

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE RESULTS OF PROBABILISTIC ANALYSIS OF LANDSLIDE ACTIVIZATION

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., igzov@mail.ru

ФОМЕНКО И.К.

Главный специалист по геотехнике ООО «Научно-производственный центр по инженерным изысканиям», д.т.н., профессор, г. Москва, ifolga@gmail.com

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 of the Geology Faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow, igzov@mail

FOMENKO I.K.

Chief specialist in geotechnical engineering of the «Research and Production Center for Engineering Surveys» LLC, DSc (doctor of science in Technics), professor, Moscow, ifolga@gmail.com

Ключевые слова:

оползни; оценка устойчивости; вероятностный анализ; коэффициент устойчивости.

Key words:

landslides; stability assessment; probabilistic analysis; stability factor.

Аннотация

Рассмотрены ограничения существующих подходов к количественной оценке устойчивости склонов и принципы вероятностного анализа активизации оползневых процессов. На примере расчетов устойчивости модельного склона показана возможность получения вероятностных оценок развития оползневых деформаций, что в дальнейшем может быть использовано при анализе геологического риска. Рассмотрено влияние выбора метода расчета (Ямбу, Бишопа, Morgenштерна — Прайса), качества инженерно-геологической информации и количества учитываемых факторов (в виде вероятностных функций распределения) на результаты вероятностного анализа устойчивости склона.

Введение

В настоящее время в условиях все большего вовлечения в хозяйственное освоение территорий, характеризующихся развитием опасных геологических процессов, особое внимание при инженерно-геологических работах уделяется безопасности планируемой деятельности.

Одним из направлений работ для обеспечения безопасности зданий и сооружений является оценка геологических рисков, важными составляющими которой являются получение, рассмотрение и представление (в первую очередь в количественном виде) информации о геологических опасностях, в том числе об оползневых процессах. Такого рода информация, очевидно, носит прогнозный характер. Значимой характеристикой здесь выступает оценка вероятности реализации прогнозного сценария изменения инженерно-геологической ситуации.

Также следует отметить, что оценка вероятности развития опасных геологических процессов (в том числе оползневых) является одной из ключевых при количественной оценке геологического риска.

Использование данного подхода при оценке рисков, создающихся в результате развития оползневых процессов, бесспорно, весьма перспективно. Однако незначительный к настоящему времени опыт его применения вызывает необходимость рассмотрения различных аспектов вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов. Данная проблема приобретает особую актуальность в той связи, что в отечественной практике расчетов устойчивости склонов отсутствуют какие-либо методики и рекомендации в этом отношении.

В настоящей статье будут рассмотрены примеры влияния различных факторов (методов расчета, качества используемой инженерно-геологической информации, количества учитываемых факторов) на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов.

Abstract

Restrictions of the existing approaches to quantitative assessment of slope stability and principles of probabilistic analysis of landslide activation are considered. The possibility of obtaining probabilistic estimates of slope deformation development is shown by the example of stability calculations of a model slope. Further it can be used for analysis of the geological risk. Influence of choice of calculation methods (Janbu's, Bishop's, Morgenstern — Price's ones), quality of available engineering-geological information and number of considered factors (as distribution functions) on the results of probabilistic analysis of slope stability is considered.

Ограничения существующих подходов к количественной оценке устойчивости склонов и принципы вероятностного анализа активизации оползневых процессов

В настоящее время при количественной оценке устойчивости склонов общепринятым является определение коэффициента устойчивости $K_{уст}$ (или коэффициента запаса), рассматриваемого в качестве показателя возможности развития оползневых деформаций.

Следует подчеркнуть, что в основе традиционных методов количественной оценки устойчивости склонов лежит постулат о неизменяемости во времени показателей, характеризующих слагающие их грунты. Несомненно, это является существенным ограничивающим фактором при прогнозировании возможного развития оползневых процессов во времени. Особенностью получаемого значения $K_{уст}$ является то, что оно отражает состояние склонового массива только на момент его обладания заданными показателями, принятыми в качестве исходных параметров¹. Однако очевидно, что как в природных, так и в техногенно измененных условиях состояние грунтов, слагающих склоновый массив, является весьма изменчивым. Их физические и прочностные характеристики могут меняться во времени под действием различных факторов, например в результате обводнения склона.

Другим следствием принятия постулата о неизменности характеристик склонового массива при количественной оценке его устойчивости традиционными методами является «локальность» получаемых результатов. Учет пространственной изменчивости показателей, характеризующих грунты, в настоящее время осуществляется путем проведения дополнительных расчетов по серии профилей, разнесенных по склону. При этом количество таких профилей на участках возведения ответственных сооружений может достигать нескольких десятков, что требует значительных затрат.

¹ В настоящее время действующими нормативными документами в качестве исходных показателей рекомендуется принимать усредненные статистически обеспеченные физико-механические характеристики грунтов [2, 7].

Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность активизации оползневых процессов. Сущность такого анализа заключается в получении вероятностной функции распределения значений $K_{уст}$ в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон, а также от иных факторов, влияющих на развитие оползневых процессов.

Исходные данные для расчетов

В качестве модельного склона, для которого проводилась количественная оценка устойчивости, была выбрана площадка на правом берегу р. Москвы — на третьей надпойменной террасе, имеющей вид уступа высотой 14–20 м с достаточно крутым склоном в сторону русловой части долины. Верхняя часть геологического разреза в пределах этой террасы представлена техногенными и делювиальными образованиями, подстилаемыми верхне- и среднелепесточными аллювиально-флювиогляциальными песчаными и супесчаными отложениями, разделенными маломощным горизонтом моренных суглинков. Подстилаются четвертичные отложения, имеющие общую мощность до 18–20 м, кимеридж-титонскими алевролитами мощностью до 7 м, перекрывающими глины оксфордского яруса. В пределах низких поверхностей под делювиальными отложениями на размытой поверхности верхнеюрских образований залегают аллювиальные отложения, представленные песками с прослоями суглинков. Геомеханическая расчетная схема модельного склона показана на рис. 1.

Влияние выбора метода расчета устойчивости склона на оценку вероятности активизации оползневых процессов

К настоящему времени разработано достаточно много групп методов количественной оценки устойчивости склонов [4, 9]:

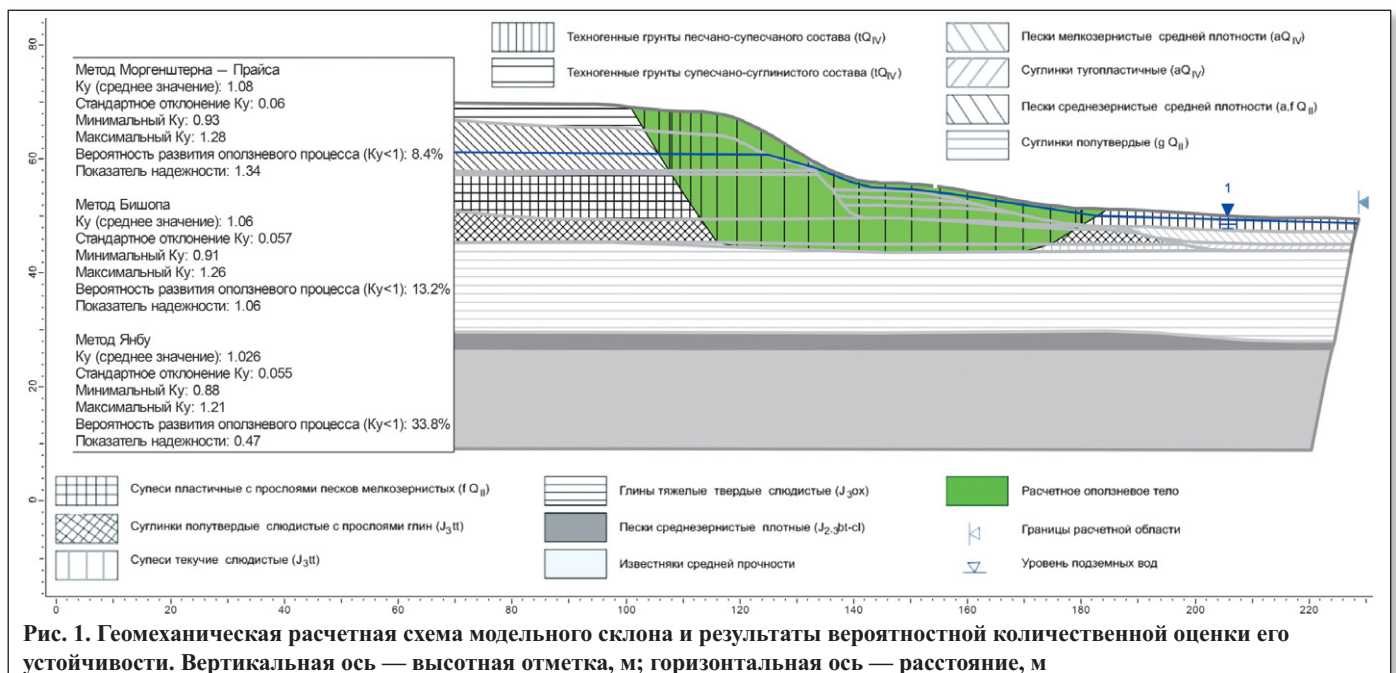


Рис. 1. Геомеханическая расчетная схема модельного склона и результаты вероятностной количественной оценки его устойчивости. Вертикальная ось — высотная отметка, м; горизонтальная ось — расстояние, м

- интуитивные (аналоговые, графические);
- основанные на анализе предельного равновесия (сил, моментов и др.);
- основанные на анализе предельного состояния (анализе напряженно-деформированного состояния или предельных деформаций);
- базирующиеся на иных методах анализа (комбинированных и гибридных, структурного анализа и др.).

В качестве основной задачи количественной оценки устойчивости склонов независимо от применяемого метода оценки рассматривается определение положения в массиве поверхности с минимальными значениями коэффициента устойчивости, которая является либо потенциальной поверхностью разрушения, либо сформировавшейся плоскостью скольжения. При этом считается, что количественная оценка устойчивости может или носить приближенный характер, или проводиться «точными методами» [10]. Авторы настоящей статьи сознательно взяли последний термин в кавычки, так как очевидно, что действительно точный и полный учет всего многообразия инженерно-геологических особенностей даже отдельно взятого участка склона практически недостижим. По-видимому, по отношению к соответствующим методам количественной оценки устойчивости склонов более правильным будет использование терминов «математически обоснованные» или «математически строгие».

Для анализа влияния математической обоснованности, физико-математической строгости используемого метода на результаты количественной оценки устойчивости склона были выбраны три расчетных метода:

- метод Ямбу (или его близкий аналог — метод горизонтальных сил Маслова — Берера), основанный на равновесии сил;
- метод Бишопа (или его близкий аналог — метод Терцаги), основанный на равновесии моментов;
- метод Моргенштерна — Прайса (или его близкие аналоги — метод Спенсера, метод обобщенного предельного равновесия), основанный на равновесии сил и моментов.

Очевидно, что метод Моргенштерна — Прайса является наиболее строгим из выбранных. Также следует отметить, что методы Бишопа и Моргенштерна — Прайса рассматриваются действующими нормативными документами в качестве общепринятых [5].

Все перечисленные методы при традиционном применении являются детерминированными, поскольку предполагается, что прочностные характеристики грунтов известны и могут быть заданы в виде усредненных расчетных показателей.

Традиционным подходом для определения исходных расчетных данных является усреднение полученных значений (не менее 6–10) показателей физико-механических свойств грунтов. Именно этот подход в настоящее время закреплен в действующих нормативных документах, в том числе в актуализированных [5, 7].

В настоящей работе особенностью количественных оценок устойчивости склонов является не использование усредненных характеристик грунтов, а более полный учет результатов статистической обработки (на основе функций распределения) всей выборки данных о прочностных характеристиках, в том числе минимальных и максимальных значений и среднеквадратичного отклонения.

Такой подход обеспечивает более полное использование информации об изменчивости физико-механических свойств грунтов, полученной при их полевом и лабораторном изучении, для оценки их влияния на устойчивость склонового массива.

В результате использования предложенного подхода была получена вероятностная количественная оценка устойчивости склона, в том числе в отличие от детерминированных оценок были дополнительно охарактеризованы минимальные, средние и максимальные значения коэффициента устойчивости склона и стандартные отклонения в его расчетной выборке.

Основная идея количественной вероятностной оценки устойчивости склонов заключается в учете фактически наблюдаемой изменчивости факторов (их количественных показателей), учитываемых при расчете. В современной практике практически для каждого фактора оползнеобразования (прочностных характеристик грунтов, положения уровня подземных вод, величины сейсмического воздействия и др.) можно задать вероятностное распределение. На этой основе возможен (с использованием метода Монте-Карло) расчет вероятностного распределения коэффициента устойчивости склона, меняющегося в зависимости от учитываемых факторов.

После этого, в свою очередь, можно определить другие количественные параметры. Например, дополнительной возможностью при использовании предложенного подхода является оценка вероятности развития оползневого процесса (то есть вероятности потери устойчивости склона, что при количественной оценке характеризуется величинами $K_{уст} < 1$), дополняемая показателем ее надежности (β). При этом значение β рассматривается как мера нормализации коэффициента устойчивости склона $K_{уст}$ по отношению к среднеквадратичному отклонению σ_k этого коэффициента и может быть рассчитано по формуле [11]:

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

В данном случае под показателем надежности понимается свойство склона сохранять устойчивое состояние.

В целом, вероятностный подход к оценке устойчивости склонов подразумевает, что в условиях существующей изменчивости факторов оползнеобразования опасность развития оползневого процесса на склоне с более высоким $K_{уст}$ не обязательно будет меньше таковой на склоне с меньшим значением этого коэффициента. Например, склон с $K_{уст} = 1,5$ при стандартном отклонении $\sigma_k = 0,5$ имеет более высокую вероятность активизации оползневых деформаций, чем склон с $K_{уст} = 1,2$ при $\sigma_k = 0,1$.

Теоретическая зависимость между вероятностью развития оползневого процесса и показателем надежности ее определения для нормально распределенного коэффициента устойчивости склона показана на рис. 2. Видно, что более низким вероятностям развития склоновых деформаций соответствуют более высокие показатели надежности, и наоборот.

Сводные результаты вероятностной количественной оценки устойчивости модельного склона приведены в табл. 1. Интегральные функции распределения значений $K_{уст}$, полученные различными методами, показаны на рис. 3. Следует отметить, что в табл. 1 представлены ре-

зультаты количественной оценки устойчивости склона без учета качества исходной инженерно-геологической информации, влияние которой будет рассмотрено ниже.

Как видно из табл. 1, при количественной оценке устойчивости склона различными методами были получены близкие средние значения $K_{уст}$, различающиеся во втором десятичном знаке.

При традиционном подходе к анализу устойчивости полученные величины $K_{уст}$ стали бы основой для вывода о том, что склон в целом устойчив, но находится в состоянии, близком к предельному равновесию. При этом сделать какие-либо дополнительные выводы без дополнительных расчетов было бы невозможно.

Сравнение же вероятностей развития склоновых деформаций позволяет оценить влияние выбора метода расчета на их значения (см. табл. 1). Для рассматриваемого участка они различаются при использовании разных методов более чем в 4 раза. Наиболее высокую вероятность (33,8%) дал метод Янбу. При этом средние значения коэффициента устойчивости и показатель надежности оказались наименьшими из полученных тремя рассматриваемыми методами. Метод Моргенштерна — Прайса дал самую маленькую вероятность развития оползневых процессов (8,4%). При этом средние значения $K_{уст}$ и показатель надежности были наибольшими.

Таким образом, можно уверенно утверждать, что выбор метода расчета существенно влияет на полученное значение вероятности развития склоновых деформаций и, как следствие, на оценки оползневой опасности и соответствующего геологического риска.

Влияние качества инженерно-геологической информации на результаты вероятностного анализа устойчивости склонов

При выполнении настоящей работы оценка качества исходной инженерно-геологической информации проводилась через коэффициент вариации прочностных характеристик грунтов, рассматриваемый как показатель точности среднего значения того или иного параметра. В качестве граничного критерия в соответствии с требованиями ГОСТ 20522-2012 принималась величина этого коэффициента, равная 0,3 [2].

Очевидно, что исходная инженерно-геологическая информация будет более качественной при отбраковке необоснованно высоких или низких значений прочностных параметров грунтов, что повлияет на разброс показателей и их среднеквадратичные отклонения, учитываемые при вероятностной оценке устойчивости склонов.

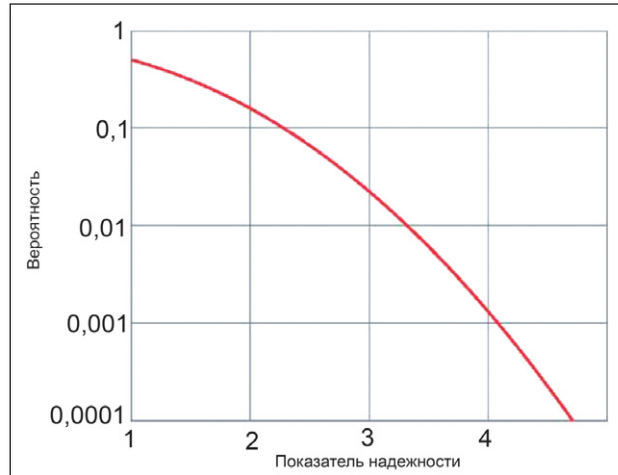


Рис. 2. Взаимосвязь между показателем надежности (безразм.) и вероятностью развития оползневого процесса (д. ед.) для нормально распределенного коэффициента устойчивости склона

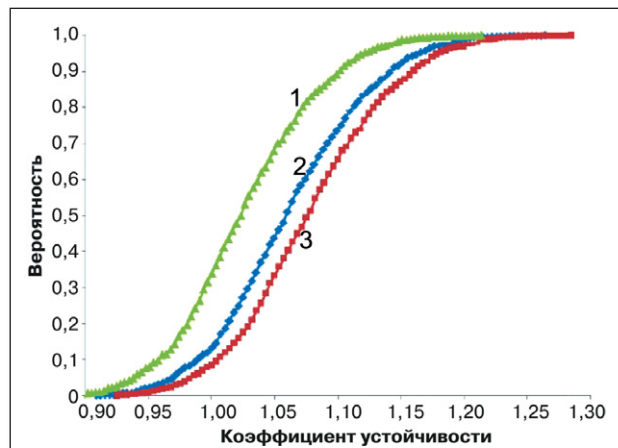


Рис. 3. Интегральные функции распределения значений коэффициента устойчивости склона, полученные методами Янбу (1), Бишопа (2) и Моргенштерна — Прайса (3) для оценок, приведенных в табл. 1

В таблице 1 были приведены результаты количественной вероятностной оценки устойчивости модельного склона, полученные без строгого соблюдения требований к качеству исходной инженерно-геологической информации. В таблице 2 показаны итоги оценки, выполненной с помощью тех же расчетных методов, но с четким соблюдением критериев качества исходных данных.

Сравнительный анализ этих таблиц показывает значение качества исходной инженерно-геологической

Таблица 1

Результаты количественной вероятностной оценки устойчивости склона, полученные различными методами без учета влияния качества исходной инженерно-геологической информации				
Показатель		Метод		
		Моргенштерна — Прайса	Бишопа	Янбу
Коэффициент устойчивости склона $K_{уст}$, безразм.	сред.	1,08	1,06	1,03
	мин.	0,93	0,91	0,88
	макс.	1,28	1,26	1,21
Стандартное отклонение $K_{уст}$, безразм.		0,06	0,06	0,06
Вероятность развития оползневого процесса (при $K_{уст} < 1$), %		8,4	13,2	33,8
Показатель надежности, безразм.		1,34	1,06	0,47

Таблица 2

Результаты количественной вероятностной оценки устойчивости склона, полученные различными методами с учетом влияния качества исходной инженерно-геологической информации				
Показатель		Метод		
		Моргенштерна — Прайса	Бишопа	Янбу
Коэффициент устойчивости склона $K_{уст}$, безразм.	сред.	1,06	1,05	1,01
	мин.	0,95	0,94	0,90
	макс.	1,16	1,15	1,11
Стандартное отклонение $K_{уст}$, безразм.		0,03	0,03	0,03
Вероятность развития оползневой деформации (при $K_{уст} < 1$), %		2,0	6,1	37,5
Показатель надежности, безразм.		2,02	1,46	0,34

информации при вероятностном анализе устойчивости склонов. Количественная оценка, выполненная при разном качестве входных данных, дала средние значения $K_{уст}$, различающиеся во втором знаке после запятой (1,08 и 1,06 для метода Моргенштерна — Прайса; 1,06 и 1,05 для метода Бишопа; 1,03 и 1,01 для метода Янбу, см. табл. 1, 2).

При традиционном подходе к анализу устойчивости склона результаты, полученные при строгом соблюдении критериев качества исходных данных, не привели бы к существенному пересмотру ранее полученного при таком же подходе вывода о том, что склон в целом устойчив, но находится в состоянии, близком к предельному равновесию.

Вероятностный же анализ развития склоновых деформаций дал снижение разброса полученных величин коэффициента устойчивости (уменьшение отклонений минимальных и максимальных значений от средней величины $K_{уст}$ отмечается для результатов всех использованных расчетных методов). Одновременно можно отметить, что повышение качества исходных расчетных показателей оказало существенное влияние на оценку возможности активизации оползневых деформаций (см. табл. 1 и 2). Максимальная разница между вероятностями развития оползневых процессов на рассматриваемом участке, полученными разными методами, увеличилась примерно с 4 до 19 раз, подчеркивая влияние выбора метода расчета на результаты оценки устойчивости.

При учете качества исходной информации наиболее высокую вероятность развития оползневых деформаций (увеличившуюся с 33,8 до 37,5%) дал метод Янбу, но при этом среднее значение $K_{уст}$ и показатель надежности получились наименьшими. Метод Моргенштерна — Прайса дал наименьшую вероятность активизации оползневых процессов (снизившуюся с 8,4 до 2,0%), но при этом среднее значение $K_{уст}$ и показатель надежности оказались наибольшими (показатель надежности увеличился в 1,5 раза).

Таким образом, существенное влияние качества исходной инженерно-геологической информации на результаты оценки вероятности развития склоновых деформаций можно считать подтвержденным.

Следует подчеркнуть, что при вероятностном анализе используются *нормативные*, а не расчетные характеристики грунтов. Это объясняется тем, что получение расчетных показателей основано на статистической обработке, но она выполняется перед оценкой устойчивости (иными словами, сначала — статистическая обработка показателей свойств грунтов, а потом — расчет устойчивости с использованием только расчет-

ных показателей). Вероятностный анализ предполагает более полный учет результатов статистической обработки (не только нормативных значений, но и вероятностных функций распределения частных значений характеристик грунтов) в процессе моделирования устойчивости склона. Влияние методов получения показателей, оценка точности их получения относятся к отдельной теме исследований (в первую очередь в грунтоведении), рассмотрение которой далеко выходит за рамки настоящей статьи.

Влияние количества учитываемых показателей на оценку вероятности развития склоновых деформаций

В рамках выбранных для анализа методов количественной оценки устойчивости склонов (Моргенштерна — Прайса, Бишопа, Янбу) прочностные свойства грунтов характеризуются удельным сцеплением и углом внутреннего трения. Результаты вероятностного анализа развития склоновых деформаций с использованием вероятностных функций распределения этих параметров были показаны в табл. 2.

Для оценки влияния количества факторов, учитываемых при вероятностном анализе устойчивости склонов, были выполнены дополнительные расчеты, при которых вероятностная функция распределения использовалась только для одного показателя — угла внутреннего трения, в то время как сцепление характеризовалось статистически осредненными значениями в соответствии с существующими требованиями. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Сопоставление табл. 2 и 3 подтверждает влияние количества учитываемых факторов на результаты вероятностного анализа устойчивости склона. При разном количестве показателей, рассматриваемых с учетом вероятностных функций их распределения, были получены либо близкие значения $K_{уст}$, различающиеся во втором десятичном знаке, либо равные (1,06 и 1,07 для метода Моргенштерна — Прайса; 1,05 и 1,04 для метода Бишопа; 1,01 и 1,01 для метода Янбу). При этом при игнорировании вероятностной функции распределения сцепления получаются более высокие минимальные значения $K_{уст}$ и, как следствие, метод Моргенштерна — Прайса дает нулевую вероятность потери устойчивости склона, что не соответствует реально существующим инженерно-геологическим условиям на территории г. Москвы, где оползневые деформации в уступе третьей надпойменной террасы достаточно широко распространены [1]. Более низкие вероятности

Показатель		Метод		
		Моргенштерна — Прайса	Бишопа	Янбу
Коэффициент устойчивости склона $K_{уст}$, безразм.	сред.	1,07	1,04	1,01
	мин.	1,01	0,99	0,96
	макс.	1,14	1,12	1,08
Стандартное отклонение $K_{уст}$, безразм.		0,02	0,02	0,02
Вероятность развития оползневой процесса (при $K_{уст} < 1$), %		0,0	0,2	29,7
Показатель надежности, безразм.		2,90	2,35	0,60

развития оползней при игнорировании сцепления были получены и другими методами.

Таким образом, можно сделать вывод о негативном влиянии снижения количества учитываемых факторов (в виде вероятностных функций распределения показателей свойств грунтов) на результаты вероятностного анализа устойчивости склонов.

Очевидно, что при традиционном подходе к анализу устойчивости склона не была бы получена такая дополнительная информация.

Заключение

При определении геологического риска одной из ключевых является оценка вероятности развития опасных геологических процессов, в том числе оползневых.

Существующие традиционные подходы к количественной оценке устойчивости склонов ориентированы в первую очередь на определение положения в массиве поверхности с минимальными значениями коэффициента устойчивости, которая является либо потенциальной поверхностью разрушения, либо сформировавшейся плоскостью скольжения. Получаемые при этом значения коэффициента устойчивости (или коэффициента запаса) отражают состояние склонового массива только на момент его обладания показателями, принятыми в качестве исходных.


Применение вероятностного анализа, сущность которого заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона

в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик слагающих его грунтов, позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность активизации оползневых процессов.

На результаты вероятностного анализа развития склоновых деформаций оказывают влияние: выбор используемого метода расчета устойчивости склона; качество исходной инженерно-геологической информации; количество учитываемых факторов (в виде вероятностных функций распределения).

Как показало выполненное исследование, наиболее корректные и обоснованные результаты вероятностного анализа устойчивости склонов могут быть получены:

- при использовании наиболее математически строгих методов расчета, например метода Моргенштерна — Прайса (или его аналогов), основанного на учете предельного равновесия сил и моментов;
- при четком соблюдении критериев качества исходных данных, принимаемых для расчетов;
- при использовании вероятностных функций распределения для максимального количества учитываемых показателей свойств грунтов.

Результаты вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов представляются реалистичными и могут быть использованы при последующей оценке оползневой опасности и соответствующего геологического риска. 

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-05-00577 «Методология оценки и прогноза оползневой опасности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и город / под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. М.: АО «Московские учебники и картолитография», 1997. 400 с.
2. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: МНТКС, 2012.
3. *Зеркаль О.В., Фоменко И.К.* Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.
4. *Пендин В.В., Фоменко И.К.* Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 230 с.
5. 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, 2000.
6. СП 36.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой России, 2012.
7. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2012.
8. *Фоменко И.К.* Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2001. URL: <http://earthpapers.net/matematiceskoe-modelirovanie-napryazhennogo-sostoyaniya-inzhenerno-geologicheskogo-massiva-slozhennogo-anizotropnymi-gor>.
9. *Фоменко И.К.* Общая классификационная схема методов расчета устойчивости склонов // Сборник научных трудов SWorld. Том 35. № 3. Материалы Международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития — 2012». Одесса: Изд-во Купrienko, 2012. С. 75–81.
10. *Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г.* Основы прикладной механики в строительстве. М.: Высшая школа, 1981. 320 с.
11. *Krahn J.* Stability modeling with SLOPE/W // Engineering Methodology. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.