

Научная статья / Original article

УДК 624.13:519.2

DOI: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2026-1-66-76>

EDN: <https://elibrary.ru/lirukz>

2.1.8 Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов
и транспортных тоннелей (технические науки)

2.1.2 Основания и фундаменты,
подземные сооружения (технические науки)



Влияние законов распределения на коэффициент устойчивости при использовании метода Монте-Карло

Д. И. Кацко ✉, Е. В. Кузнецов

Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина

Краснодар, ул. Калинина, 13, 350044, Российская Федерация

✉ katsko99@mail.ru



Аннотация. Цель исследования – сравнение подходов к количественной вероятностной оценке устойчивости однородного склона методом Монте-Карло с использованием стандартного инженерного программного обеспечения и расширенного статистического анализа, а также оценка влияния выбора закона распределения на итоговый расчет вероятности обрушения.

Методы. В качестве базового инструмента использован программный комплекс GeoStudio для детерминированного и вероятностного расчета коэффициента устойчивости FS четырьмя методами (Феллениуса, Бишопа, Ямбу, Моргенштерна – Прайса). Для углубленного анализа реализовано моделирование по методу Моргенштерна – Прайса с помощью надстройки @RISK в MS Excel. Статистическая обработка результатов и идентификация законов распределения выполнены с использованием языка программирования R (пакет `fitdistrplus`), в том числе с применением графика асимметрии – эксцесса Каллена – Фрея. **Результаты.** Статистический анализ эмпирического распределения коэффициента устойчивости выявил его положительную асимметрию и близость к распределениям экспоненциального типа (Вейбулла, гамма и т. д.). Аппроксимация данных распределением Вейбулла приводит к значению вероятности обрушения, в 33.8 раза превышающему оценку, полученную в предположении о нормальном распределении FS .

Выводы. Стандартные инженерные программы обладают ограниченным набором функций для адекватного вероятностного анализа. Без дополнительной статистической валидации их использование может привести к грубой недооценке риска из-за необоснованного предположения о нормальном законе распределения коэффициента устойчивости. Для корректной оценки вероятности обрушения необходим этап идентификации эмпирического распределения коэффициента устойчивости с использованием специализированного статистического инструментария. При моделировании устойчивости склонов рекомендовано рассматривать асимметричные распределения (Вейбулла, логнормальное).

Ключевые слова: коэффициент устойчивости, вероятность обрушения склона, метод Монте-Карло, закон распределения, программный комплекс GeoStudio

Для цитирования: Кацко Д. И., Кузнецов Е. В. Влияние законов распределения на коэффициент устойчивости при использовании метода Монте-Карло. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2026;6(1):66–76. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2026-1-66-76> EDN: LIRUKZ

Impact of distribution laws on the stability factor with the application of Monte Carlo method

Dmitriy I. Katsko ✉, Evgeniy V. Kuznetsov
Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin
Krasnodar, 13 Kalinina St., 350044, Russian Federation

✉ katsko99@mail.ru



Abstract. The purpose of this study is to compare approaches to the quantitative probabilistic assessment of homogeneous slope stability using Monte Carlo method, employing standard engineering software and advanced statistical analysis. Additionally, it aims to assess the impact of the chosen distribution laws on the final calculation of the probability of collapse.

Methods. The GeoStudio software package served as a primary tool for deterministic and probabilistic calculation of the stability factor FS using four methods: Fellenius, Bishop, Janbu, and Morgenstern – Price. For in-depth analysis, the Morgenstern – Price method was implemented using the @RISK add-in for MS Excel. Statistical processing of the results and identification of distribution laws were performed using the R Package (fitdistrplus package), and using the Cullen – Frey skewness – kurtosis plot.

Results. Statistical analysis of the empirical stability coefficient distribution revealed its positive skewness and proximity to exponential-type distributions (e. g., Weibull, gamma). Approximating the data with the Weibull distribution results in a collapse probability value 33.8 times higher than the estimate obtained assuming a normal distribution FS .

Conclusions. Standard engineering software offers a limited range of functions for adequate probabilistic analysis. Without additional statistical validation, their use can lead to a gross underestimation of the risk due to an unsubstantiated assumption of a normal distribution law for the stability factor. For an accurate assessment of collapse probability, it is essential to identify the empirical distribution of the stability factor using specialized statistical tools. When modeling slope stability, it is recommended to consider skewness distributions, such as the Weibull or lognormal distributions.

Keywords: stability factor, slope collapse probability, Monte Carlo method, distribution law, GeoStudio software package

For citation: Katsko D. I., Kuznetsov E. V. Impact of distribution laws on the stability factor with the application of Monte Carlo method. *Architecture, Construction, Transport*. 2026;6(1):66–76. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2026-1-66-76>



1. Введение / Introduction

Количественную оценку вероятности оползня можно определять исходя из частоты события, вызывающего активизацию грунтовых масс [1, 2]. Это могут быть, например, осадки большой интенсивности с превышением определенного порога, повышение уровня грунтовых вод или сейсмическая активность.

Также количественную оценку вероятности оползня можно определять исходя из статистического распределения прочностных свойств грунтов [3–5]. Неопределенность, вызванная неоднородностью, это фундаментальное свойство геологической среды, обусловленное чередованием слоев с разной геометрией и прочностными свойствами, которые меняются в пространстве и во времени. Эта неоднородность влияет на инженерные расчеты, надежность строительства, оценку рисков при анализе устойчивости склонов и проектировании фундаментов [6].

Для моделирования внутренней изменчивости прочностных параметров грунта используется метод Монте-Карло, который иногда называют методом статистических испытаний [7]. Суть метода заключается в том, что детерминированное состояние системы заменяется стохастическим, где часть входных переменных детерминированы, а часть – случайны. Многократное повторение входных переменных позволяет как решать численные задачи, так и оценивать вид закона распределения выходных переменных и его параметры.

Целью исследования являлся сравнительный анализ подходов к количественной вероятностной оценке устойчивости однородного склона методом Монте-Карло с использованием стандартного инженерного программного обеспечения (GeoStudio) и расширенного статистического инструментария (@RISK, R), а также количественная оценка влияния выбора закона распределения коэффициента устойчивости FS на итоговую вероятность обрушения.

Актуальность исследования. Широкое распространение метода Монте-Карло в геотехнической практике для оценки надежности склонов требует обоснованного выбора законов распределения входных и выходных параметров, однако стандартное ПО (GeoStudio, PLAXIS и др.) предлагает ограниченный набор законов, а нормальное распределение принимается по умолчанию, без должной проверки.

Новизна работы. Выявлено несоответствие эмпирического распределения коэффициента устойчивости FS нормальному закону. Статистически доказано, что распределение коэффициента устойчивости, полученное методом Монте-Карло для однородного склона, имеет значительную асимметрию и относится к семейству экспоненциальных распределений. Количественно оценена погрешность при неверном выборе закона.

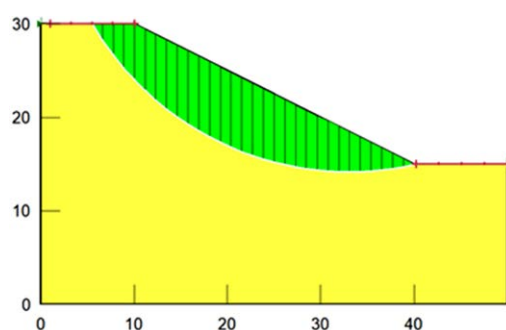
2. Материалы и методы / Materials and methods

Рассмотрим возможности широко используемого программного комплекса GeoStudio, который имеет подтвержденную репутацию и более 40 лет используется в проектах по всему миру. Этот программный комплекс предназначен для расчетов устойчивости склона методом предельных равновесий, также в нем есть средства для расчета вероятности обрушения с использованием метода Монте-Карло [8, 9]. Для детерминированного расчета устойчивости однородного склона с уклоном 1:2, высотой 15 м использовались расчетные значения физико-механических свойств грунта по I группе предельных состояний (то есть с обеспеченностью 0.95): сцепление $c = 15.7$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 17.9^\circ$, удельный вес грунта $\gamma = 20.1$ кН/м³ (таблица 1). Заданные свойства грунта рассматриваемой тестовой задачи приняты как для оползневого тела на участке трассовой автомобильной дороги газопровода «Россия – Турция», км 297.5 – км 301, которые были определены в рамках инженерно-геологических изысканий.

Учитывая, что данные могут считаться однородными, если коэффициент вариации не превышает 30 % ($V < 0.3$), зададим разброс для значений сцепления c и угла внутреннего трения φ в 10 % (таблица 1), то есть среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0.1$ от среднеарифметических значений c и φ . В связи с принимаемой в статье однородностью выборки ($V < 0.3$), а также руководствуясь распространенной практикой обработки результатов инженерно-геологических изысканий, в качестве модели распределения параметров прочности грунта принимаем нормальный закон. Выполним расчет устойчивости четырьмя методами: Феллениуса [10], Бишопа [11], Ямбу [12] и Моргенштерна – Прайса [13] (рис. 1, таблица 2). Число итераций в методе Монте-Карло $N = 1\,000$, выбрано по результатам анализа стабилизации среднего до 0.01.

Таблица 1. Входные параметры однородного откоса для расчета методом Монте-Карло в GeoStudio
Table 1. Input parameters of a homogeneous slope for Monte Carlo method in GeoStudio

	Среднее значение	Стандартное отклонение	Наименьшее значение	Наибольшее значение
Сцепление c , кПа	15.7	1.57	7.85	23.55
Угол внутреннего трения φ , град	17.9	1.79	8.95	26.85



Метод	FS
Феллениуса	1.218
Бишопа	1.289
Янбу	1.197
Моргенштерна – Прайса	1.287

Рис. 1 Сечение однородного откоса с уклоном 1:2 (рисунок авторов)

Fig. 1. Profile of a homogeneous slope with a 1:2 gradient (authors' figure)

Таблица 2. Результаты расчета устойчивости склона

Table 2. Results of slope stability calculations

Метод расчета	Феллениуса	Бишопа	Янбу	Моргенштерна – Прайса
<i>Детерминированный метод</i>				
Коэффициент устойчивости	1.218	1.289	1.197	1.287
<i>Вероятностный метод</i>				
Средняя величина коэффициента устойчивости	1.219	1.291	1.197	1.289
Стандартное отклонение	0.097	0.104	0.096	0.104
Наименьшая величина коэффициента устойчивости	0.763	0.799	0.796	0.798
Наибольшая величина коэффициента устойчивости	1.563	1.664	1.556	1.661
Индекс надежности	2.254	2.786	2.053	2.773
Вероятность обрушения, %	0.012	0.055	0.016	0.055

Итак, была получена вероятность обрушения склона. Выходные данные, полученные при использовании метода Монте-Карло, не различаются достаточно сильно. Коэффициент устойчивости – FS от 1.197 до 1.289 – позволяет утверждать, что склон устойчив. С приемлемой вероятностью ошибки первого рода от 0.012 до 0.055. В программном комплексе GeoStudio также есть возможность визуального отобразить эмпирический закон распределения коэффициента устойчивости (рис. 2).

Следует отметить, что при использовании экстремальных законов распределения характеристик прочности грунта: c – Вейбулла, φ – Релея (круговое нормальное распределение, являющееся частным случаем распределения Вейбулла), – были получены выводы, которые практически не расходятся с результатами, когда на входе рассматривались нормальные законы распределения.

Однако в программном комплексе GeoStudio имеются следующие недостатки:

- на входе имеется возможность задавать только 5 законов распределения (нормальное, лог-нормальное, равномерное, обобщенное нормальное, треугольное);
- нет возможности управлять доверительным интервалом коэффициента устойчивости;
- отсутствует возможность изучения эмпирического закона распределения.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Был воспроизведен расчет коэффициента устойчивости по методу Моргенштерна – Прайса в MS Excel, где метод Монте-Карло был реализован с помощью надстройки @RISK. Для оценки влияния закона распределения на коэффициент устойчивости использовался язык программирования R, пакет fitdistrplus (рис. 3, 4) [14].

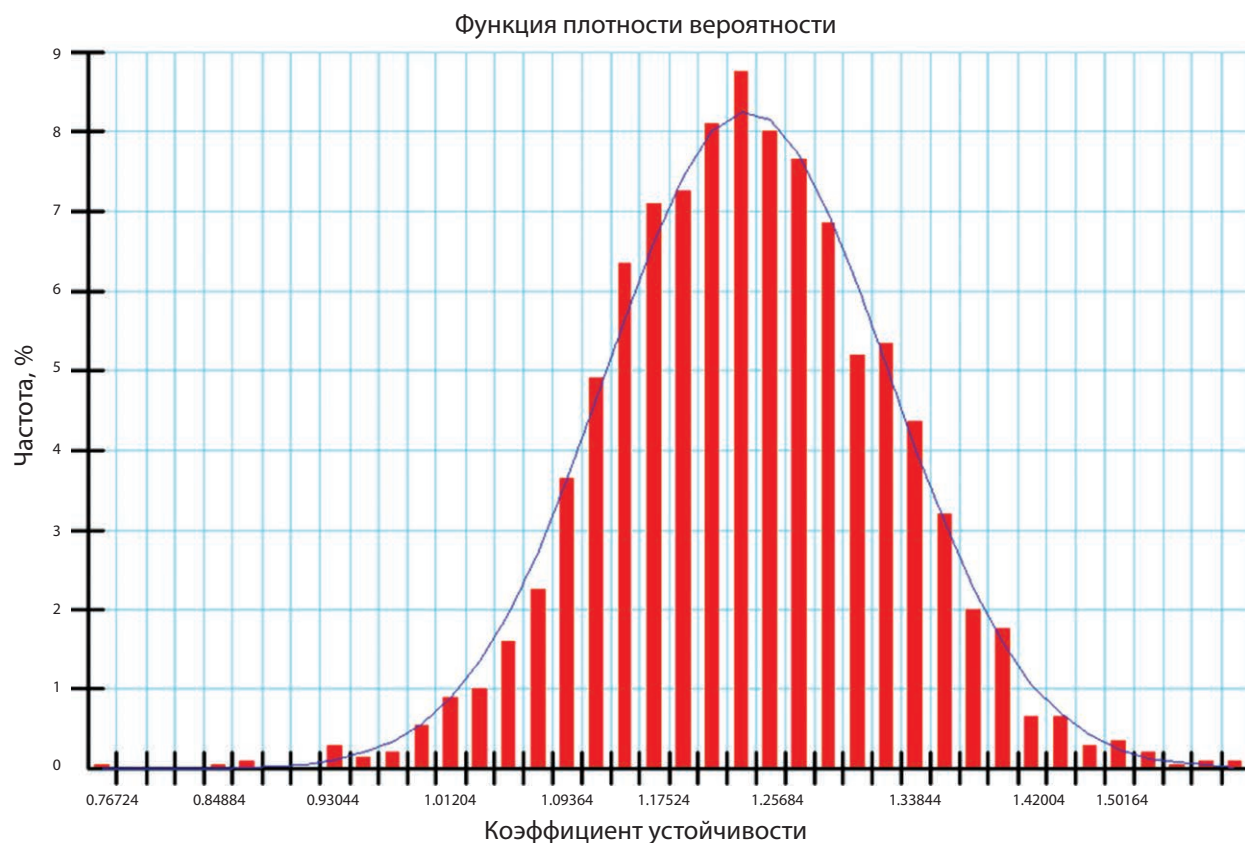


Рис. 2. Эмпирический закон распределения коэффициента устойчивости (рисунок авторов)
Fig. 2. Empirical distribution law of the stability factor (authors' figure)

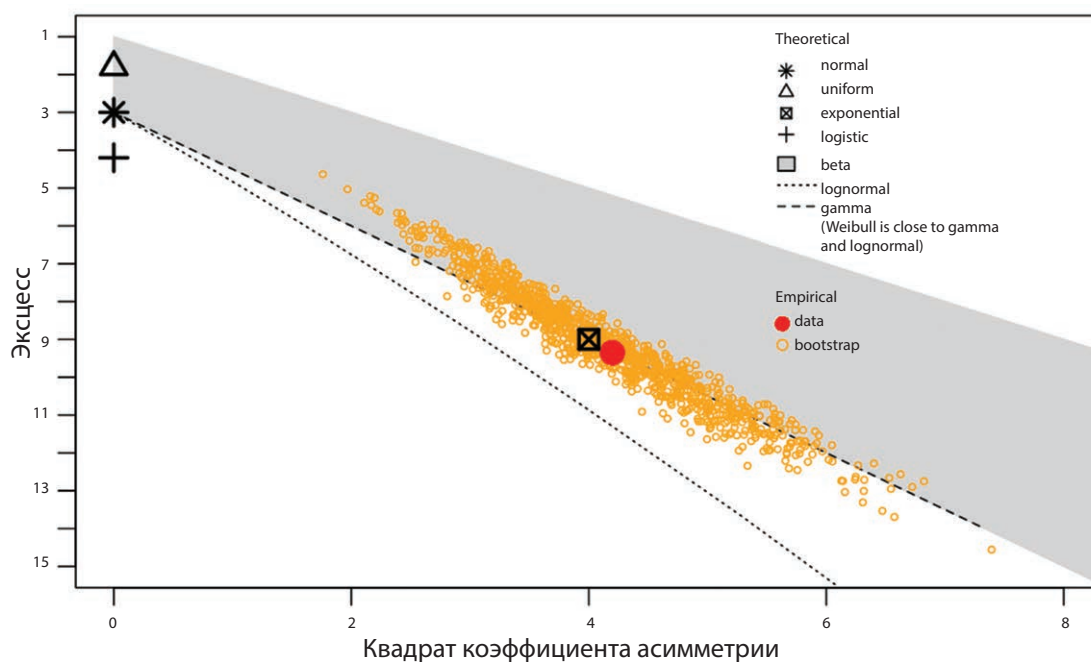


Рис. 3. График асимметрии – эксцесса Каллена – Фрея (рисунок авторов)
Fig. 3. Cullen – Frey skewness – kurtosis plot (authors' figure)

Для анализа эмпирического набора значений коэффициента устойчивости FS с использованием бутстреп-метода вычисляются коэффициенты асимметрии и эксцесса и затем наносятся на график Каллена – Фрея, где по оси абсцисс откладывают коэффициент эксцесса, а по оси ординат квадрат коэффициента асимметрии (рис. 3). Например, если точка, соответствующая выборке, лежит близко к центру графика, то отклонения невелики и распределение близко к нормальному. Такой анализ помогает в обосновании методов статистической обработки данных и выборе подходящих моделей вероятностных распределений. Таким образом, график Каллена – Фрея – это удобное средство для описания и сопоставления свойств различных законов распределения по двум числовым характеристикам: асимметрии и эксцессу (рис. 3). В нашем случае – данные в области, соответствующей распределениям: бета, логнормальному, гамма и Вейбулла.

Как правило, все методы вероятностной оценки оползня опираются на нормальный закон распределения. В работах авторов [8, 9] с использованием имитационного моделирования методом Монте-Карло получено, что коэффициент устойчивости может подчиняться семейству законов распределения, один из наиболее статистически значимых – распределение Вейбулла. Сравним два типа аппроксимаций эмпирического распределения коэффициента устойчивости: распределения Вейбулла и нормального закона. Эмпирическое распределение принимает положительные значения. Коэффициент асимметрии (2.04) (с эксцессом 9.29) объясняет наличие положительной асимметрии, что свидетельствует о смещенности распределения влево и формировании длинных хвостов. Это приводит к существенному увеличению оценки вероятности разрушения склонов относительно результатов, полученных исходя из предположения о нормальном законе распределения (рис. 4, таблицы 3, 4).

Итак, если сравнивать вероятность обрушения склона в случаях, когда коэффициент устойчивости описывается законом распределения Вейбулла, где вероятность обрушения равна $P \approx 0.0541$, и нормальным законом, где $P \approx 0.0016$, то вероятность появления неустойчивого состояния в 33.8 раза выше, когда используется распределение Вейбулла. Это наглядно иллюстрирует, насколько сильно

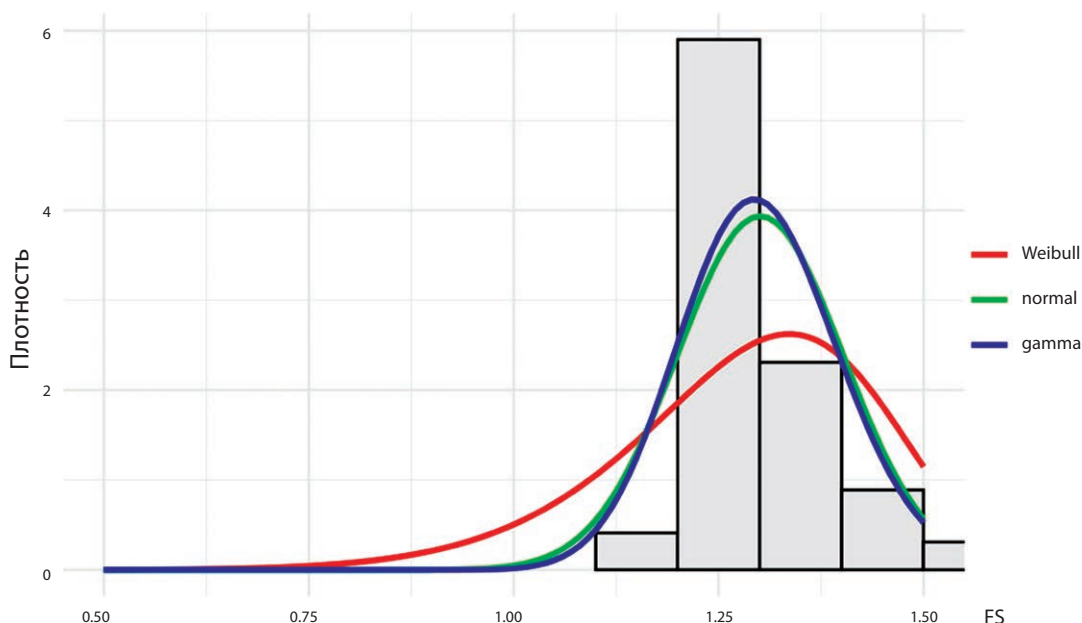


Рис. 4. Функция плотности вероятности коэффициента устойчивости FS (рисунок авторов)
Fig. 4. Probability density function of the stability factor FS (authors' figure)

Таблица 3. Вероятность оползня на основе аппроксимации исходных данных законом распределения Вейбулла
Table 3. Landslide probability based on initial data approximation using the Weibull distribution

$P(FS < FS_0)$	0.0541	0.0542	0.0543
FS_0	0.99994	1.00014	1.00034

Таблица 4. Вероятность оползня на основе аппроксимации исходных данных нормальным законом распределения
Table 4. Landslide probability based on initial data approximation using a normal distribution

$P(FS < FS_0)$	0.0015	0.0016	0.0017
FS_0	0.99988	1.00189	1.00380

влияет выбор закона распределения на итоговую количественную оценку вероятности оползня, которая является основой для обоснования инвестиций в инженерную защиту.

Представленная модель является базовой. В реальности неопределенность вносит не только изменчивость прочностных характеристик c , φ , но и геометрия напластований, положение уровня грунтовых вод, пространственная корреляция свойств и т. д. [15–19]. Будущие исследования должны быть направлены на интеграцию более сложных стохастических моделей (например, случайных полей) и изучение того, как эти факторы влияют на вид итогового эмпирического распределения FS . Кроме того, актуальной задачей является разработка и внедрение удобных инструментов статистического анализа, встроенных непосредственно в геотехническое ПО, чтобы сделать передовые методы вероятностной оценки доступными для широкого круга инженеров [20–25].

Распределение Вейбулла, часто применяемое для моделирования прочности материалов и времени до отказа, лучше учитывает возможность появления более низких значений прочности [26, 27]. Нормальное распределение, являющееся симметричным и допускающее отрицательные значения, которые физически невозможны для прочностных характеристик, не учитывает этот риск в хвостах распределения. Следовательно, предположение о нормальности может создавать иллюзию безопасности. При этом, как правило, для вероятностной оценки устойчивости используются наиболее распространенные законы распределения, а именно нормальный закон, что в общем случае необоснованно.

4. Заключение / Conclusions

Встроенные возможности инженерных комплексов, таких как GeoStudio, для вероятностного моделирования имеют существенные ограничения: узкий набор законов распределения входных параметров и отсутствие инструментов для анализа эмпирического распределения выходного параметра (коэффициента устойчивости). Это приводит к необоснованному упрощению модели и выбору неадекватного закона распределения.

Сравнение двух типов аппроксимаций эмпирического распределения коэффициента устойчивости, полученного методом Монте-Карло (моделирование 1 000 итераций), показало:

- при аппроксимации распределением Вейбулла вероятность обрушения составила $P \approx 0.0541$ (5.41 %);
- при аппроксимации нормальным законом вероятность обрушения составила $P \approx 0.0016$ (0.16 %);
- таким образом, использование распределения Вейбулла дает вероятность обрушения в 33.8 раза выше, чем при использовании нормального закона. Это наглядно демонстрирует, что необоснованное принятие нормального распределения может приводить к грубой недооценке реального риска и создавать иллюзию безопасности.

Статистический анализ эмпирического распределения коэффициента устойчивости выявил его ключевые характеристики:

- коэффициент асимметрии составил 2.04;
- коэффициент эксцесса составил 9.29;
- на графике асимметрии – эксцесса Каллена – Фрея данные расположились в области, соответствующей экспоненциальным распределениям (бета, логнормальному, гамма, Вейбулла), что подтверждает наличие положительной асимметрии и формирование «тяжелого» правого хвоста распределения.

Проведенное исследование демонстрирует критическую важность корректного выбора закона распределения для вероятностной оценки устойчивости склонов методом Монте-Карло. В программном комплексе GeoStudio имеющиеся законы распределения имеют скорее научный или тестовый характер, их недостаточно для практического применения. Эта критика справедлива для широкого круга специализированных геотехнических программ. Часто они предлагают вероятностные модули как дополнение, фокусируясь на детерминированных расчетах. Это создает разрыв между современными требованиями к оценке рисков и инструментарием. Результаты работы показывают, что использование таких встроенных модулей без последующей глубокой статистической валидации выходных данных может привести к систематической ошибке в сторону занижения оценки риска.



Вклад авторов. Кацко Д. И.: разработка концепции и методологии исследования, проведение численных экспериментов в программных комплексах GeoStudio и @RISK, статистическая обработка данных в среде R, анализ и интерпретация результатов, подготовка исходного текста статьи, формулировка выводов, визуализация данных (подготовка рисунков и таблиц). Кузнецов Е. В.: научное руководство, постановка общей проблемы и цели исследования, верификация методологии, критический анализ содержания, редактирование текста, итоговое утверждение версии для публикации.

Author contributions. Dmitry I. Katsko: developed the research concept and methodology, conducted numerical experiments using GeoStudio and @RISK software packages, performed statistical data processing in the R Package, analyzed and interpreted results, drafted the manuscript, formulated conclusions, and prepared figures and tables for visualization. Evgeniy V. Kuznetsov: provided scientific supervision, defined the overall research problem and objectives, verified the methodology, critically analyzed the content, edited the text, and approved the final version for publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*. 2008;102(3–4):85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
2. Xin Liu, Wang Yu. Analytical solutions for annual probability of slope failure induced by rainfall at a specific slope using bivariate distribution of rainfall intensity and duration. *Engineering Geology*. 2023;313:106969. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106969> (Corrigendum. *Engineering Geology*. 2023;317:107092. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107092>)
3. Hicks M. A., Spencer W. A. Influence of heterogeneity on the reliability and failure of a long 3D slope. *Computers and Geotechnics*. 2010;37(7–8):948–955. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.08.001>
4. Shui-Hua Jiang, Dian-Qing Li, Li-Min Zhang, Chuang-Bing Zhou. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method. *Engineering Geology*. 2014;168:120–128. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795213003244>

5. Zhang J., Xiao T., Ji J., Zeng P., Cao Z. *Geotechnical reliability analysis: Theories, methods and Algorithms*. Springer; 2023. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6254-7>
6. Dian-Qing Li, Te Xiao, Zi-Jun Cao, Chuang-Bing Zhou, Li-Min Zhang. Enhancement of random finite element method in reliability analysis and risk assessment of soil slopes using subset simulation. *Landslides*. 2016;13(2):293–303. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-015-0569-2>
7. Liwei Han, Ming Chen, Zuozhuang Sun, Jiaxuan Si, Liyuan Ma, Wenhui Ji, Hongyang Zhang. Stability analysis of slopes based on cloud model-Monte Carlo coupling. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1196677. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1196677>
8. Кацко Д. И., Кузнецов Е. В. Имитационное моделирование в расчетах устойчивости оползневых грунтов. *Мелиорация*. 2024;(2):5–12. <https://melio.belar.by/jour/article/view/1117>
9. Маций С. И., Кацко Д. И. Вероятностные расчеты устойчивости оползневого склона. *ГеоРиск*. 2021;15(3):8–22. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-8-22>
10. Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams. In: *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*. Washington DC; 1936. P. 445–462. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3385144>
11. Bishop A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*. 1955;5(1):7–17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7> URL: <https://bouassidageotechnics.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/03/the-use-of-the-slip-circle-in-the-stability-analysis-of-slopes-1.pdf>
12. Janbu N. Slope stability computations. In: *Embankment-Dam Engineering: Casagrande Volume*. New York : John Wiley & Sons, Inc.; 1973. P. 47–86. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3597866>
13. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*. 1965;15(1):79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
14. Delignette-Muller M. L., Dutang Ch. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*. 2015;64(4):1–34. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>
15. Xin Liu, Yu Wang. Reliability analysis of an existing slope at a specific site considering rainfall triggering mechanism and its past performance records. *Engineering Geology*. 2021;288:106144. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106144>
16. Mohamed Rashwan, Lamees Mohamed, Ahmed Hassan, Mohamed A.S. Youssef, Mohamed Elsadek M. Sabra, Adel Kamel Mohamed. Landslide susceptibility assessment along the Red Sea Coast in Egypt, based on multi-criteria spatial analysis and GIS techniques. *Scientific African*. 2024;23:e02116. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02116>
17. Lloret-Cabot M., Fenton G. A., Hicks M. A. On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2014;8(2):129–140. <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.871189>
18. Sung Eun Cho. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes. *Engineering Geology*. 2013;154:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.014>
19. Jaiswal A., Verma A. K., Singh T. N. A novel proposed classification system for rock slope stability assessment. *Scientific Reports*. 2024;14:10992. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58772-7>
20. Khaled Farah, Mounir Ltifi, Hedi Hassis. Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method. *Procedia Engineering*. 2011;10:1402–1407. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.233>
21. Khalid M. I., Fei J., Lee D., Park D., Chen X. Probabilistic assessment of seismic performance of slopes considering the sensitivity of sliding surface to input motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024;182:108472. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108472>
22. Zhan W., Baise, L. G., Moaveni B. An uncertainty quantification framework for logistic regression based geospatial natural hazard modeling. *Engineering Geology*. 2023;324:107271. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107271>
23. Lizarraga H. S., Lai C. G. Effects of spatial variability of soil properties on the seismic response of an embankment dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014;64:113–128. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.03.016>
24. Jing-Sen Cai, E-Chuan Yan, Tian-Chyi Jim Yeh, Yuan-Yuan Zha, Yue Liang, Shao-Yang Huang, et al. Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach. *Computers and Geotechnics*. 2017;81:77–86. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.07.012>
25. Fiorese G. D., Balacco G., Bruno G., Nikolaidis N. Hydrogeological modelling of a coastal karst aquifer using an integrated SWAT-MODFLOW approach. *Environmental Modelling & Software*. 2025;183:106249. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106249>

26. Achu A. L., Aju C. D., Di Napoli M., Prakash P., Gopinath G., Shaji E., Chandra V. Machine-learning based landslide susceptibility modelling with emphasis on uncertainty analysis. *Geoscience Frontiers*. 2023;14(6):101657. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101657>
27. Petala E., Klimis N. Fragility of highway embankments exposed to permanent deformations due to underlying fault rupture. *Geosciences*. 2024;14(11):312. <https://doi.org/10.3390/geosciences14110312> URL: https://www.researchgate.net/publication/385877368_Fragility_of_Highway_Embankments_Exposed_to_Permanent_Deformations_Due_to_Underlying_Fault_Rupture

Reference

1. Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*. 2008;102(3–4):85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
2. Xin Liu, Wang Yu. Analytical solutions for annual probability of slope failure induced by rainfall at a specific slope using bivariate distribution of rainfall intensity and duration. *Engineering Geology*. 2023;313:106969. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106969> (Corrigendum. *Engineering Geology*. 2023;317:107092. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107092>)
3. Hicks M. A., Spencer W. A. Influence of heterogeneity on the reliability and failure of a long 3D slope. *Computers and Geotechnics*. 2010;37(7–8):948–955. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.08.001>
4. Shui-Hua Jiang, Dian-Qing Li, Li-Min Zhang, Chuang-Bing Zhou. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method. *Engineering Geology*. 2014;168:120–128. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795213003244>
5. Zhang J., Xiao T., Ji J., Zeng P., Cao Z. *Geotechnical reliability analysis: Theories, methods and Algorithms*. Springer; 2023. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6254-7>
6. Dian-Qing Li, Te Xiao, Zi-Jun Cao, Chuang-Bing Zhou, Li-Min Zhang. Enhancement of random finite element method in reliability analysis and risk assessment of soil slopes using subset simulation. *Landslides*. 2016;13(2):293–303. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-015-0569-2>
7. Liwei Han, Ming Chen, Zuo Zhuang Sun, Jiaxuan Si, Liyuan Ma, Wenhui Ji, Hongyang Zhang. Stability analysis of slopes based on cloud model-Monte Carlo coupling. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1196677. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1196677>
8. Katsko D.I., Kuznetsov E.V. Simulation modeling in calculations of the stability of landslide soils. *Land Reclamation*. 2024;(2):5–12. (In Russ.) <https://melio.belal.by/jour/article/view/1117>
9. Matsiy S. I., Katsko D. I. Probabilistic calculations of landslide slope stability. *GeoRisk World*. 2021;15(3):8–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-8-22>
10. Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams. In: *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*. Washington DC; 1936. P. 445–462. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3385144>
11. Bishop A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*. 1955;5(1):7–17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7> URL: <https://bouassidageotechnics.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/03/the-use-of-the-slip-circle-in-the-stability-analysis-of-slopes-1.pdf>
12. Janbu N. Slope stability computations. In: *Embankment-Dam Engineering: Casagrande Volume*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1973. P. 47–86. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3597866>
13. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*. 1965;15(1):79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
14. Delignette-Muller M. L., Dutang Ch. (2015). fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*. 2015;64(4):1–34. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>
15. Xin Liu, Yu Wang. Reliability analysis of an existing slope at a specific site considering rainfall triggering mechanism and its past performance records. *Engineering Geology*. 2021;288:106144. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106144>
16. Mohamed Rashwan, Lamees Mohamed, Ahmed Hassan, Mohamed A.S. Youssef, Mohamed Elsadek M. Sabra, Adel Kamel Mohamed. Landslide susceptibility assessment along the Red Sea Coast in Egypt, based on multi-criteria spatial analysis and GIS techniques. *Scientific African*. 2024;23:e02116. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02116>
17. Lloret-Cabot M., Fenton G. A., Hicks M. A. On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2014;8(2):129–140. <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.871189>

18. Sung Eun Cho. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes. *Engineering Geology*. 2013;154:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.014>
19. Jaiswal A., Verma A. K., Singh T. N. A novel proposed classification system for rock slope stability assessment. *Scientific Reports*. 2024;14:10992. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58772-7>
20. Khaled Farah, Mounir Ltifi, Hedi Hassis. Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method. *Procedia Engineering*. 2011;10:1402–1407. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.233>
21. Khalid M. I., Fei J., Lee D., Park D., Chen X. Probabilistic assessment of seismic performance of slopes considering the sensitivity of sliding surface to input motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024;182:108472. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108737>
22. Zhan W., Baise, L. G., Moaveni B. An uncertainty quantification framework for logistic regression based geospatial natural hazard modeling. *Engineering Geology*. 2023;324:107271. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107271>
23. Lizarraga H. S., Lai C. G. Effects of spatial variability of soil properties on the seismic response of an embankment dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014;64:113–128. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.03.016>
24. Jing-Sen Cai, E-Chuan Yan, Tian-Chyi Jim Yeh, Yuan-Yuan Zha, Yue Liang, Shao-Yang Huang, et al. Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach. *Computers and Geotechnics*. 2017;81:77–86. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.07.012>
25. Fiorese G. D., Balacco G., Bruno G., Nikolaidis N. Hydrogeological modelling of a coastal karst aquifer using an integrated SWAT-MODFLOW approach. *Environmental Modelling & Software*. 2025;183:106249. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106249>
26. Achu A. L., Aju C. D., Di Napoli M., Prakash P., Gopinath G., Shaji E., Chandra V. Machine-learning based landslide susceptibility modelling with emphasis on uncertainty analysis. *Geoscience Frontiers*. 2023;14(6):101657. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101657>
27. Petala E., Klimis N. Fragility of highway embankments exposed to permanent deformations due to underlying fault rupture. *Geosciences*. 2024;14(11):312. <https://doi.org/10.3390/geosciences14110312> URL: https://www.researchgate.net/publication/385877368_Fragility_of_Highway_Embankments_Exposed_to_Permanent_Deformations_Due_to_Underlying_Fault_Rupture



Информация об авторах

Кацко Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

katsko99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8484-159X>

Кузнецов Евгений Владимирович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела мониторинга научно-исследовательской деятельности, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

dtn-kuz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0524-8390>

Information about the authors

Dmitriy I. Katsko, Postgraduate in the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

katsko99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8484-159X>

Evgeniy V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher in the Department of Research Activities Monitoring, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

dtn-kuz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0524-8390>

Получена 13 февраля 2026 г., одобрена 20 марта 2026 г., принята к публикации 22 марта 2026 г.

Received 13 February 2026, Approved 20 March 2026, Accepted for publication 22 March 2026