

• МЕЛИОРАЦИЯ •

УДК 624.137.2:519.245

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВЫХ ГРУНТОВ

Д. И. Кацко, аспирант

Е. В. Кузнецов, доктор технических наук

*Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия*

Аннотация

Для территорий, подверженных оползневым процессам, полезно количественно оценить риск обрушения склона. Чтобы рассчитать риск, необходимо знать вероятность обрушения, хотя традиционно используются детерминированные методы расчета устойчивости. Цель нашей работы – разработка методики вероятностной оценки устойчивости склона, основанной на методе Монте-Карло. Главным результатом работы является выявление закона распределения для коэффициента устойчивости.

Ключевые слова: коэффициент устойчивости, метод Morgenstern – Price, оползневый риск, закон распределения, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, бутстреп-метод.

Abstract

D. I. Katsko, E. V. Kuznetsov

SIMULATION MODELING IN CALCULATIONS OF THE STABILITY OF LANDSLIDE SOILS

For areas experiencing landslide processes, it is useful to quantify the risk of slope failure. To calculate, it is necessary to know the probability of collapse, although deterministic methods for calculating stability are traditionally used. The goal of our work is to develop a method for probabilistic assessment of slope stability based on the Monte-Carlo method. The main result of the work is to identify patterns of distribution of stability coefficients.

Keywords: stability coefficient, Morgenstern – Price method, landslide risk, distribution law, simulation modeling, Monte Carlo method, bootstrap method.

Введение

Оползни – смещение земляных масс вниз по склону под влиянием силы тяжести. Чаще всего устойчивость теряется из-за увеличения влаги в грунтах под влиянием поверхностных и подземных вод. Оползание грунтов – достаточно сложное явление, так как точное очертание поверхности скольжения определить невозможно; кинематика оползневого процесса до конца не изучена; при расчете устойчивости исследователь имеет дело со статически неопределимой системой.

Образование оползня также зависит от геологических, климатических, гидрологических и эндогенных условий. Активизация оползня, то есть процесс естественного формирования рельефа, нередко возникает из-за деятельности человека: подрезки склонов при строительстве дорог и карьеров, снижения прочности

грунтов при их подтоплении и переувлажнении водохранилищами или каналами [1].

Как правило, в расчетах устойчивости склона используют детерминированные методы (методы предельного равновесия и метод конечных элементов), в которых устойчивость склона характеризуется коэффициентом устойчивости. Так как грунтовый массив неоднороден, то прочностные характеристики, плотность, поровое давление, модуль упругости и другие параметры имеют некоторый разброс. Однако коэффициент устойчивости – это фиксированное значение [2–5].

Рассмотрим возможность учета погрешности геологического параметра с помощью метода Монте-Карло.

В более ранней работе [6] была проанализирована классификация основных зако-

нов распределения непрерывных случайных величин, а также продемонстрирован потенциал программного комплекса *GeoStudio* с точки зрения вероятностной оценки обрушения склона. В данной программе можно рассматривать лишь некоторые законы распределения (нормальный, лог нормальный, треугольный, обобщенный нормальный, непрерывный равномерный) для прочностных характеристик грунта. Надстройка @RISK (*MS Excel*) позволяет нам учитывать более ста законов распределения, которые применяются

при моделировании надежности, риска и экстремальных явлений и т. д.

В представляемой работе стохастические переменные – это сцепление, угол внутреннего трения и поровое давление; за детерминированную модель была принята наиболее продвинутая формула Моргенштерна – Прайса. Использовались пять критериев для оценки подходящего закона распределения, который наилучшим образом будет описывать коэффициент устойчивости.

Определение риска потери устойчивости на оползневом участке

Объект исследования – автомобильная дорога 35 ОП РЗ 35А-002 (Е-105) на границе России с Украиной: Симферополь – Алушта – Ялта; там на нижней стороне склона расположены виноградники.

Для защиты этих территорий от опасных геологических явлений разработан комплекс мероприятий по инженерной защите. Ниже будут описаны оползневой участок склона и расчет его устойчивости в естественном (первоначальном) состоянии.

Указанный участок отличается ступенчатостью и террасированностью, что обусловлено оползневыми деформациями, денудационными процессами, неотектоническими проявлениями и абразионно-аккумулятивной деятельностью моря, а также извилистостью береговой линии. На изрезанность последней оказали влияние структурные и литологические особенности пород береговой зоны; изрезанность поперечного профиля связана с наличием эрозионных форм, речных долин, балок и оврагов (особенно в верховьях), которые глубоко врезаются в верхнюю часть склона, захватывая и Главную грядку.

После проведения инженерно-геологических изысканий были получены данные для расчета коэффициента устойчивости. На момент исследований грунтовые воды на рассматриваемом участке встречены всеми пробуренными скважинами, уровень грунтовых вод установился на глубинах 2,5–5,8 м, поэтому учитывалось поровое давление.

Для получения функциональной зависимости коэффициента устойчивости от прочностных характеристик грунта и геометрии скло-

на применялся наиболее актуальный метод Моргенштерна – Прайса, реализованный в канадском программном комплексе *GeoStudio* (рис. 1) [1].

В данном методе коэффициент запаса устойчивости определяется с помощью уравнений равновесия как моментов, так и сил. В нем учитывались также различные функции $f(x)$ взаимосвязи между сдвигающими и нормальными силами в блоках, на которые разбивается оползневое тело.

Склон считается устойчивым, если коэффициент устойчивости, равный отношению сил, удерживающих грунтовый массив, к силам, стремящимся вывести его из равновесия, больше единицы. Когда коэффициент приблизительно равен единице, это свидетельствует о предельном равновесии и, как правило, предшествует оползневой стадии. На рассматриваемом участке коэффициент устойчивости равен 1,056 (рис. 1).

Для реализации имитационного моделирования расчет был воспроизведен в *MS Excel* (табл. 1). В данной таблице приведены физико-механические и геометрические параметры, которые были перенесены из программного комплекса *GeoStudio*.

Использование метода Моргенштерна – Прайса, как и других методов предельного равновесия, предполагает разделение скользящего массива на произвольное число блоков и суммирование усилий в каждом блоке [7, 8]. Пример такого блока, в котором выполняется условие статического равновесия, показан на рис. 2.

Метод анализа: Моргенштерна - Прайса

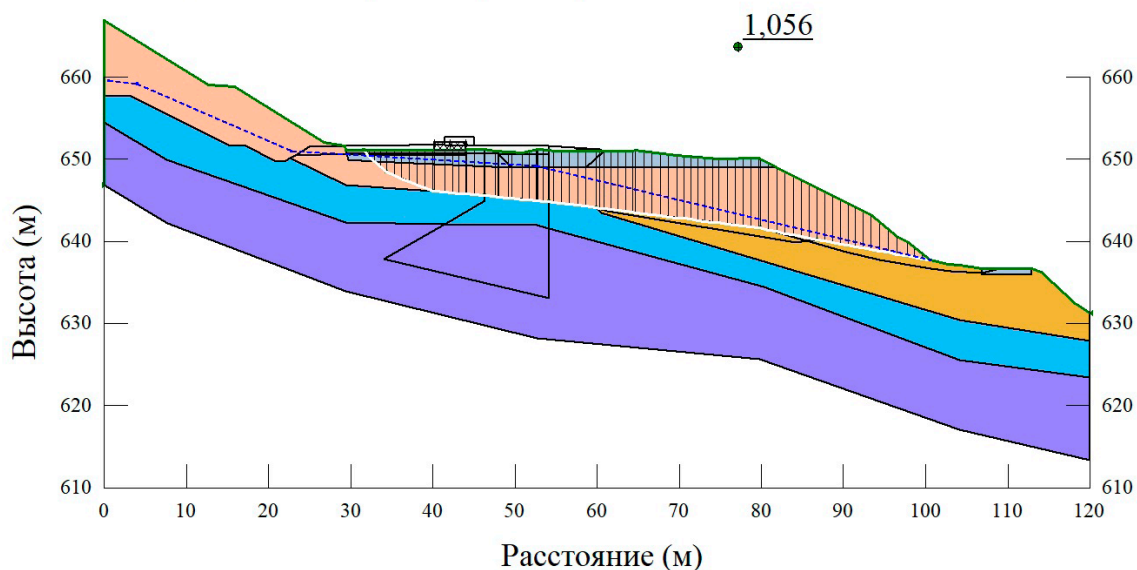


Рис. 1. Расчет в программном комплексе *GeoStudio* методом Моргенштерна – Прайса

Таблица 1. Исходные данные для проведения имитационного моделирования с использованием метода Моргенштерна – Прайса

| β , м | c , кПа | W , кН | α , град. | φ , град | u , кПа | $f(x)$ |
|-------------|-----------|----------|------------------|------------------|-----------|--------|
| 0,4374 | 23 | 0,848 | -50,331 | 28 | -4,692 | 0,00 |
| 0,129 | 23 | 0,633 | -44,828 | 28 | -2,709 | 0,00 |
| 0,353 | 28 | 2,571 | -44,83 | 23 | -1,145 | 0,00 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 0,939 | 28 | 5,581 | -10,098 | 11,2 | 0,259 | 0,00 |

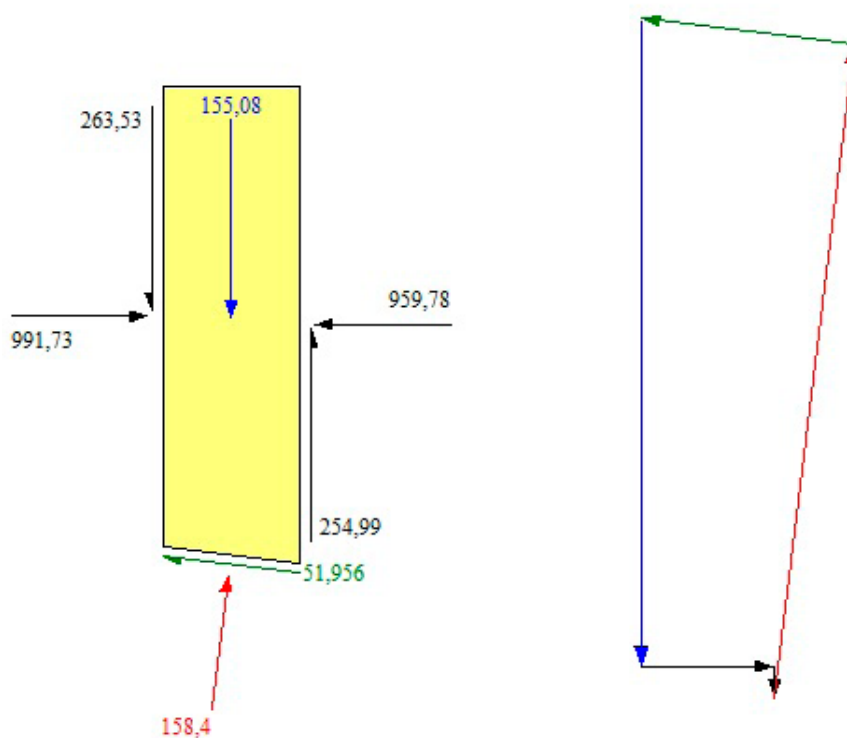


Рис. 2. Равнодействующие силы в блоке

Применение метода Моргенштерна – Прайса для каждого блока и, следовательно, для всего оползневого тела обуславливает выполнение всех уравнений статики, учет нормальных и касательных усилий между блоками.

Приведем примеры расчетов [9].

Коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов:

$$FS_m = \frac{\sum c\beta R + (N - u\beta)R \operatorname{tg}\varphi}{\sum Wx - \sum Nf}, \quad (1)$$

где c – эффективное сцепление; φ – эффективный угол внутреннего трения; β – длина поверхности скольжения в пределах отсека; W – вес блока; u – поровое давление; R – радиус круглоцилиндрической дуги скольжения; x – расстояние по горизонтали между центром тяжести рассматриваемого блока и центром вращения оползневого тела; f – расстояние по вертикали между центром тяжести рассматриваемого блока и центром вращения оползневого тела; α – угол наклона поверхности скольжения в пределах блока; N – нормальная сила в основании блока.

Коэффициент устойчивости из условия равновесия сил:

$$FS_f = \frac{\sum c\beta R + (N - u\beta)R \operatorname{tg}\varphi}{\sum N \sin \alpha}. \quad (2)$$

Нормальная сила в основании блока:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c\beta \sin \alpha + u\beta \sin \alpha \operatorname{tg}\varphi}{FS}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \operatorname{tg}\varphi}{FS}}, \quad (3)$$

FS – это FS_m , когда N подставляется в уравнение коэффициента устойчивости из условия равновесия моментов, а FS – это FS_f , когда N подставляется в уравнение коэффициента устойчивости из условия равновесия сил.

Касательные межотсековые силы определяются по нижеприведенной формуле как доля нормальных межотсековых сил с учетом функции распределения по длине склона:

$$X = E\lambda f(x), \quad (4)$$

где $f(x)$ – функция взаимосвязи касательных и нормальных межотсековых сил; λ – процент использования функции $f(x)$; E – нормальная межотсековая сила.

Нормальные межотсековые силы при этом вычисляются по формуле:

$$E_R = E_L + \frac{(c\beta - u\beta \operatorname{tg}\varphi) \cos \alpha}{FS} + N \frac{(\operatorname{tg}\varphi \cos \alpha - \sin \alpha)}{FS}. \quad (5)$$

С помощью надстройки @RISK в MS Excel было проведено имитационное моделирование по методу Монте-Карло, использующее факторный эксперимент 3^3 [10, 11]. В качестве изменяемых параметров использовались характеристики прочности грунта c и φ и поровое давление u , для которых рассмотрены три варианта среднего квадратического отклонения $0,1\sigma$; $0,15\sigma$; $0,2\sigma$ при постоянных средних значениях.

В табл. 2 рассмотрено 27 комбинаций трех переменных (u, c, tg) с разными коэффициентами вариации, характеризующими их однородность.

Таблица 2. Схема трехфакторного эксперимента на трех уровнях типа 3^3

| Уровни фактора А | Уровни фактора В | Уровни фактора С | | |
|------------------|------------------|-------------------|-------|-------|
| | | C_0 | C_1 | C_2 |
| | | Сочетания уровней | | |
| A0 | B0 | 000 | 001 | 002 |
| A0 | B1 | 010 | 011 | 012 |
| A0 | B2 | 020 | 021 | 022 |
| A1 | B0 | 100 | 101 | 102 |
| A1 | B1 | 110 | 111 | 112 |
| A1 | B2 | 120 | 121 | 222 |
| A2 | B0 | 200 | 201 | 202 |
| A2 | B1 | 210 | 211 | 212 |
| A2 | B2 | 220 | 221 | 222 |

В ходе имитационного моделирования были получены распределения (рис. 3), наилучшим образом описывающие коэффициент устойчивости (табл. 3). Оценка распределения производилась по пяти критериям: усредненный логарифм правдоподобия (*Average LogL*), хи-квадрат Пирсона, информационный критерий Акаике (AIC), Байесовский информационный критерий (BIC), критерий Колмогорова – Смирнова и критерий Андерсона – Дарлинга.

Рассмотрим эксперимент на уровне 000. На рис. 3 представлены законы распределения, наилучшим образом описывающие эмпирический закон распределения коэффициента устойчивости по критерию хи-квадрат. На рис. 4 продемонстрирована гистограмма, полученная бутстреп-методом, из которой можно оценить вероятность того, что коэффициент устойчивости будет меньше единицы на уровне 000 (вероятность равна 0,236, или 23,6 %).

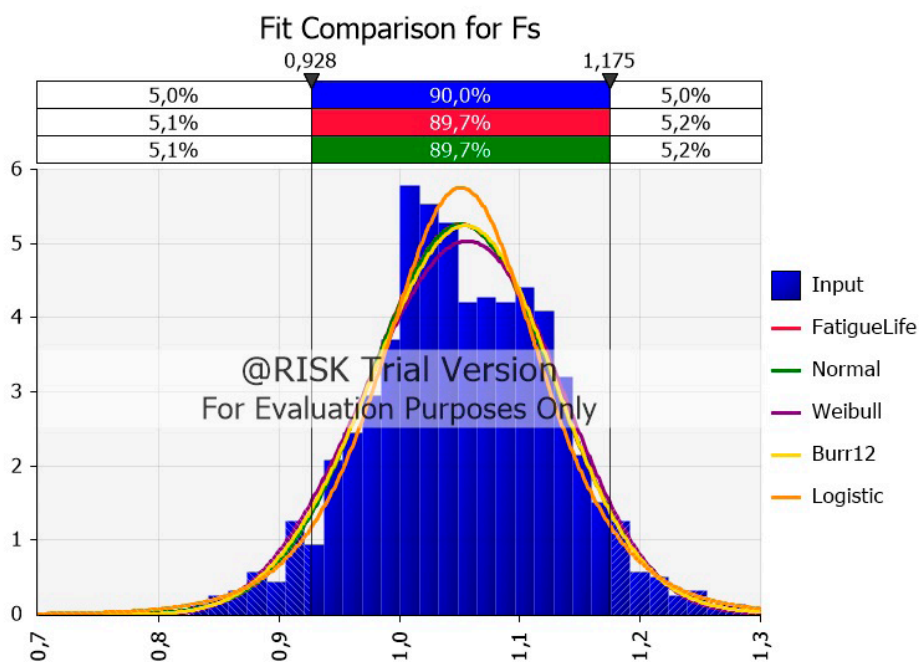


Рис. 3. Эксперимент на уровне 000 (по критерию хи-квадрата Пирсона)

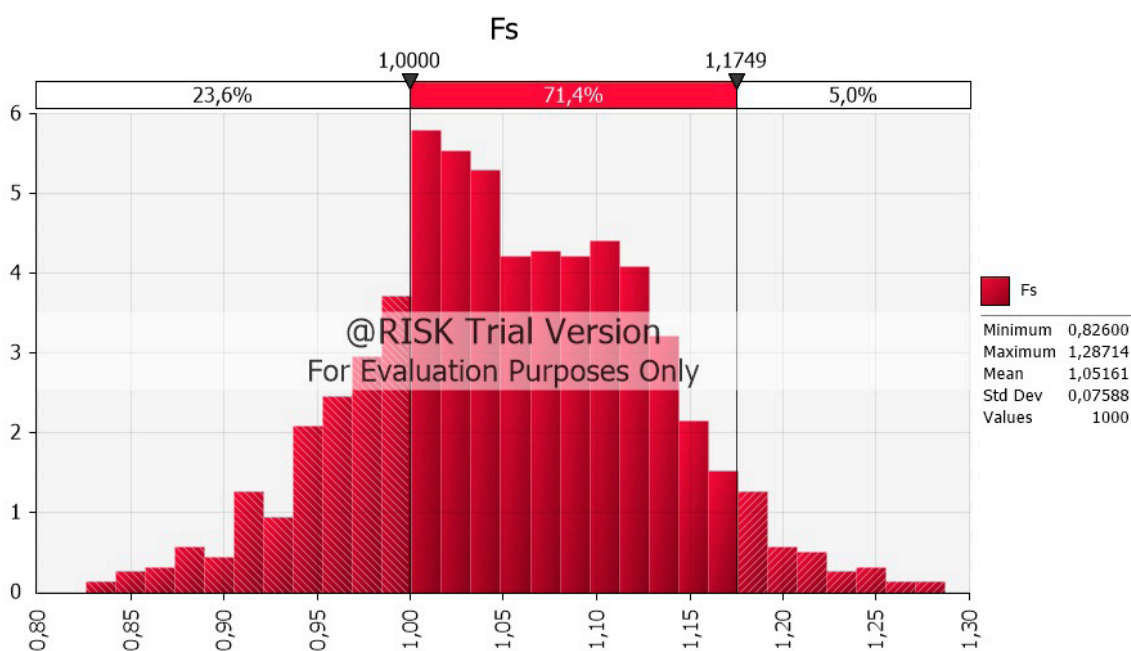


Рис. 4. Эксперимент на уровне 000 (вероятность обрушения склона)

В табл. 3 представлен итоговый результат имитационного факторного эксперимента 3^3 (табл. 2), показаны вероятностная оценка обрушения склона $P(FS)$ на разных уровнях,

а также первые пять наилучших законов распределения (упорядоченные по уровню значимости), соответствующих заголовкам столбцов.

Таблица 3. Сводная таблица результатов эксперимента 3^3

| <i>и. с. tg φ</i> | $P(FS < 1)$, % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 000 | 23,6 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Dagum</i> |
| 100 | 24,6 | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Normal</i> | <i>Weibull</i> | <i>LogLogistic</i> |
| 200 | 25 | <i>FatigueLife</i> | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Logistic</i> |
| 110 | 26,1 | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Weibull</i> | <i>Dagum</i> |
| 010 | 27,6 | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Weibull</i> | <i>Dagum</i> |
| 210 | 27,7 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Logistic</i> |
| 001 | 28 | <i>Normal</i> | <i>Dagum</i> | <i>Logistic</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Weibull</i> |
| 120 | 28,5 | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Logistic</i> | <i>Dagum</i> |
| 220 | 30,3 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Weibull</i> | <i>Burr12</i> | <i>Dagum</i> |
| 020 | 30,5 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Logistic</i> |
| 101 | 31,3 | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Dagum</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>Logistic</i> |
| 201 | 31,7 | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Normal</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>Logistic</i> |
| 011 | 32,2 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Logistic</i> |
| 211 | 32,5 | <i>Gamma</i> | <i>Erlang</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Normal</i> |
| 111 | 32,8 | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Normal</i> | <i>Dagum</i> | <i>Weibull</i> |
| 221 | 33 | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Weibull</i> | <i>Dagum</i> |
| 121 | 33,9 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Dagum</i> |
| 021 | 34,3 | <i>FatigueLife</i> | <i>Normal</i> | <i>Burr12</i> | <i>Dagum</i> | <i>Weibull</i> |
| 102 | 34,8 | <i>Burr12</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Gamma</i> | <i>Erlang</i> |
| 002 | 35 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Weibull</i> | <i>Logistic</i> |
| 012 | 35,4 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Dagum</i> | <i>Weibull</i> |
| 112 | 35,3 | <i>LogLogistic</i> | <i>Burr12</i> | <i>Logistic</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Gamma</i> |
| 012 | 35,4 | <i>Normal</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Dagum</i> | <i>Weibull</i> |
| 122 | 35,7 | <i>Burr12</i> | <i>Dagum</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>Logistic</i> |
| 222 | 36,5 | <i>FatigueLife</i> | <i>Burr12</i> | <i>Normal</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>Logistic</i> |
| 022 | 37,4 | <i>FatigueLife</i> | <i>Gamma</i> | <i>Erlang</i> | <i>Burr12</i> | <i>LogLogistic</i> |
| 212 | 37,5 | <i>Burr12</i> | <i>LogLogistic</i> | <i>FatigueLife</i> | <i>Logistic</i> | <i>Normal</i> |

Теперь, зная закон распределения коэффициента устойчивости, можно использовать значение вероятности обрушения склона для оценки экономического риска.

Для примера рассмотрим сценарий, где уровень значимости 0,365, что соответствует результатам имитационного эксперимента на уровне 222. В этом случае наилучший закон распределения – *FatigueLife* (первый столбец в табл. 3), который, как правило, описывает усталость материала и используется для описания отказа конструкции. В целом можно сказать, что вероятность обрушения $P(FS < 1) \approx 0,24 - 0,35$.

Таким образом, мы получили законы распределения (*Weibull*, *Burr12*, *Dagum*, *FatigueLife*, *Gamma*, *Erlang*, *Logistic*), которые поддерживаются на интервале $[0, +\infty]$ [12–14].

Заключение

В статье показаны результаты имитационного эксперимента на основе детерминированной модели оценки устойчивости грунта Моргенштерна – Прайса. В целях определения закона распределения для коэффициента устойчивости применялся бутстреп-метод, основанный на многократной генерации нормально распределенных выборок методом Монте-Карло с использованием характеристик прочности грунта c и ϕ и порового давления u .

Эти вероятностные распределения используются при моделировании ситуаций стихийных бедствий и техносферной безопасности, для описания эмпирических законов, имеющих «тяжелые хвосты». Эти законы также широко применяются при изучении надежности – для моделирования срока службы конструкции. Они описывают свойство износа (или усталости) материала: чем старше конструкция, тем больше вероятность ее выхода из строя в ближайшем будущем.

Полученные законы распределения относятся к экстремальным распределениям, описывающим минимальные значения элементов для множества, ограниченного слева, то есть хорошо подходят для описания коэффициента устойчивости, близкого к единице.

Выявлено, что коэффициент устойчивости может подчиняться экстремальным законам распределения (*Weibull*, *Burr12*, *Dagum*, *FatigueLife*, *Gamma*, *Erlang*, *Logistic*), использующимся для моделирования техносферной безопасности и стихийных бедствий.

На основании полученных результатов предложен подход вероятностной оценки устойчивости склона, который позволяет уточнить риск обрушения склона.

Библиографический список

1. Безуглова, Е. В. Оползневой риск транспортных природно-технических систем : монография / Е. В. Безуглова, С. И. Маций, В. В. Подтелков. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 239 с.
2. Hasofer, A. M. Exact and invariant second-moment code format / A. M. Hasofer, N. C. Lind // Journ. of Engineering Mechanics. – 1974. – № 1 (100). – P. 111–121.
3. Low, B. K. Efficient reliability evaluation using spreadsheet / B. K. Low, W. H. Tang // Journ. of Engineering Mechanics. – 1997. – Vol. 123, iss. 7. – P. 749–752. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:7\(749\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(749))
4. Low, B. K. Practical probabilistic slope stability analysis / B. K. Low // Proceedings : Soil and Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U.S. Rock Mechanics Symposium, M.I.T, June 22–26, 2003 ; Verlag Glückauf GmbH Essen. – Cambridge, MA, USA, 2003. – Vol. 2. – P. 2777–2784.
5. Reliability analyses of slope stability: homogeneous slope with circular failure / M. Selmi, J. Baroth, M. Ltifi, H. Hassis, F. Darve // European Journ. of Environmental and Civil Engineering. – 2010. – Vol. 14, № 10. – P. 1227–1257. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693293>
6. Кацко, Д. И. Вероятностные расчеты устойчивости оползневого склона / Д. И. Кацко, С. И. Маций / ГеоРиск. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 8–22.

7. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б. И. Далматов. – 4-е изд. – С.-Петербург : Лань, 2017. – 416 с.
8. Добров, Э. М. Механика грунтов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Э. М. Добров. – Москва : Академия, 2008. – 272 с.
9. Stability Modeling with GeoStudio [Electronic resource] / GEO-SLOPE International Ltd. – Calgary, Canada, 2005. – Mode of access: <https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/SLOPE%20Modeling.pdf>. – Date of access: 20.02.2024.
10. Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании : в 2 т. / Дж. Клейнен ; пер. с англ. под ред. Ю. П. Адлера, В. Н. Ворыгина. – Москва : Статистика, 1978. – Т. 1. – 221 с.
11. Шенон, Р. Ю. Имитационное моделирование систем – искусство и наука // Р. Ю. Шенон ; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – Москва : Мир, 1978. – 221 с.
12. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель ; пер. с англ. В. Ю. Татарского под ред. Д. М. Чибисова. – Москва : Мир, 1965. – 451 с.
13. Ивченко, Г. И. Введение в математическую статистику / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Ленанд, 2017. – 606 с.
14. Райзер, В. Д. Вероятностные методы надежности в анализе надежности и живучести сооружений / В. Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2018. – 396 с.

Поступила 30 апреля 2024 г.