный	0,18	360
19	2	Суглинок легкий тугопластичный пылеватый	0,31	5
20		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,2	41
21		Суглинок легкий тугопластичный пылеватый	0,18	113
22		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,15	116
23		Суглинок тяжелый тугопластичный пылеватый	0,15	303
24		Суглинок тугопластичный	0,14	521

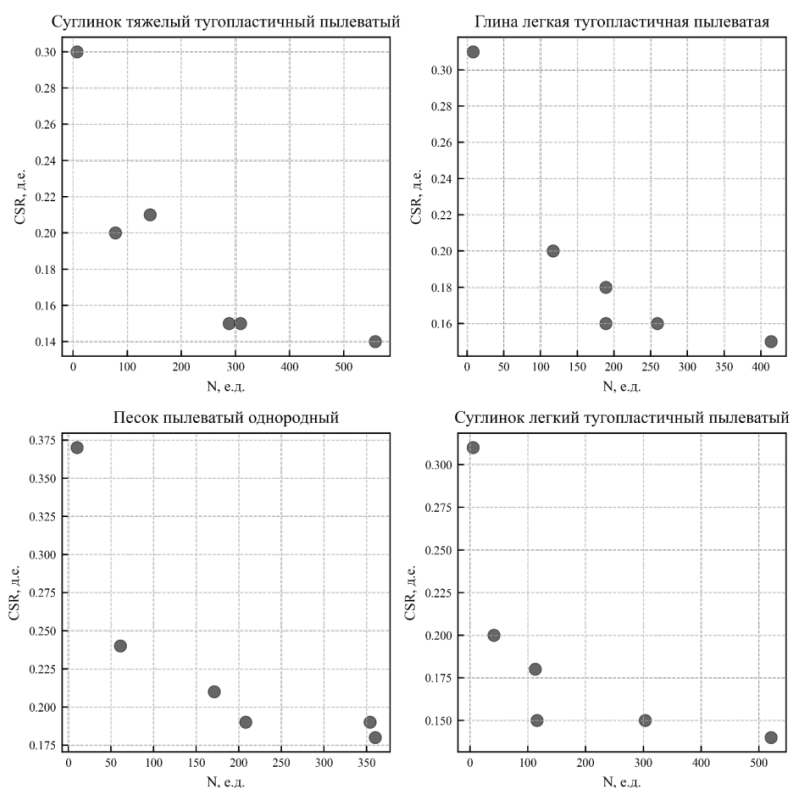


Рисунок 3 – Лабораторные данные испытания образцов  
Figure 3 – Laboratory data for testing samples

Для начальной подгонки параметров функции использовался метод дифференциальной эволюции, реализованный в функции `differential_evolution` из библиотеки `scipy.optimize`. Этот метод предназначен для решения задач минимизации нелинейных функций с непрерывными ограничениями [13], что значительно ускоряет процесс аппроксимации функции. Для аппроксимации функций был выбран метод Левенберга-Марквардта – гибридный метод, который сочетает градиентный спуск с методом Ньютона, обеспечивая быструю сходимость для малых нелинейных задач [14].

Результаты аппроксимации лабораторных данных представлены на Рисунке 4, результат построения функции ошибок представлен на Рисунке 5.

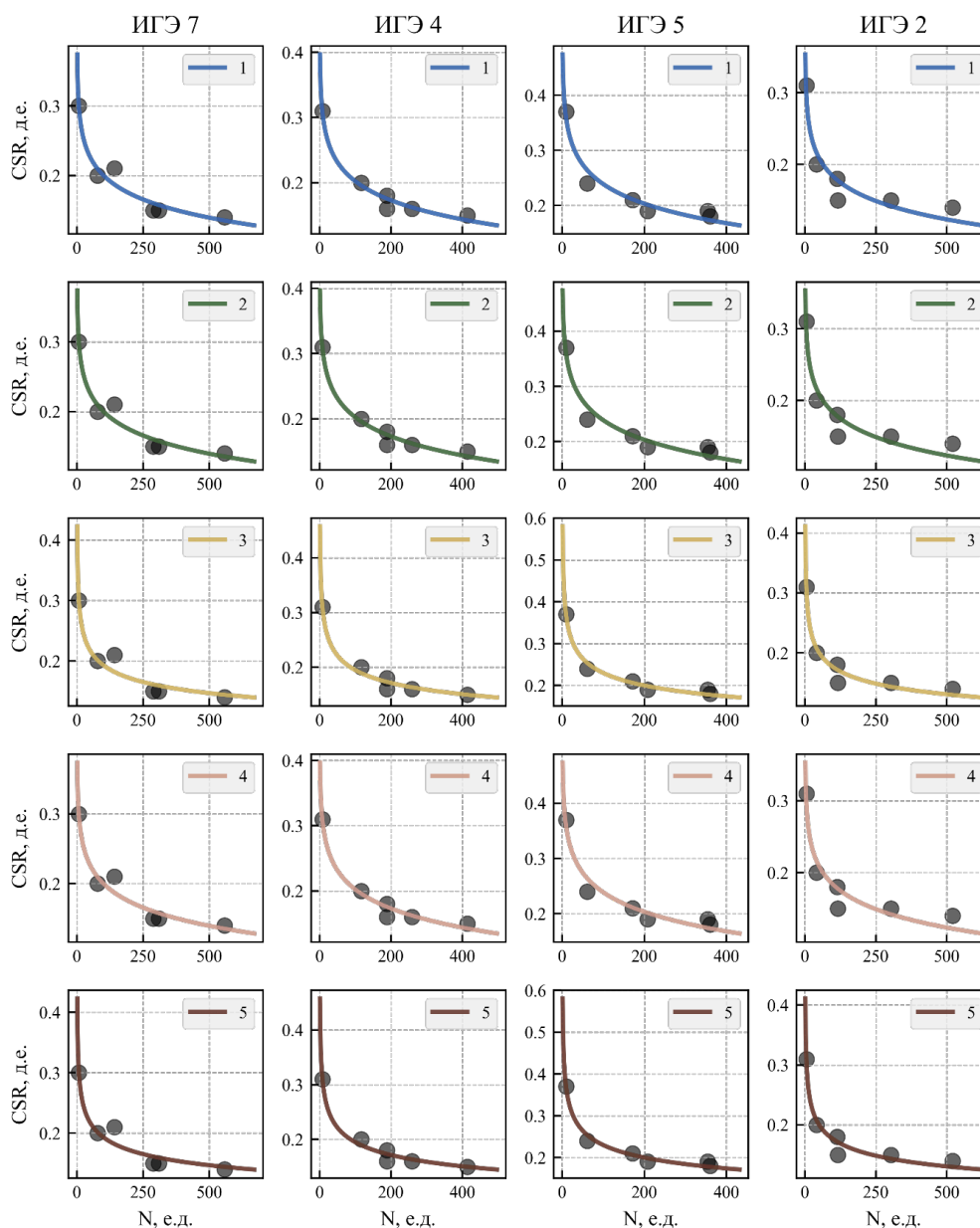


Рисунок 4 – Результаты аппроксимации лабораторных данных: 1 – экспоненциальная функция (4) [8], 2 – логарифмическая функция (6) [9], 3 – Пауэр-функция (степенная) (7) [10], 4 – логарифмическая функция (9) [11], 5 – гиперболическая функция (10), предложенная авторами исследования

Figure 4 – Laboratory data approximation results: 1 – exponential function (4) [8], 2 – logarithmic function (6) [9], 3 – Power function (7) [10], 4 – logarithmic function (9) [11], 5 – hyperbolic function (10), proposed by the authors of the study



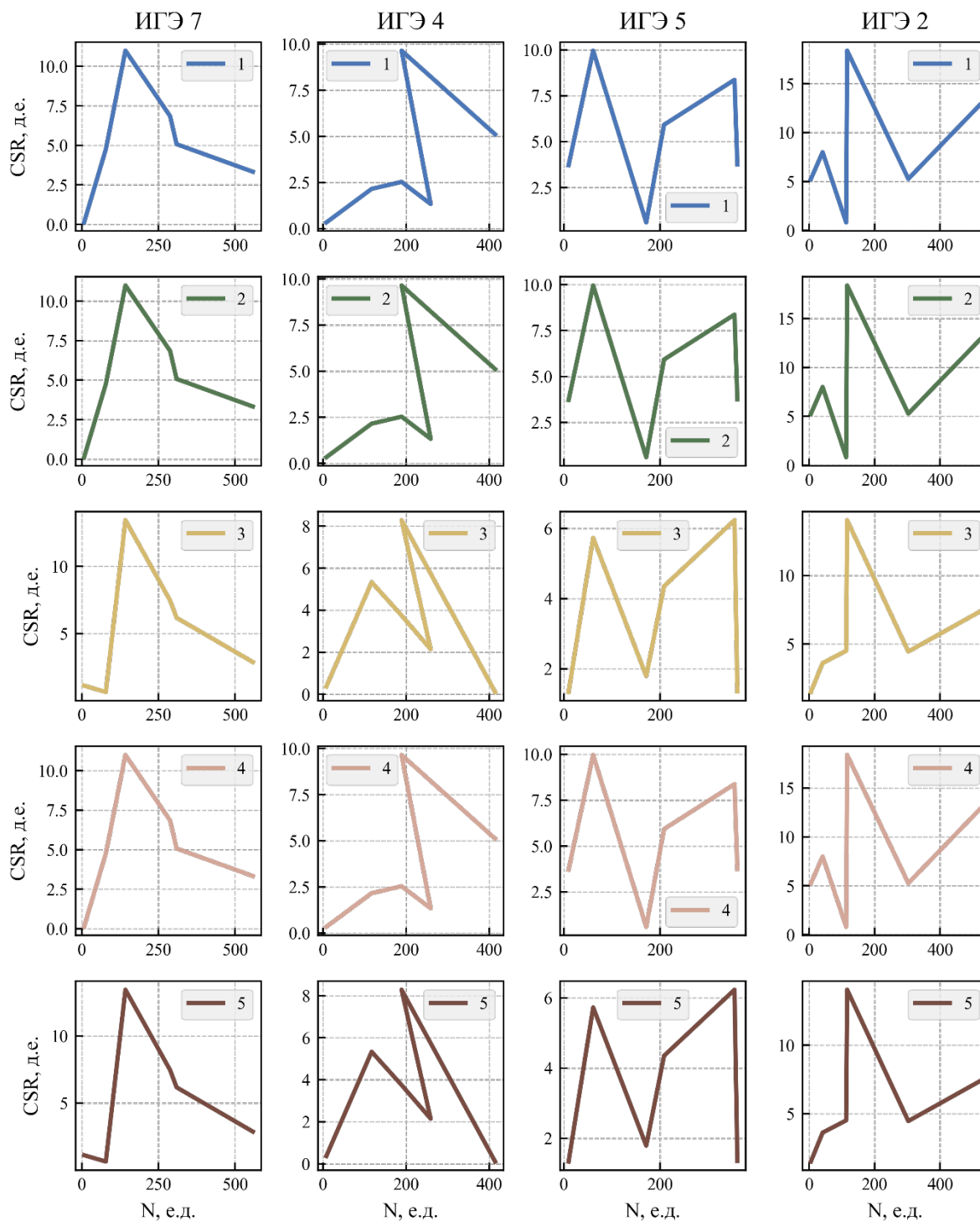


Рисунок 5 – Построение функции ошибок: 1 – экспоненциальная функция (4) [8],  
 2 – логарифмическая функция (6) [9], 3 – Пауэр-функция (степенная) (7) [10],  
 4 – логарифмическая функция (9) [11], 5 – гиперболическая функция (10), предложенная  
 авторами исследования

Figure 5 – Plotting an error function: 1 – exponential function (4) [8], 2 – logarithmic function (6) [9],  
 3 – Power function (7) [10], 4 – logarithmic function (9) [11], 5 – hyperbolic function (10), proposed  
 by the authors of the study

Для общей оценки качества аппроксимации используется метрика MSE (среднеквадратичная ошибка) (16) и метрика  $R^2$  (коэффициент детерминации) (17). Результаты оценки аппроксимации представлены в Таблицах 2, 3.

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (17)$$

Таблица 2 – Результаты оценки аппроксимации с помощью метрики MSE  
Table 2 – The results of the approximation evaluation with MSE metric

Функция аппроксимации	MSE * 10 <sup>3</sup> (16)				Среднее значение
	ИГЭ 7	ИГЭ 4	ИГЭ 5	ИГЭ 2	
Экспоненциальная функция (4) [8]	0,135	0,057	0,198	0,278	0,167
Логарифмическая функция (6) [9]	0,135	0,057	0,198	0,278	0,167
Пауэр-функция (степенная) (7) [10]	0,173	0,058	0,074	0,122	0,107
Логарифмическая функция (9) [11]	0,135	0,057	0,198	0,278	0,167
Гиперболическая функция (10) авторов исследования	0,173	0,058	0,074	0,122	0,107

Таблица 3 – Результаты оценки аппроксимации с помощью метрики  $R^2$   
Table 3 – The results of the approximation evaluation with  $R^2$  metric

Функция аппроксимации	$R^2$ (17)				Среднее значение
	ИГЭ 7	ИГЭ 4	ИГЭ 5	ИГЭ 2	
Экспоненциальная функция (4) [8]	0,956	0,981	0,954	0,918	0,952
Логарифмическая функция (6) [9]	0,956	0,981	0,954	0,918	0,952
Пауэр-функция (степенная) (7) [10]	0,943	0,981	0,983	0,964	0,968
Логарифмическая функция (9) [11]	0,956	0,981	0,954	0,918	0,952
Гиперболическая функция (10) авторов исследования	0,943	0,981	0,983	0,964	0,968

### Обсуждение и заключение

В исследовании представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных, полученных для различных типов грунтов, с использованием нескольких функций: экспоненциальной функции из работы [8], логарифмической функции из работы [9], степенной функции из работы [10], логарифмической функции из работы [11] и гиперболической функции, предложенной авторами исследования. В Таблицах 2 и 3 приведены результаты оценки аппроксимации с использованием двух метрик – MSE и коэффициента детерминации  $R^2$  для использованных функций и каждого ИГЭ

(инженерного геологического элемента). Анализ этой таблицы позволяет сделать несколько важных выводов.

Из Таблицы 2 видно, что все функции, представленные в данной работе, имеют схожие значения MSE, что свидетельствует о близкой точности их аппроксимации для ряда ИГЭ. Однако значения  $R^2$  из Таблицы 3 позволяют сделать вывод, что функции отличаются по способности описывать данные, причем экспоненциальная и гиперболическая функции показывают более высокую степень корреляции.

Одинаковые или близкие значения MSE для нескольких функций могут говорить о том, что в рассматриваемых диапазонах данных функции описывают сходные закономерности изменения CSR с увеличением циклов нагружения. Это подтверждает наличие общего тренда, характерного для данных типов грунтов. С практической точки зрения это полезно, поскольку выбор конкретной функции для моделирования может зависеть от таких факторов, как удобство использования, вычислительная эффективность и интерпретация параметров.

Важно отметить, что выбор функции для моделирования не ограничивается только ее точностью. Например, гиперболическая и степенная функции показывают способность достичь конечного предела при больших значениях  $N$ , что делает их более предпочтительными для долгосрочного прогнозирования. Это особенно важно для инженерной практики, где необходимо учитывать поведение грунтов при длительном циклическом нагружении.

Полученные результаты аппроксимации могут служить основой для разработки рекомендаций по проектированию и строительству на потенциально разжижаемых грунтах. Для каждой функции аппроксимации, показавшей одинаковую ошибку, есть возможность выбрать ту, которая лучше всего соответствует особенностям конкретного грунта и условиям нагружения, что в свою очередь помогает минимизировать риск разжижения при проектировании фундаментов и других подземных конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Gratchev I.B., Sassa K., Osipov V.I., Sokolov V.N. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading. *Engineering Geology*. 2006;86(1):70–84. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEO.2006.04.006>
2. Моргунов К.П., Колосов М.А. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений. *Наука и техника*. 2022;21(3):201–210. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210>  
Morgunov K.P., Kolosov M.A. Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures. *Science and Technique*. 2022;21(3):201–210. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210>
3. Chaloulos Y.K., Giannakou A., Drosos V., Tasiopoulou P., Chacko J., De Wit S. Liquefaction-induced settlements of residential buildings subjected to induced earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020;129. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105880>
4. Ter-Martirosyan A., Othman A. Simulation of soil liquefaction due to earthquake loading. In: *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019: Volume 97, 18–21 April 2019, Tashkent, Uzbekistan*. EDP Sciences; 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199703025>
5. Константинова Т.Г. Влияние разжижения грунтов на макросейсмические последствия сильных землетрясений. *Инженерные изыскания*. 2015;(13):28–33.

- Konstantinova T.G. The role of soil liquefaction in macroseismic consequences of strong earthquakes. *Engineering Survey*. 2015;(13):28–33. (In Russ.).
6. Yuan J., Wang Y., Zhan B., Yuan X., Wu X., Ma J. Comprehensive investigation and analysis of liquefaction damage caused by the Ms7.4 Maduo earthquake in 2021 on the Tibetan Plateau, China. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022;155. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107191>
  7. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Оценка сейсмостойкости слоистых грунтовых оснований, сложенных глинами и водонасыщенными песчаниками. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015;(1):99–106.  
Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Estimation of seismic stability of layered soil bases composed of clays and water-saturated sandstones. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015;(1):99–106. (In Russ.).
  8. Bilge H.T., Unutmaz B., Yunatci A.A., Yunatci I., Cetin K.O. Liquefaction Triggering Response Under Wave-Induced Cyclic Loading. In: *Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 7: Offshore Geotechnics; Petroleum Technology, 31 May – 5 June 2009, Honolulu, USA*. 2009. pp. 361–366. <https://doi.org/10.1115/OMAE2009-80123>
  9. Lentini V., Castelli F. Liquefaction Resistance of Sandy Soils from Undrained Cyclic Triaxial Tests. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019;37(1):201–216. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0603-y>
  10. Guoxing C., Qi W., Tian S., Kai Z., Enquan Z., Lingyu X. Cyclic Behaviors of Saturated Sand-Gravel Mixtures under Undrained Cyclic Triaxial Loading. *Journal of Earthquake Engineering*. 2018;25(4). <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1540370>
  11. Meziane El.H., Benessalah I., Arab A. An insight into the liquefaction resistance of sand using cyclic undrained triaxial tests: Effect of the relative density and the loading amplitude. *Acta Geotechnica Slovenica*. 2021;18(2).
  12. Тишин Н.Р., Озмидов О.Р., Пролетарский А.В. Система комплексного хранения данных геологических лабораторных испытаний. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.007>  
Tishin N.R., Ozmidov O.R., Proletarsky A.V. Integrated data storage system for geological laboratory experiments. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.007>
  13. Stokes Z., Mandal A., Wong W.K. Using Differential Evolution to Design Optimal Experiments. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2020;199. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.103955>
  14. Liyanapathirana D.S. Numerical Modelling of Dynamic Soil Liquefaction in Sloping Ground. In: *Australian Earthquake Engineering Conference*. 2007.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тишин Никита Романович**, аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.  
e-mail: [tnick1502@mail.ru](mailto:tnick1502@mail.ru)  
ORCID: [0009-0008-2484-591X](https://orcid.org/0009-0008-2484-591X)

**Nikita R. Tishin**, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation.  
e-mail: [tnick1502@mail.ru](mailto:tnick1502@mail.ru)

**Пролетарский Андрей Викторович**, доктор технических наук, декан факультета

**Andrey V. Proletarsky**, PhD in Technical Sciences, Dean of the Faculty of Informatics and

«Информатика и системы управления»,  
Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана, Москва,  
Российская Федерация.

*e-mail:* [pav@bmstu.ru](mailto:pav@bmstu.ru)

ORCID: [0000-0002-6932-0016](https://orcid.org/0000-0002-6932-0016)

Control Systems, Bauman Moscow State  
Technical University, Moscow, the Russian  
Federation.

*e-mail:* [pav@bmstu.ru](mailto:pav@bmstu.ru)

**Озмидов Олег Ростиславович**, кандидат  
геолого-минералогических наук, академик  
Российской академии естественных наук,  
научный руководитель геотехнической  
лаборатории, АО МОСТДОРГЕОТРЕСТ,  
Москва, Российская Федерация.

*e-mail:* [ozmidov@mail.ru](mailto:ozmidov@mail.ru)

**Oleg R. Ozmidov**, PhD in Geological and  
Mineralogical Sciences, Academician of the  
Russian Academy of Natural Sciences, Scientific  
Director of the Geotechnical Laboratory, JSC  
MOSTDORGEOTREST, Moscow, the Russian  
Federation.

*e-mail:* [ozmidov@mail.ru](mailto:ozmidov@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 05.15.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024;  
принята к публикации 10.01.2025.*

*The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 23.12.2024;  
accepted for publication 10.01.2025.*