

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 624.131.4

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СВОЙСТВ ГРУНТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ**

Ф.К. БУФЕЕВ¹, И.К. ФОМЕНКО²

*¹Российский государственный геологоразведочный университет,
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая д.23; e-mail: fbufeev@hotmail.com*

*²ООО Научно-производственный центр по инженерным изысканиям,
129085, Россия, г. Москва, Звездный бульвар д.3А, стр.1; e-mail: ifolga@gmail.com*

Сравниваются расчёты устойчивости склонов при использовании различных методов расчётов и моделей распределения свойств грунтов. Рассмотрены четыре модели распределения свойств грунтов в оползневом массиве: российский, когда в пределах расчётных геологических элементов задаются расчетные характеристики свойств; зарубежный, когда в пределах расчётных геологических элементов задаются нормативные характеристики свойств; новые подходы — значения свойств грунтов задаются дискретно в пределах расчётных геологических элементов; значения свойств грунтов задаются в массиве дискретно. Анализ оценки устойчивости склона с учётом использования различных моделей распределения свойств грунтов показал, что различные модели оказывают влияние и на положение расчётной поверхности скольжения, и на величину коэффициента устойчивости.

Ключевые слова: модели распределения свойств грунтов; методы расчета устойчивости склонов; количественная оценка устойчивости склонов.

**INFLUENCE OF CALCULATION METHODS AND MODEL DISTRIBUTION
OF SOIL PROPERTIES ON THE RESULTS OF QUANTITATIVE EVALUATION
OF SLOPE STABILITY**

F.K. BUFEEV¹, I.K. FOMENKO²

*¹Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RSGPU)
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklaya street, 23, e-mail: fbufeev@hotmail.com*

*²Research and production center on engineering survey.
129085, Russia, Moscow, Zvezdnyy boulevard, 3A, b.1; e-mail: ifolga@gmail.com*

The article gives the comparison of the slope stability calculation results using different types of soil properties distribution in the slope massive. Four models of soil properties distribution in the landslide hazardous slopes are considered: the way used in domestic engineering geological practice — soil properties parameter values are set within outlined geological items; the abroad practice way — soil properties normative values are set within selected lithological types; proposed to consider the new approaches — the values of soil properties are set discretely within the outlined geological items; values of the properties of soils are specified discretely in a massif. The analysis of the slope stability general assessment using different principles of soil properties distribution shows that they have influence on the sliding surface position and the coefficient of slope stability value. Therefore the slope stability problem correct solution must be performed with the substantiation of soil properties distribution model in the slope massive.

Key words: models of soil properties distribution; quantitative assessment of slope stability; methods of slope stability calculations.

Одним из главных этапов при количественной оценке устойчивости склонов является схематизация математической модели, цель которой максимальное упрощение при минимальной потере адекватности. Обоснование схематизации является одной из важнейших задач при выполнении расчётов устойчивости склонов.

Результаты количественной оценки устойчивости склонов зависят от исходной инженерно-геологической информации, выбора модели распределения свойств грунтов в массиве и используемых методов расчёта устойчивости. Качество информации, получаемой в результате инженерно-геологических изысканий, зависит от применяемых методов изучения свойств геологической среды, которые в свою очередь определяются в процессе составления программы работ, с учётом технического задания, на основании требований нормативной документации. По результатам изысканий составляются инженерно-геологические разрезы, которые служат основой для построения геотехнических моделей. При этом объективным является выделение границ между различными литолого-генетическими комплексами и данные по определению свойств грунтов (полевые и лабораторные). В процессе построения геомеханической модели и выполнения на её основе количественной оценки устойчивости склонов возрастает влияние фактора субъективности.

Авторами рассмотрены примеры, которые вносят определённую долю субъективизма в результаты количественной оценки устойчивости склонов:

- 1) влияние выбора модели распределения свойств грунтов на результаты расчета;
- 2) влияние методов расчёта на величину коэффициента устойчивости и масштабы проявления оползневой процесса.

Рассмотрим четыре принципиально отличающихся подхода к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве:

1. Принятый в российской практике подход — в пределах выделенных расчётных геологических элементов (РГЭ) задаются расчётные характеристики свойств грунтов.

2. Принятый за рубежом метод — в пределах выделенных РГЭ задаются нормативные характеристики свойств грунтов.

Предлагаемые к рассмотрению способы:

3. В пределах выделенных РГЭ дискретно задаются значения свойств грунтов;

4. В пределах всего массива без учёта литологических границ дискретно задаются значения свойств грунтов.

Консервативные, детерминистические методы расчётов устойчивости склонов, применяемые в российской практике, учитывают изменчивость свойств грунтов лишь опосредованно — через ис-

пользование в математических моделях расчётных (в статистической терминологии) значений по выделенным инженерно-геологическим элементам (ИГЭ). Полученные на основании подобных расчётов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень опасности, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними и вероятностью развития оползневой процесса. Также стоит отметить, что данный подход не позволяет решить основную задачу при выполнении оценки устойчивости склонов: нахождение критической поверхности скольжения (ПС) с минимальным коэффициентом устойчивости (K_y). Это связано с тем, что закладываемые в расчёт формально уменьшенные прочностные характеристики грунтов предопределяют не только заниженные значения K_y но совсем другую «расчётную» ПС. Очевидно, что для однородных склонов уменьшение величины сцепления грунтов будет приводить к уменьшению глубины ПС, что в свою очередь, скорее всего, приведёт к ошибкам при проектировании.

Рядом описанных выше недостатков лишён второй способ, при котором в пределах выделенных РГЭ задаются нормативные характеристики свойств грунтов. Основным преимуществом данного подхода является возможность использования вероятностного анализа при оценке устойчивости склонов, который приобретает актуальность в мировой практике и все больше применяется с ростом понимания дискретности (случайности) имеющихся в распоряжении рядов значений физико-механических характеристик грунтов, полученных в ходе инженерно-изыскательских работ [1]. Сущность такого анализа заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, составляющих склон, или иных факторов, влияющих на оползневой процесс. Однако и данный подход к составлению модели не лишен недостатков.

Поле распределения прочностных свойств грунтов в массиве позволяет избежать некоторых недостатков. В его основе лежит следующая идея: по известным, фактически замеренным величинам свойств грунтов строится поле распределения свойств в массиве (рис. 1, 2.). Важным преимуществом данного способа является возможность использования различных методов интерполяции свойств грунтов внутри массива. Однако по этой причине существенно повышается сложность выполнения анализа по оценке устойчивости, так как возникает необходимость в выборе и обосновании метода интерполяции свойств грунтов. Недостатком случайного распределения свойств грунтов по массиву в целом является то, что данный подход не позволяет учитывать геологическое строение.

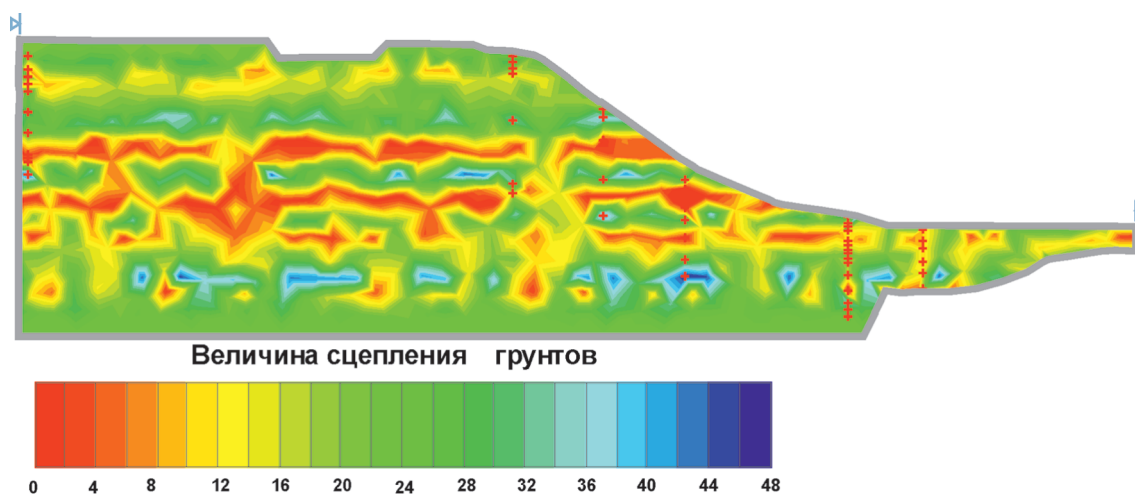


Рис. 1. Пример поля распределения величины сцепления грунтов в склоновом массиве

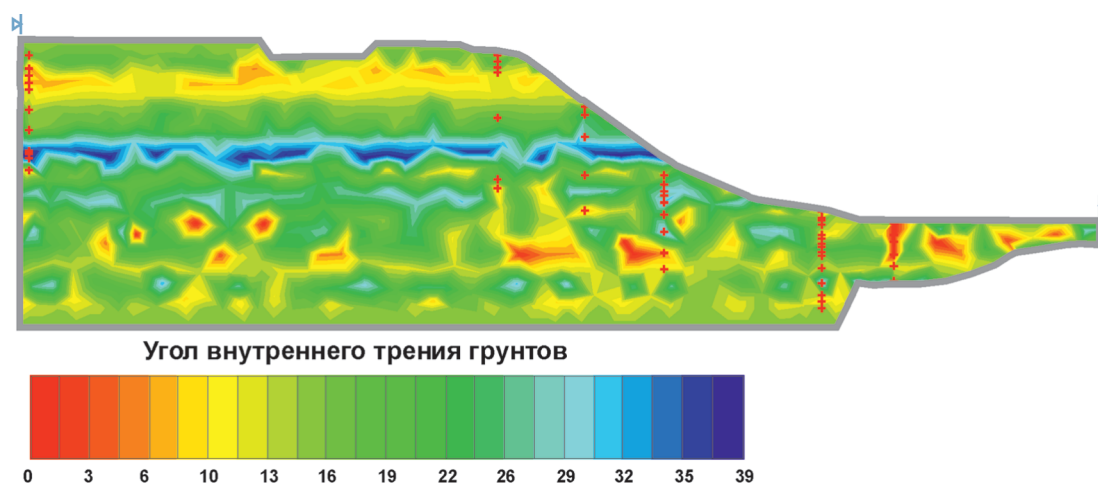


Рис. 2. Пример поля распределения величины угла внутреннего трения грунтов в склоновом массиве

В настоящее время существует большое число методов расчётов устойчивости склонов. Каждый из них обладает определёнными преимуществами и недостатками. При расчётах авторами данной статьи были применены упрощённые методы Бишопа [2] и Ямбу [1], а также метод Morgenstern-Price [2]. Методы Бишопа и Morgenstern-Price рекомендованы нормативными документами для расчётов устойчивости склонов [2], а метод Ямбу является наиболее близким к методу горизонтальных сил Маслова-Берера, также рекомендованного в СП 11-105-97, ч. II [2].

Упрощённый метод Бишопа [2] создан в середине XX в. в Англии. Его отличительной особенностью является общее удовлетворение равновесию моментов при неудовлетворении равновесию горизонтальных сил.

Упрощённый метод Ямбу [1] похож на метод Бишопа, но в отличие от него удовлетворяет пол-

ному равновесию горизонтальных сил и не удовлетворяет полному равновесию моментов.

Метод Morgenstern-Price [2], в отличие от перечисленных выше методов, полностью удовлетворяет равновесию сил и равновесию моментов.

Оценка зависимости результатов численного анализа опасности развития оползневых деформаций от выбранной модели распределения свойств грунтов проводилась на примере расчёта устойчивости склона, выполненного авторами в составе ООО «ИГИТ» в пределах сферы взаимодействия юго-восточного участка стен и башен XVIII в. Свято-Боголюбского женского монастыря (рис. 3). В сферу взаимодействия также попадали объекты культурного наследия ЮНЕСКО: Богородице-Рождественский собор, Лестничная башня и переходы палат Андрея Боголюбского. Работы проводились для разработки проекта противоаварийных мероприятий по сохранению объекта культурного

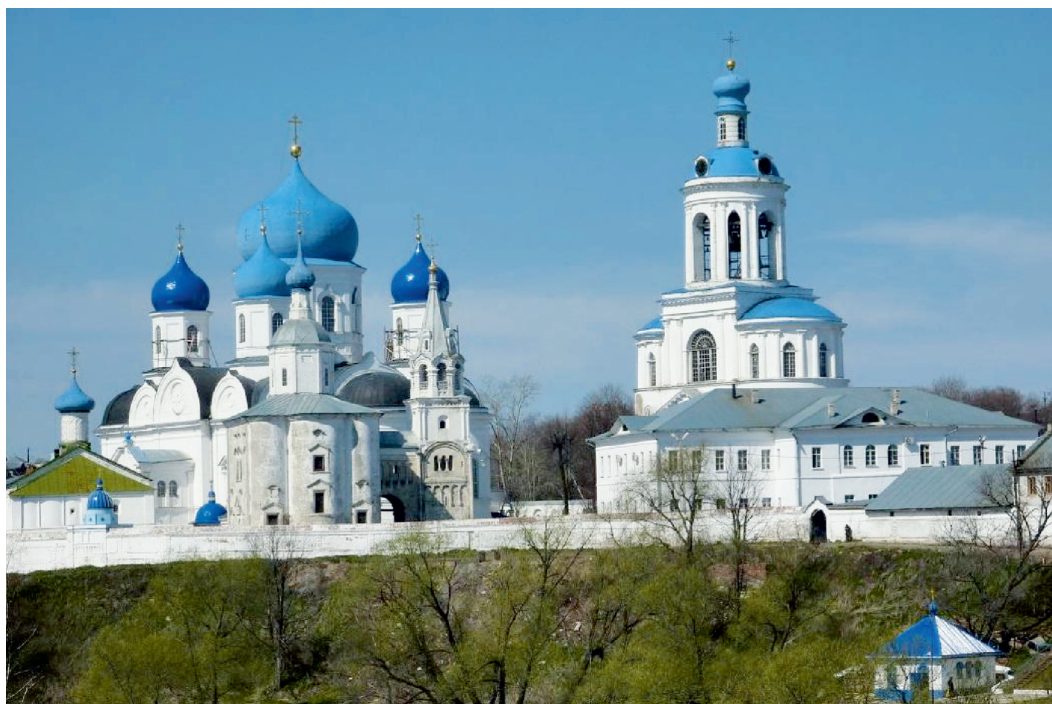


Рис. 3. Общий вид склона — объекта моделирования (фото с сайта fotokto.ru)

наследия — Свято-Боголюбского женского монастыря (Владимирская область, пос. Боголюбово).

В геолого-структурном отношении территория проведения изысканий относится к центральной части Московской синеклизы, где четвертичные отложения с разрывом залегают на пермских. В геологическом строении рассматриваемого склона (сверху вниз) принимают участие: современные техногенные накопления (tQ_{IV}), современные озёрно-болотные отложения (lhQ_{IV}), современные аллювиальные (пойменные) отложения (aQ_{IV}), нерасчленённые средневерхнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения первой надпойменной террасы р. Клязьма (a, fQ_{II-III}), нерасчленённые средневерхнечетвертичные флювиогляциальные и озёрно-ледниковые отложения (f, lgQ_{II-III}) и отложения северодвинского горизонта татарского яруса пермской системы (P_{2sd}). По результатам инженерно-геологических изысканий были выделены следующие ИГЭ: 1.1, 3, 9, 12 — суглинки мягкопластичные; 1.2, 10, 11 — суглинки тугопластичные; 1.3 — суглинки полутвёрдые; 4, 13 — суглинки текучепластичные; 2 — ил текучепластичный; 14, 14а — пески мелкие влажные и водонасыщенные; 17 — глина тугопластичная; 18 — глина твёрдая.

Известно, что 20 мая 1851 г. здесь во время крестного хода в результате оползня обрушился мост. Тогда погибло около 160 человек. В настоящее время активно развивается суффозионный процесс, который наиболее активно проявился семь лет назад, когда образовался провал, увеличи-

вающийся в размерах на протяжении последнего времени. Также периодически происходит сильное замутнение воды в каптированном роднике и в результате заиливание дна купели под этим родником. На поверхности склона присутствуют трещины, поверхность неровная, бугристая. В основании склона разгружаются подземные воды.

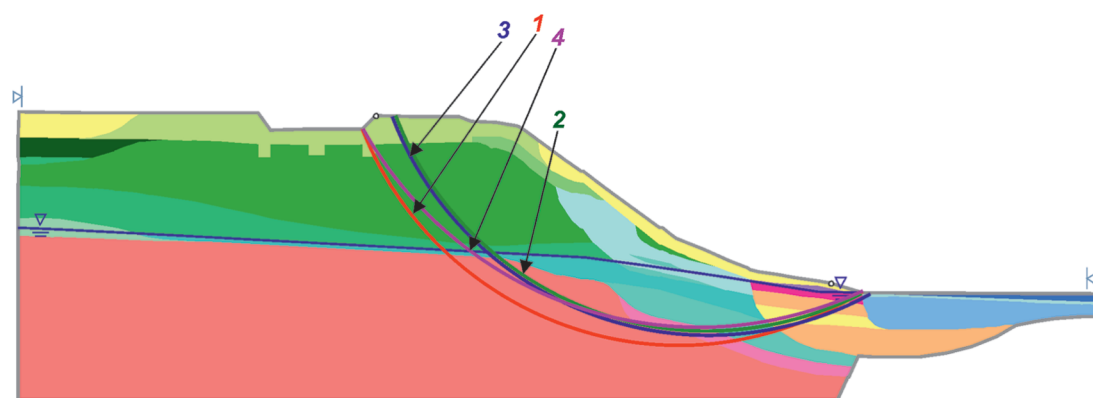
На этапе изысканий изучение свойств грунтов проводилось стандартными методами на образцах, отобранных в скважинах, пробуренных на склоне и за его пределами.

Для оценки зависимости результатов моделирования устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов и используемых методов была проведена серия стандартных расчетов. Моделирование проходило с использованием методов Бишопа [2], Ямбу [1] и Моргенштерна-Прайса [2] по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

В процессе работы были использованы следующие расчётные схемы:

- 1) в пределах выделенных РГЭ задавались расчётные характеристики свойств;
- 2) в пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств грунтов;
- 3) задавалось поле распределения свойств в пределах выделенных РГЭ;
- 4) задавалось поле распределения свойств в массиве в целом.

При составлении геомеханических моделей свойства грунтов задавались следующим образом: выше уровня грунтовых вод задавались значения проч-



РГЭ			
1.1	14	14	14
1.2	14a	14a	14a
1.3	17	17	17
2	18	18	18
3	9	9	9
4	10	10	10
12	11	11	11
13			

Рис. 4. Геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Бишопа; положение: 1 — поверхности скольжения при задании расчётных свойств грунтов по РГЭ; 2 — поверхности скольжения при задании нормативных свойств грунтов по РГЭ; 3 — поверхности скольжения при задании поля распределения свойств грунтов в массиве; 4 — поверхности скольжения при задании поля распределения свойств грунтов по РГЭ

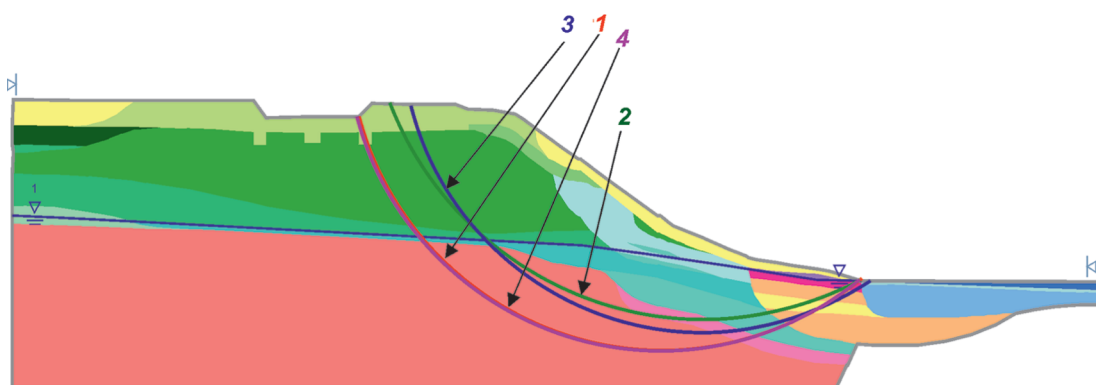


Рис. 5. Геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Янбу; усл. обознач. см. рис. 4

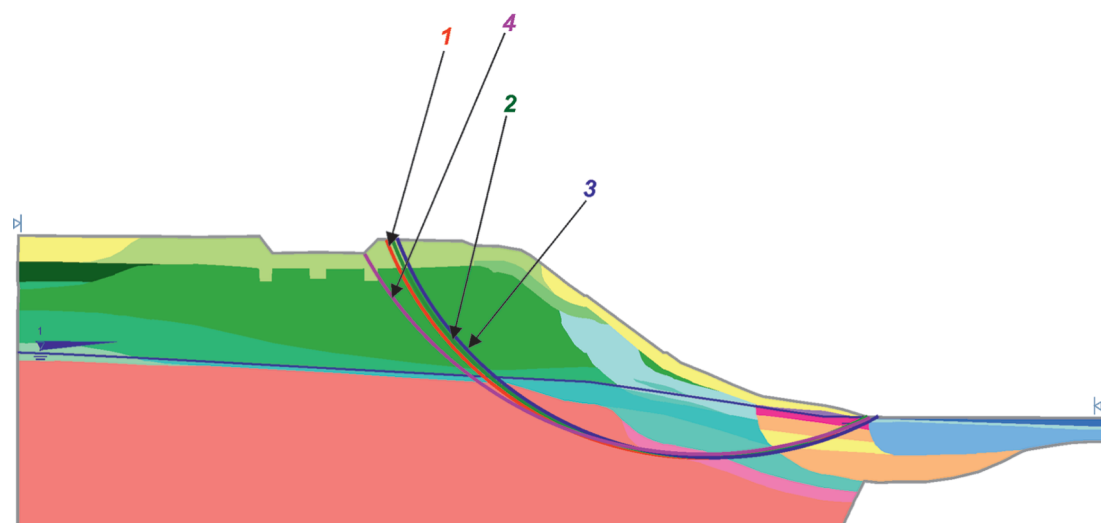


Рис. 6. Геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Morgenstern-Price; усл. обознач. см. рис. 4

Результаты количественной оценки устойчивости склона

Метод расчёта \ Расчётная схема	Расчётные значения свойств грунтов в пределах РГЭ	Нормативные значения свойств грунтов в пределах РГЭ	Поле распределения свойств в пределах РГЭ	Поле распределения свойств в массиве
Бишопа	1,00(414)*	1,15(315)	1,09(354)	1,19(330)
Ямбу	0,92(476)	1,07(321)	1,01(478)	1,08(338)
Моргенштерна-Прайса	1,03(335)	1,17(327)	1,11(360)	1,20(330)

Примечание. В скобках приведены значения эквивалентного объёма (единичного объёма смещаемой оползневой массы), м³; зелёным цветом выделены минимальные значения коэффициента устойчивости и эквивалентного объёма, жёлтым — максимальные.

ностных свойств, полученные в режиме сдвига «плашка по плашке» [2], а ниже уровня — в режиме «плашка по плашке по смоченной поверхности». Остальные условия расчёта устойчивости склона — влияние подземных вод и техногенные воздействия, принимались для всех вариантов расчёта неизменными.

Итоговые геомеханические схемы с результатами расчетов приведены на рис. 4–6. Обобщённые данные результатов расчётов отражены в таблице.

Выводы

1. При использовании первой расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались расчётные характеристики свойств) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,0, эквивалентный объём — 414 м³. По методу Ямбу коэффициент устойчивости склона — 0,92, эквивалентный объём — 476 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона — 1,03, эквивалентный объём — 335 м³.

Значения коэффициентов устойчивости, рассчитанные по методам Бишопа и Моргенштерна-Прайса, являются минимальными из всех результатов расчётов по каждому из методов. Значение коэффициента устойчивости, рассчитанное по методу Ямбу, является минимальным из всех результатов расчётов по всем методам, а эквивалентный объём, рассчитанный по методу Бишопа, максимальным из всех расчётов по данному методу.

2. При использовании второй расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,15, эквивалентный объём — 315 м³. По методу Ямбу коэффициент устойчивости — составил 1,07, эквивалентный объём — 321 м³. По методу Морген-

штерна-Прайса коэффициент устойчивости склона — 1,17 м³, эквивалентный объём — 327 м³.

Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по всем методам, являются минимальными из всех расчётов по каждому из методов, кроме того, значение эквивалентного объёма, рассчитанное по методу Бишопа, минимально из всех значений по всем методам.

3. При применении третьей расчётной схемы (задавалось поле распределение свойств грунтов в пределах выделенных РГЭ) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,09, эквивалентный объём — 354 м³. По методу Ямбу коэффициент устойчивости склона — 1,01, эквивалентный объём — 478 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона — 1,11, эквивалентный объём — 360 м³.

Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Ямбу, является максимальной из всех расчётов по всем методам. Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Моргенштерна-Прайса, является максимальной из всех расчётов по данному методу.

4. По четвёртой расчётной схеме (задавалось поле распределение свойств в массиве) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,19, эквивалентный объём — 330 м³. По методу Ямбу коэффициент устойчивости склона — 1,08, эквивалентный объём — 338 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона — 1,20, эквивалентный объём — 330 м³.

Значения коэффициентов устойчивости, рассчитанные по всем методам, — максимальные из всех результатов расчётов по каждому из методов, кроме того, значение коэффициента устойчивости, рассчитанное по методу Моргенштерна-Прайса, максимальное из всех результатов расчётов по всем методам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пендин В.В., Фоменко И.К. «Методология оценки и прогноза оползневой опасности» М: ЛЕНАНД, 2015. 230 с.
2. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой России. М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000.
3. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1, Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004, 396 p.