

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА

APPLICATION OF THE PROBABILISTIC SLOPE STABILITY ANALYSIS

УДК 624.121.537

DOI 10.25296/1993-5056-2017-4-18-26



КАН К.

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, kevinkang8@mail.ru

KANG K.

Postgraduate student of Engineering and Ecological Geology Department, Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, kevinkang8@mail.ru

ЗЕРКАЛЬ О.В.

Заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, igzov@mail.ru

ZERKAL O.V.

Head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories, leading researcher of the Engineering and Ecological Geology Department, Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, igzov@mail

Ключевые слова:

оползни; количественная оценка устойчивости; сейсмическое воздействие; вероятностный анализ; анализ чувствительности.

Key words:

landslides; slope stability analysis; seismic impact; probabilistic slope stability analysis; sensitivity slope stability analysis

Аннотация

Для участка склона в средней части долины р. Мзымты выполнена количественная оценка устойчивости с использованием нескольких подходов — традиционного, основанного на учете осредненных значений показателей физико-механических свойств грунтов, и вероятностного, базирующегося на получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения факторов оползнеобразования. Показано, что результаты, полученные при использовании второго подхода, лучше согласуются с данными полевых наблюдений. Вероятностный подход к количественной оценке устойчивости склона дополнен анализом чувствительности, ориентированным на выявление зависимости коэффициента устойчивости от закономерностей изменения параметров факторов оползнеобразования.

Abstract

Slope stability analysis in the middle part of the Mzymta-river valley was implemented. Several approaches were used to solve this problem. The first — traditional — is based on average value of the properties of soils. The second approach presents probabilistic slope stability analysis based on probabilistic distribution functions of the factors of landslide activity. It's shown that the results of the probabilistic slope stability analysis agreed better with field observations. This type of analysis was added by sensitivity slope stability analysis, which is oriented on the dependence of the safety factor from the variability of parameters of landslide activity.

Введение

Анализ вероятности развития опасных геологических процессов является одной из ключевых составляющих при количественной оценке геологического риска. Полученные на основании консервативных (детерминистических) методов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень опасности, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними и вероятностью развития оползневой процесса [3, 7]. Применение вероятностного анализа позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность активизации оползневых процессов.

Развитие вероятностного подхода при количественной оценке устойчивости склонов, в основу которого был положен более полный учет наблюдаемой изменчивости прочностных характеристик грунтов, берет свое начало с 80-х годов прошлого века [9]. В настоящее время вероятностный анализ при выполнении расчетов устойчивости склонов находит все большее применение на практике, что связано с пониманием дискретности исходных данных, полученных в ходе инженерно-изыскательских работ [6]. Его суть заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона ($K_{уст}$) в зависимости от вероятностных функций распределения факторов оползнеобразования — прочностных характеристик грунтов, положения уровня подземных вод, величины сейсмического воздействия и ряда других [1]. Распределение факторов оползнеобразования влияет на конечные результаты количественной оценки устойчивости склона [11].

Анализ чувствительности близок к вероятностному анализу, однако вместо задачи о вероятности развития оползневой процесса в зависимости от вероятности изменчивости факторов оползнеобразования в этом случае решается задача о степени зависимости коэффициента устойчивости от закономерности изменения тех или иных параметров [8]. Например, в Китае анализ чувствительности нередко используется на практике при оценке устойчивости склонов [10, 12, 15]. Он позволяет дать прогноз изменения $K_{уст}$ в зависимости от вариаций одного или нескольких факторов оползнеобразования.

В основу настоящей работы были положены результаты анализа устойчивости оползневой долины на участке станции пассажирской подвесной канатной дороги (ППКД) Карусель-8 на северном склоне хребта Аибга. На первом этапе исследований была выполнена количественная оценка устойчивости склона традиционными консервативными (детерминистическими) методами. На этой стадии расчет проводился по методу Моргенштерна — Прайса, основанному на совместном учете равновесия сил и моментов, что позволяет охарактеризовать этот подход как наиболее математически строгий [14]. Предлагаемый метод рассматривается нормативными документами, например СП 11-105-97, в качестве общепринятого [4]. Второй этап работ включал вероятностный анализ устойчивости склона, а на третьем был выполнен анализ чувствительности.

Характеристика изучаемого объекта

Рассматриваемый склон располагается в левом борту средней части долины р. Мзымты в пределах Сочинской горно-климатической курортной зоны. Абсолютные отметки верхней части склона в районе станции канатной дороги составляют около 1 160 м, а его превышения над



Рис. 1. Схема изучаемого оползневой участка

дном долины реки — около 450 м. Генеральное направление уклона склона, достигающего 30° , северо-западное. На территории, примыкающей к станции канатной дороги, сформировался оползень, находившийся в период полевого обследования в стадии активного смещения (рис. 1).

Протяженность оползня составляет около 150 м при ширине до 75 м. Предполагаемая глубина развития оползневых деформаций — 5–7 м, а объем вовлеченных в смещение грунтов достигает 70 тыс. m^3 .

В геологическом строении рассматриваемого склона принимают участие современные элювиальные и пролювиальные отложения, подстилаемые высокопрочными порфиритами юрского возраста. Также ограничено представлены техногенные грунты. Верхняя часть геологического разреза сложена крупнообломочным материалом коллювиально-делювиального генезиса, включающим глыбы и щебень порфиритов и туфопесчаников с суглинистым тугопластичным и полутвердым заполнителем, составляющим до 35%. Схематичный инженерно-геологический разрез участка представлен на рис. 2.

При инженерных изысканиях в строении склона были выделены 3 инженерно-геологических элемента (ИГЭ): ИГЭ-1 — техногенный насыпной грунт (tQ_{IV}); ИГЭ-2 — щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (cdQ_{IV}); ИГЭ-3 — порфирит (J_2pr). Сейсмичность рассматриваемой территории, согласно СП 14.13330.2014 [5], оценивается в 8 баллов (карта А), что учитывалось при количественной оценке устойчивости склона.

Количественная оценка устойчивости склона

На начальной стадии работ расчет устойчивости склона был выполнен стандартным методом предельного равновесия (метод Моргенштерна — Прайса), применение которого, в частности, рекомендуется нормативными техническими документами. Использованный подход является детерминированным, поскольку при выполнении

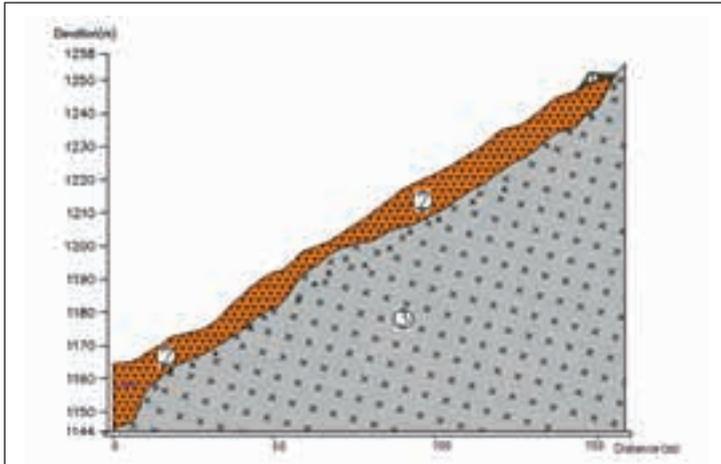


Рис. 2. Схематичный инженерно-геологический разрез оползневого склона. Обозначения: 1 — техногенный насыпной грунт (tQ_{IV}); 2 — щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (cdQ_{IV}); 3 — порфирит (J,pr)

расчета предполагается, что прочностные характеристики грунтов неизменны и могут быть заданы в виде усредненных расчетных показателей, что также предусматривается действующими нормативными документами. Иными словами, в основе стандартных, традиционно используемых методов количественной оценки устойчивости склонов лежит постулат о неизменяемости во времени показателей, характеризующих слагающие склон грунты. Полученные при стандартной статистической обработке параметры физико-механических свойств грунтов, использованные при выполнении расчетов, приведены в табл. 1.

Расчет устойчивости склона выполнялся с учетом ожидаемого 8-балльного сейсмического воздействия по псевдостатической схеме анализа. В расчет закладывалась величина горизонтального сейсмического ускорения для 8-

балльного землетрясения. При псевдостатическом анализе эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительной силы, определяемой следующим образом:

$$F_h = \frac{a_h}{g} W = K_c W, \quad (1)$$

где, a_h — горизонтальное сейсмическое ускорение; g — ускорение свободного падения; W — плотность грунта; K_c — коэффициент сейсмичности.

Принятые при количественной оценке устойчивости склона значения коэффициента сейсмичности приведены в табл. 2.

Полученные результаты количественной оценки устойчивости склона с применением стандартного подхода, основанного на учете усредненных значений показателей физико-механических свойств грунтов, приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при принятых исходных показателях устойчивость склона в природных условиях находится в состоянии, близком к предельному равновесию, — $K_{уст}$ незначительно больше 1,00. При ожидаемом сейсмическом воздействии рассматриваемый участок теряет равновесие и переходит в неустойчивое состояние. Каких-либо дополнительных выводов на основании результатов количественной оценки устойчивости склона, полученных с применением стандартного (рекомендуемого нормативными техническими документами) подхода, основанного на учете усредненных значений неизменных показателей физико-механических свойств грунтов, сделать нельзя. Более того, эти результаты не согласуются с фактической ситуацией, описанной при полевом обследовании, выявившем активное развитие склоновых деформаций.

На следующем этапе анализа устойчивости склона из условий оценки был исключен постулат о неизменности во времени показателей свойств слагающих склон грунтов, определяющий использование исходных данных в

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов, используемые в расчете			
Номер ИГЭ	Плотность, кН/м ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, °
1	21,2	12	28
2	22,3	8,93	28,57
3	27,9	Скальное основание, порфирит с прочностью $\sigma = 67-89$ МПа	

Таблица 2

Коэффициенты сейсмичности (по [2])							
Сейсмическая балльность района	1-6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент сейсмичности	0,0	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	≥0,75

Таблица 3

Результаты количественной оценки устойчивости склона (стандартный подход)		
	Без сейсмического воздействия	С сейсмическим воздействием
$K_{уст}$	1,07	0,972

Примечание: расчеты выполнены без учета вероятностного анализа.

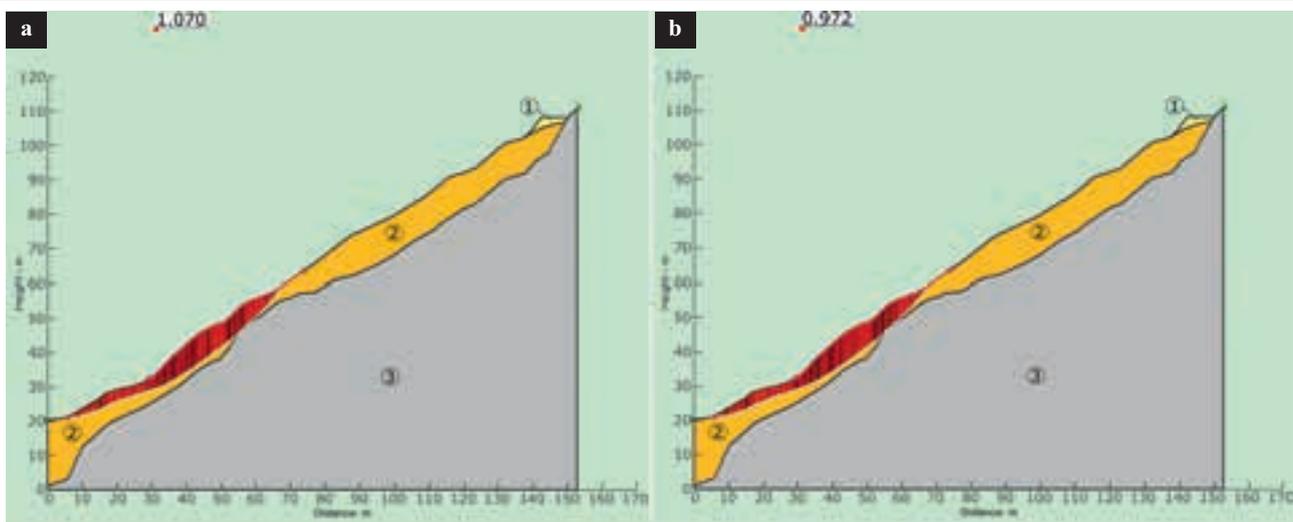


Рис. 3. Геомеханическая расчетная схема (стандартный подход, без учета вероятностного анализа): а — без сейсмического воздействия ($K_{уст} = 1,070$); б — с учетом с ожидаемого сейсмического воздействия ($K_{уст} = 0,972$). Цифры 1, 2, 3 на рисунке соответствуют номерам ИГЭ в табл. 1

Таблица 4

Изменчивость показателей физико-механических свойств грунтов ИГЭ-2

№ образца	Плотность ρ , кН/м ³	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , ° ¹
1	21,9	11,97	26,45
2	20,7	8,25	27,44
3	24,8	—	—
4	20,9	7,32	29,68
5	21,8	7,79	28,35
6	21,1	10,63	29,49
7	21,5	7,61	29,99
8	24,4	—	—
9	23,8	—	—
Средние значения	22,3	8,93	28,57
Коэффициент вариации	0,071	0,214	0,049

составе стандартных, традиционно применяемых методов количественной оценки устойчивости склонов, и принята необходимость учета возможной изменчивости физико-механических свойств грунтов во времени под действием различных факторов, что более реалистично описывает природные условия. Исходя из вышеописанного, наиболее значимое влияние на устойчивость рассматриваемого склона оказывает состояние грунтов ИГЭ-2, изменчивость показателей физико-механических свойств которых была оценена по результатам полевых и лабораторных работ. Фактические данные, характеризующие физико-механические свойства грунтов ИГЭ-2, приведены в табл. 4, а графики распределения — на рис. 4. Также стоит отметить, что для рассматриваемой территории было принято нормальное распределение величины сейсмического воздействия (рис. 4, *d*).

В дальнейшем с использованием полученных показателей распределения величины исходных данных по методу Монте-Карло рассчитывалось вероятностное рас-

пределение коэффициента устойчивости склона, изменяющегося в зависимости от учитываемых факторов [13]. Всего было проведено порядка 2 000 отдельных расчетов, рассматривавших различные сочетания параметров анализируемых факторов. Полученные результаты количественной оценки устойчивости склона с учетом изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов приведены в табл. 5.

Полученные распределения величин коэффициента устойчивости без учета сейсмического воздействия и с его учетом показаны на рис. 5 и 6. Также была проведена вероятностная количественная оценка устойчивости склона (см. табл. 5), в составе которой дополнительно в отличие от детерминированных оценок были охарактеризованы минимальные, средние и максимальные величины устойчивости склона, а также стандартное отклонение в распределении величины $K_{уст}$ в расчетной выборке. Получение вероятностной количественной оценки устойчивости склона, представляющей собой, по сути,

¹ При оценке распределения использовались значения величин с арифметической точностью, полученной при обработке результатов лабораторных испытаний.

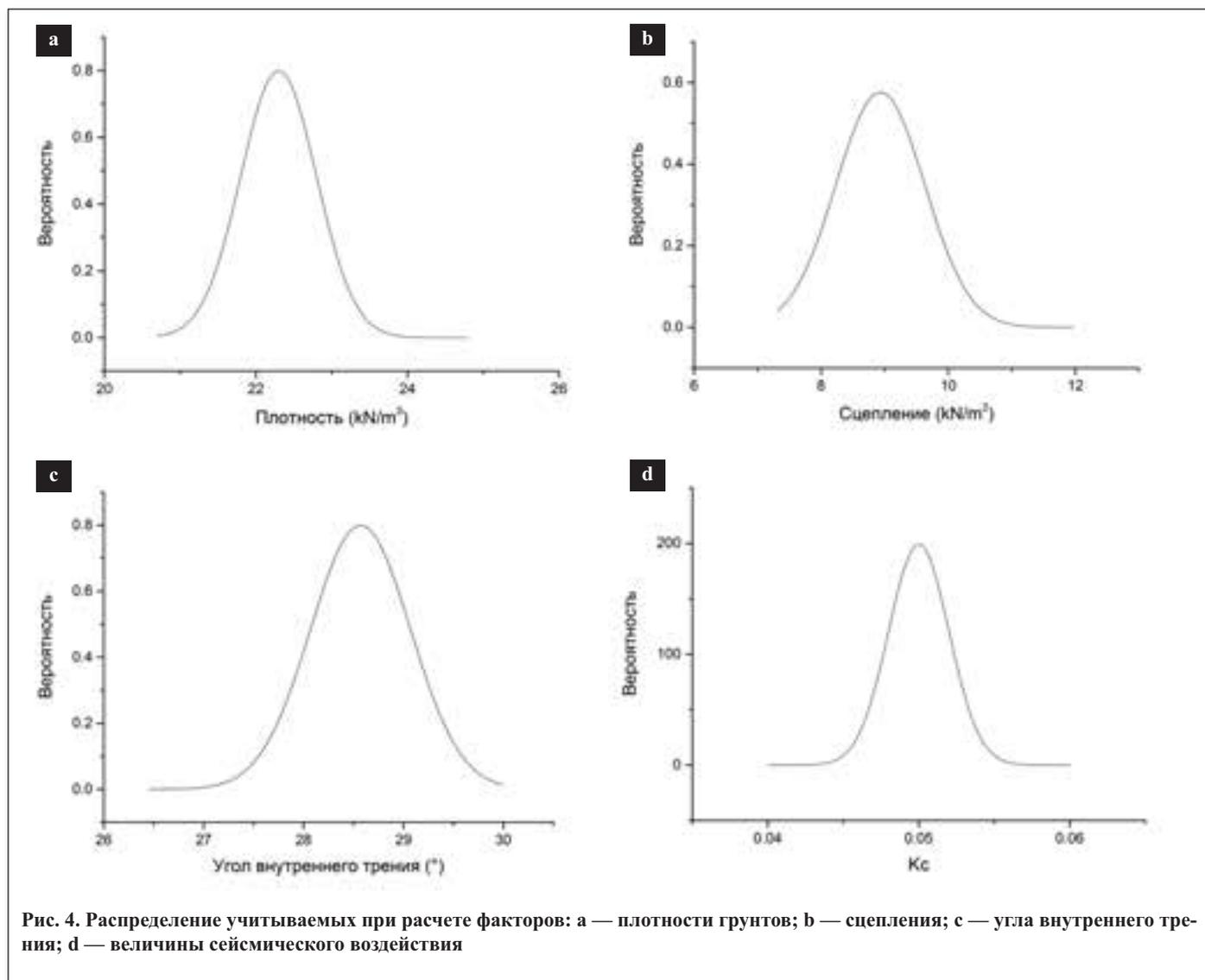


Рис. 4. Распределение учитываемых при расчете факторов: а — плотности грунтов; б — сцепления; в — угла внутреннего трения; г — величины сейсмического воздействия

Таблица 5

Результаты количественной вероятностной оценки устойчивости склона с использованием вероятностной функции распределения показателей, учитываемых при количественной оценке устойчивости склона

	Без сейсмического воздействия	С сейсмическим воздействием
$K_{уст}$ сред.	1,019	0,972
$K_{уст}$ мин.	0,922	0,889
$K_{уст}$ макс.	1,097	1,051
Стандартное отклонение $K_{уст}$	0,023198	0,022434
Вероятность развития оползневой процесса (при $K_{уст} < 1$), %	20,2	89,0
Показатель надежности, β	0,838	-1,234

оценку вероятности развития оползневых смещений (то есть вероятности потери устойчивости склоном, что при количественной оценке характеризуется величинами $K_{уст} < 1,0$), является дополнительной, вновь открывающейся возможностью при использовании подхода, основанного на учете изменчивости свойств грунтов во времени под действием различных факторов. В свою очередь, оценка вероятности потери устойчивости склоном дополняется характеристикой (показателем) надежности (β) полученной вероятностной оценки. Значение β рас-

считывается как мера нормализации коэффициента устойчивости склона $K_{уст}$ по отношению к среднеквадратичному отклонению σ_k этого коэффициента и может быть рассчитано по формуле:

$$\beta = (K_{уст} - 1,0) / \sigma_k \quad (2)$$

Иными словами, под показателем надежности понимается свойство склона сохранять устойчивое состояние. Более низким вероятностям развития склоновых дефор-

маций соответствуют более высокие показатели надежности и наоборот.

Рассмотрение результатов количественной оценки устойчивости склона на основе вероятностного подхода позволяет сделать значительно более широкие выводы о состоянии склона, в частности:

- средняя величина $K_{уст}$, полученная для условий без сейсмического воздействия с учетом изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов, ниже $K_{уст}$, полученного при использовании в качестве исходных данных усредненных показателей при применении консервативных (детерминистических) методов расчета устойчивости;

- для рассматриваемого склона при выявленных закономерностях изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов существуют сочетания характеристик, при которых склон является неустойчивым, что согласуется с результатами полевых наблюдений, выявивших активное развитие склоновых деформаций (без сейсмического воздействия);

- вероятность неблагоприятного сочетания показателей физико-механических свойств грунтов, при котором склон теряет устойчивость (без сейсмического воздействия), составляет порядка 20%;

- средняя величина $K_{уст}$, полученная для склона в условиях сейсмического воздействия с учетом изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов, равна $K_{уст}$, полученному при использовании консервативных (детерминистических) методов расчета, что указывает на ведущую роль сейсмического фактора, нивелирующего влияние изменчивости свойств грунтов для рассматриваемого склона;

- для рассматриваемого склона при выявленных закономерностях изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов существуют сочетания характеристик, при которых в условиях сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов склон сохраняет устойчивость;

- вероятность благоприятного сочетания показателей физико-механических свойств грунтов, когда склон сохраняет устойчивость в условиях сейсмического воздействия, составляет 11%.

Анализ чувствительности при количественной оценке устойчивости склона

В описанном выше примере количественной оценки устойчивости склона на основе вероятностного подхода распределение величины исходных данных имеет нормальный характер (см. рис. 4). Однако в природных условиях распределение показателей физико-механических свойств грунтов в полученной выборке не всегда характеризуется равномерностью, особенно когда склоновый массив представляет собой частое чередование прослоев разнородных грунтов невыдержанной мощности, что, в частности, отражается в равномерности отбора образцов для их последующего изучения.

Для сравнения, в Китае анализ чувствительности проводится методом, при котором значения параметров меняются с одинаковой пропорциональностью, например, сцепление или угол внутреннего трения пораздельно уменьшаются в 0,2 раза и рассматривается степень изменения $K_{уст}$ [12, 15]. При этом, чем больше степень изменения $K_{уст}$, тем устойчивость склона более чувствительна к этому показателю.

В настоящей работе для рассматриваемого склонового массива для оценки влияния того или иного показателя был

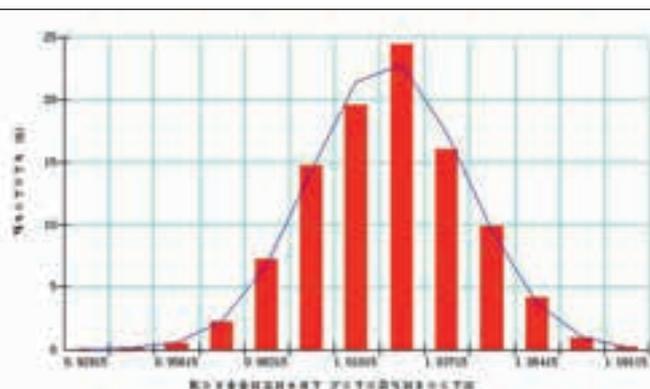


Рис. 5. Распределение $K_{уст}$ без учета сейсмического воздействия (среднее значение $K_{уст} = 1,019$, $\sigma = 0,023198$)

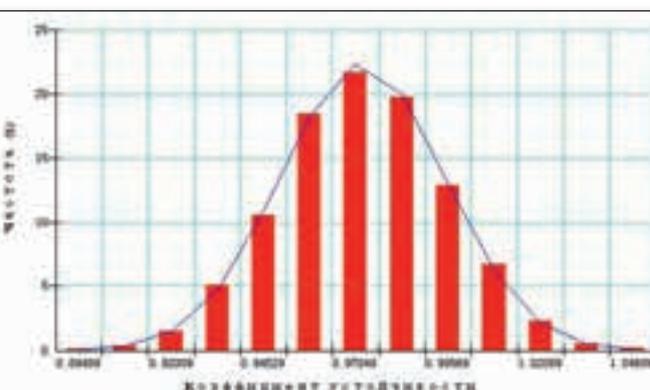


Рис. 6. Распределение $K_{уст}$ с учетом возможного сейсмического воздействия (среднее значение $K_{уст} = 0,972$, $\sigma = 0,022434$)

выполнен анализ чувствительности для диапазона изменчивости параметров исходных данных, приведенных в табл. 4. При оценке влияния отдельных показателей на $K_{уст}$ анализ чувствительности проводился с изменением только одного параметра, в то время как остальные величины характеризовались статистически осредненными значениями. Полученные результаты анализа приведены на рис. 7 и 8.

Из рис. 7 видно, что наибольшее влияние на устойчивость склона в условиях отсутствия сейсмического воздействия оказывает изменчивость величины угла внутреннего трения грунтов (ϕ), так как изменчивость $K_{уст}$ характеризуется наибольшей амплитудой при варьировании именно этого показателя (при неизменности других). Иными словами, рассматриваемый склоновый массив наиболее чувствителен (с точки зрения потери устойчивости) именно к характеристикам величины угла внутреннего трения грунтов, слагающих склон. Полученные результаты указывают, что для устойчивости рассматриваемого склона изменчивость величин сцепления (C) менее значима, чем варьирование величины угла внутреннего трения грунтов. При этом минимальная изменчивость $K_{уст}$ наблюдается при варьировании плотности грунтов (ρ), что указывает на наименьшую чувствительность устойчивости склона к изменению этой характеристики.

«Чувствительность» склона (с точки зрения потери устойчивости) к изменчивости прочностных характеристик сохраняется и в условиях сейсмического воздействия, при котором наибольшее влияние на устойчивость также оказывает непостоянство величины угла внутреннего трения грунтов (ϕ). Это видно из рис. 8 по максимальной амплитуде изменчивости $K_{уст}$ при варьировании ϕ (при неизменности других параметров). Влияние из-

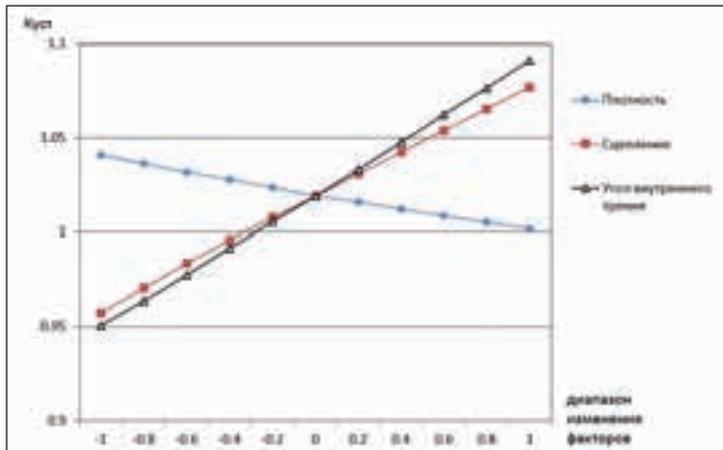


Рис. 7. Схема анализа чувствительности без учета сейсмического воздействия (результатирующее влияние на устойчивость склона — $\varphi > C > r$)

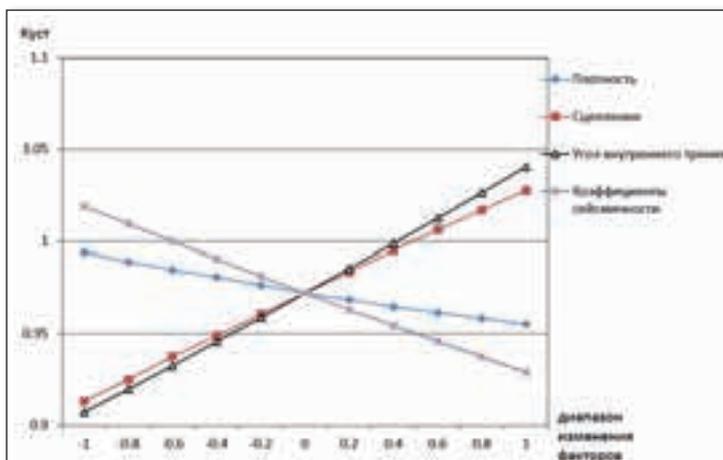


Рис. 8. Схема анализа чувствительности с учетом сейсмического воздействия (результатирующее влияние на устойчивость склона — $\varphi > C > K_c > r$)

менчивости величины сцепления (C) на устойчивость рассматриваемого склона в условиях сейсмического воздействия также несколько менее значимо. Вместе с тем «чувствительность» склона (с точки зрения потери устойчивости) к изменчивости интенсивности сейсмического воздействия выше, чем к варьированию значений плотности грунтов (ρ).

Заключение

Проведение количественных оценок геологического риска, осуществляемых во все больших объемах в практике инженерно-геологических исследований, требует анализа и оценки вероятности (как одной из ключевых характеристик при риск-анализе) развития опасных геологических процессов, в том числе оползневых. Вместе с тем широко применяемые в настоящее время консервативные (детерминистические) подходы к получению оценок устойчивости склонов не дают возможности определить фактический уровень опасности, поскольку не позволяют установить взаимосвязь между получаемыми $K_{уст}$ и вероятностью развития оползневой процессу, иными словами, выявить условия, при которых $K_{уст}$ становится меньше 1,00. Получаемые с применением традиционных подходов величины $K_{уст}$ характеризуются одномоментностью, одновременностью, отражая состояние склона только на тот момент, когда он характеризуется принятыми в качестве исходных параметров показателями, представленными в осредненном виде и фактически не отражающими реальное распределение свойств грунтов в массиве и их изменчивость.

Одним из направлений решения проблемы оценки вероятности развития оползневых процессов в рамках количественной оценки устойчивости склонов является применение вероятностного анализа, сущность которого заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон. Применение данного подхода к количественной оценке устойчивости склонов позволяет провести более обоснованную, более приближенную к реальности характеристику опасности активизации оползневых процессов. При этом важным дополнением вероятностного подхода к количественной оценке устойчивости склонов является выполнение анализа чувствительности. Последний заключается в рассмотрении значимости различных факторов в «чувствительности» склона к потере устойчивости. Особую роль анализ чувствительности при количественной оценке устойчивости склонов играет в условиях, когда склоновый массив слагается разнородными грунтами, характеризующимися существенной изменчивостью свойств, что позволяет оценить вклад каждого из рассматриваемых параметров в изменение устойчивости склона. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 16–21.
2. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во МГУ, 2006. 256 с.
3. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 230 с.
4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2003. 93 с.
5. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. М.: ФАУ «ФЦС», 2014. 126 с.
6. Сысоев Ю.А., Фоменко И.К. Вероятностный анализ оползневой опасности: сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса, 2011. С. 93–98.
7. Фоменко И.К., Захаров Р.Г., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона) // Геориск. 2009. № 4. С. 50–55.
8. Фоменко И.К., Пендин В.В., Ионов В.Ю., Хунг З.М. Прогноз оползневой опасности на основе анализа чувствительности коэффициента устойчивости к величинам порового давления и сейсмического воздействия // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 2013. № 6. С. 67–72.

9. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
10. Cao J., Zhan C., Wang G. Sensitivity Analysis of High Soil Slope Stabilizing Factors // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005. Vol. 24. № 2. P. 5350–5354.
11. El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M. Probabilistic Slope Stability Analysis for Practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. № 3. P. 665–683.
12. Kou X., Zhou W., Yang R. Stability Analysis on the High Slopes of Three Gorges Shiplock Using FLAC-3D // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2001. Vol. 19. № 5. P. 630–633.
13. Krahn J. Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. Calgary, GEO-SLOPE International Ltd., 2007. 355 p.
14. Morgenstern N.R., Price V.E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces // Geotechnique. 1965. Vol. 15. № 1. P. 79–93.
15. Xu J., Shang Y. Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Debris Landslide // Rock and Soil Mechanics. 2007. Vol. 28. № 10. P. 2049–2051.

Summary

Probabilistic analysis is one of most important means for qualitative assessment of geological hazard. As a case study, stability analysis of a landslide in Sochi was performed with several approaches. The landslide is located in the middle part of northern slope of Aibga Ridge and left bank of Mzymta-river valley in Sochi area. Different methods of stability analysis were used to make a compare. First approach to assess slope stability is limit equilibrium method (Morgenstern-Price method), which is recommended to apply by Russian construction guidelines and codes. The method is deterministic, because in the calculating process, there is assumption that soil strength parameters do not change and can be calculated as a mean value of a parameter like guidelines and codes specify. The results obtained by standard approach show that in static state factor of safety (FOS) of the slope is above but very close to 1.00, while in seismic state the slope fails. Based on standard approach considering unchanged mean values of soil physical and strength parameters the additional results can't be acquired.

Second approach to assess slope stability is probabilistic method. Instead of assumption that parameters remain unchanged, probabilistic approach quantify and incorporate uncertainty into slope analysis, which more rationally meets

natural reality. As the variability of studied factors is normally distributed, the probability density function of the factor of safety is normally distributed based on Monte Carlo simulation. The results of probabilistic method provide minimum, mean, maximum values and standard deviation of FOS. The corresponding probability for factor of safety smaller than 1.00 represents the probability of failure. The probability of failure of the studied slope is computed to be 20% in static state, while, the probability of failure — 11% in dynamic state.

In the last step, a sensitivity analysis of the studied slope was performed to analyze which parameter of the slope stability is more sensitive to. As a result, the factor of safety is most sensitive to the internal friction angle of the slope, which makes FOS more variable.

After accomplishment of analyses above, some conclusions can be made. Firstly, conventional (deterministic) approach based on the factor of safety cannot explicitly address uncertainty. Because conventional analysis does not allow to perform the relationship of FOS to probability of slope failure. Secondly, probabilistic approach are more rational means to assess slope stability, because the probability density function of the factor of safety is depended on the probability density function of physical and strength parameters of soil. 

CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. Topographical map of the studied landslide

Fig. 2. Schematic geological cross-section of the landslide: 1 — artificial soil (tQ_{IV}); 2 — gravelly soil filled with loam (cdQ_{IV}); 3 — porphyrite (J_2pr)

Fig. 3. Shape and position of critical slip surface (deterministic approach without consideration of probabilistic method): a — without seismic effect (FOS = 1,07); b — with seismic effect (FOS = 0,972)

Fig. 4. Normal distribution function of considered factors: a — unit weight; b — cohesion; c — friction angle; d — seismic force

Fig. 5. Probability density function of FOS without consideration of seismic effect (mean FOS = 1,019, standard deviation $\sigma = 0,023198$)

Fig. 6. Probability density function of FOS with consideration of seismic effect (mean FOS = 0,972, standard deviation $\sigma = 0,022434$)

Fig. 7. The sensitivity plot without consideration of seismic effect (showing the degree of which FOS is sensitive to — $\varphi > C > \rho$)

Fig. 8. The sensitivity plot with consideration of seismic effect (showing the degree of which FOS is sensitive to — $\varphi > C > K_c > \rho$)

CAPTIONS TO TABLES

Table 1. Physical and mechanical properties of soils/rocks, used in assessment

Table 2. Earthquake intensity factors (according to [2])

Table 3. Results of the slope stability analysis (traditional approach)

Table 4. Variability of the parameters of physical and mechanical properties of soils EGE-2

Table 5. Results of the probabilistic slope stability analysis, based on the probabilistic function of distribution of the parameters, used for the slope stability assessment

REFERENCES

1. *Zerkal O.V., Fomenko I.K.* Vliyanie razlichnykh faktorov na rezultaty veroyatnogo analiza aktivizatsii opolznevykh protsessov [Influence of Various Factors on the Results of Probabilistic Analysis of Landslide Activization] // *Enginernaya geologiya* [Engineering Geology], 2016. № 1. S. 16–21. (Rus.).
2. *Kalinin E.V.* *Enginerno-geologicheskyye raschety i modelirovanie* [Engineering-geological calculations and modeling]. M.: MGU [MSU], 2006. 256 s. (Rus.).
3. *Pendin V.V., Fomenko I.K.* *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti* [The Methodology of Evaluation and Prediction of Landslide Hazard]. M.: LENAND, 2015. 230 s. (Rus.).
4. SP 11-105-97. *Inzhenerno-geologicheskyye izyskaniya dlya stroitel'stva. Chast' II. Pravila proizvodstva rabot v rajonah razvitiya opasnykh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh protsessov* [Engineering Geological Site Investigations for Construction. Part II. Rules of Work in Regions Where Hazardous Geological and Engineering-Geological Processes Occur]. M.: Gosstroy Rossii [Rosstroy] 2003. 93 s. (Rus.).
5. SP 14.13330.2014 *Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP II-7-81* [Construction in seismic areas]. M.: Gosstroy Rossii [Rosstroy], 2014. 126 s. (Rus.).
6. *Sysoev Ja.A., Fomenko I.K.* *Veroyatnostnyy analiz opolznevoy opasnosti* [Probabilistic Analysis of Landslide Hazard]: sbornik nauchnikh trudov mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnie issledovaniya i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puty razvitiya» [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Scientific Researches and its Practical Application. Modern Situation and Developmental Pathway». Odessa, 2011. S. 93–98. (Rus.).
7. *Fomenko I.K., Zakharov R.G., Samarkin-Dyarsky K.G., Sirotkina O.N.* *Uchet seismicheskogo vozdeystviya pri raschete ustoychivosti sklonov (na primere Krasnopolyanskogo geodinamicheskogo polygona)* [Impact of the Seismicity in the Assessment of Slope Stability (A Case Study of the Krasnopolyanskiy Geodynamic Polygon)] // *Georisk*. 2009. № 4. S. 50–55. (Rus.).
8. *Fomenko I.K., Pendin V.V., Ionov V.Yu., Khung M.* *Prognoz opolznevoy opasnosti na osnove analiza chuvstvitelnosti koeffitsienta ustoychivosti k velichinam porovogo davleniya i seismicheskogo vozdeystviya* [Forecast of the landslide hazard on the base of sensitivity slope stability analysis to the pore pressure and seismic effect] // *Izvestiya VUZov. Seriya Geologiya i razvedka* [Proceedings of the Universities. Series Geology and Exploration]. 2013. № 6. S. 67–72. (Rus.).
9. *Khuan Ja.Kh.* *Ustoychivost zemlyanogo polotna* [The Stability of the Subgrade]. M.: Stroyizdat, 1988. 240 s.
10. *Cao J., Zhan C., Wang G.* *Sensitivity Analysis of High Soil Slope Stabilizing Factors* // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2005. Vol. 24. № 2. P. 5350–5354.
11. *El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M.* *Probabilistic Slope Stability Analysis for Practice* // *Canadian Geotechnical Journal*. 2002. Vol. 39. № 3. P. 665–683.
12. *Kou X., Zhou W., Yang R.* *Stability Analysis on the High Slopes of Three Gorges Shiplock Using FLAC-3D* // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2001. Vol. 19. № 5. P. 630–633.
13. *Krahn J.* *Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology*. Calgary, GEO-SLOPE International Ltd., 2007. 355 p.
14. *Morgenstern N.R., Price V.E.* *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces* // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. № 1. P. 79–93.
15. *Xu J., Shang Y.* *Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Debris Landslide* // *Rock and Soil Mechanics*. 2007. Vol. 28. № 10. P. 2049–2051.





Саморегулируемая организация
**Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве»**

В АИИС входят около 1600 организаций из 83 регионов России, а также компании из Белоруссии и Украины. Среди организаций — участниц АИИС — ведущие отраслевые вузы и университеты, выпускающие специалистов профильных специальностей, крупные российские компании.

АИИС принимает в свои члены юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, выполняющих инженерные изыскания, в том числе на особо опасных, технически сложных и уникальных объектах.

КРУПНЕЙШАЯ ИЗЫСКАТЕЛЬСКАЯ СРО В РОССИИ

Документы на вступление в ассоциацию принимаются в исполнительной дирекции в Москве и в филиалах в следующих городах

Санкт-Петербург, Измайловский проспект, дом 4 (комнаты 222, 414).

Тел.: +7 (812) 575-37-85, 316-61-18. E-mail: spb@oaiis.ru.

Ростов-на-Дону, ул. Текучева, дом 234, этаж 5, оф. 504.

Тел.: +7 (863) 201-27-57. E-mail: rostov@oaiis.ru.

Краснодар, ул. Котовского, дом 42.

Тел.: +7 (861) 216-82-33; факс: +7 (861) 277-31-69. E-mail: krasnodar@oaiis.ru.

Самара, ул. Галактионовская, дом 157, оф. 610.

Тел.: +7 (846) 205-76-03. E-mail: samara@oaiis.ru.

Уфа, ул. Лесотехникума, д.16/1, каб. 20.

Тел.: +7 (347) 241-53-44. E-mail: ufa@oaiis.ru.

Пермь, ул. Куйбышева, дом 52.

Тел.: +7 (342) 239-33-73, 239-31-12. E-mail: perm@oaiis.ru.

Тюмень, ул. Луначарского, дом 28.

Тел.: +7 (3452) 42-23-90. E-mail: tumen@oaiis.ru.

Томск, ул. Пушкина, дом 40/1.

Тел.: +7 (3822) 66-05-49. E-mail: tomsk@oaiis.ru.

Владивосток, ул. Пограничная, дом 15а.

Тел.: +7 (423) 261-32-24, 265-34-84. E-mail: dv@oaiis.ru.

Воронеж, ул. Солнечная, дом 31а, оф. 401.

Тел.: +7 (473) 269-57-28. E-mail: voronezh@oaiis.ru.

107076, г. Москва, ул. Электрозаводская, дом 60.

Тел./факс: +7 (495) 228-08-68.

E-mail: mail@oaiis.ru. **Web:** www.oaiis.ru, www.аиис.рф

