

Фоменко И.К.¹, Зеркаль О.В.², Горобцов Д.Н.¹

¹Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ), гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии, г. Москва, ifolga@gmail.com, dngorobtsov@mail.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, г. Москва, igzov@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА В КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Введение

Методы математического моделирования при оценке оползневой опасности развиваются очень активно благодаря все возрастающим возможностям современной вычислительной техники. Наряду с традиционно применяемыми методами расчёта устойчивости склонов в последние годы появился ряд программных продуктов, позволяющих моделировать движение оползневых масс, в том числе при таких опасных явлениях, как каменные и обломочные лавины (rock and debris avalanches) и селевые потоки (debris flows). Такие программы, как DAN 3D [5–9], LS-RAPID [10, 11] и другие [1, 4, 12] позволяют оценивать площади территории с высокими рисками у подножия оползнеопасных склонов, скорости движущейся оползневой массы и силу ее воздействия на те или иные преграды, в том числе, на специально создаваемые защитные сооружения.

В связи с интенсивным развитием методов расчёта устойчивости склонов, многие ранее используемые критерии для их классификации в настоящий момент не могут быть применены ко всему множеству методов. По этой причине, возникла необходимость разработки новой классификации, авторский (с дополнениями) вариант которой представлен на рис. 1.

Наиболее перспективным направлением при расчётах устойчивости склонов является трёхмерное моделирование [2]. При этом следует отметить, что расширение анализа при расчёте устойчивости склонов в плоской постановке до объёмных решений не такая простая задача как просто добавление еще одного измерения. Например, при переходе от оценки в двухмерной постановке к трёхмерной в методах предельного равновесия, полностью меняется концепция описания формы поверхности скольжения. При плоской постановке задачи поверхность скольжения рассматривается как круглоцилиндрическая, в то время как при объёмной, трёхмерной постановке плоскость скольжения следует рассматривать как сферическую (эллипсоидальную). Моделирование устойчивости склонов в трёхмерном варианте бесспорно более правильно и перспективно в сравнении с двухмерными моделями, а преимущества, связанные с объёмным анализом, очевидны.

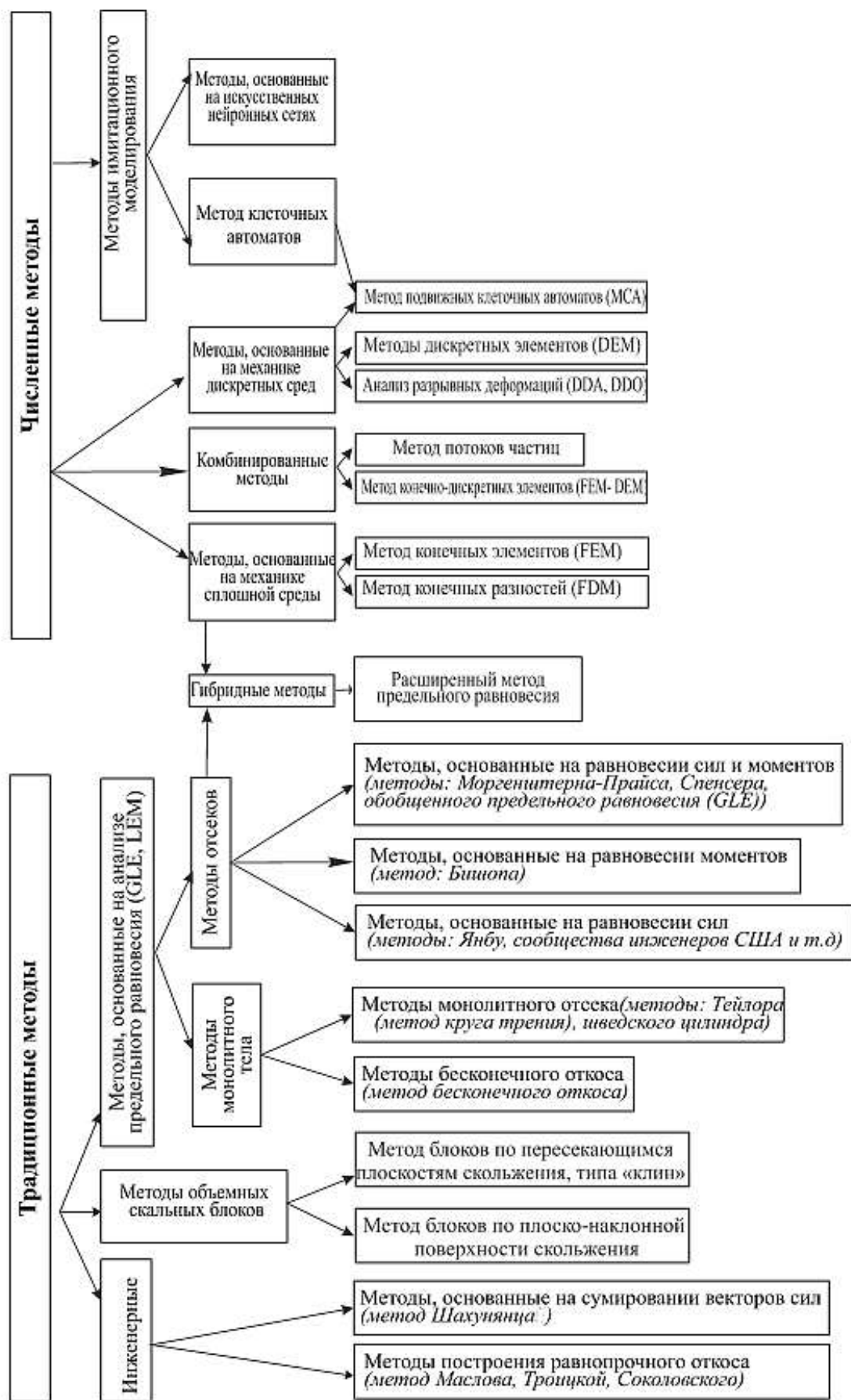


Рис. 1. Классификация методов расчета устойчивости склонов (приведено по [3] с дополнениями)

Целью настоящей работы являлось сравнение результатов моделирования в двух- и трёхмерной постановке выполненными методами предельного равновесия и методом конечных элементов (МКЭ). Основой для данной работы послужили результаты бета-тестирования программного продукта RS3 v.2 beta.

Описание тестового участка

Моделируемый склон располагается на Черноморском побережье Кавказа. Участок охватывает прибрежную часть третьей морской террасы плейстоценового возраста. Относительная высота уступа террасы составляет порядка 15 м. Склон террасы осложнен оползневыми телами (элемент 1), поверхность которых в настоящее время была искусственно уложена.

В верхней части геологического разреза залегают морские отложения четвертичного возраста, представленные песками мелкими с включениями гальки (элемент 4) и галечниками с песчаным (элемент 6) и глинистым (элемент 5) заполнителями. Перекрываются морские отложения верхнечетвертичными делювиальными суглинками (элемент 3). В основании склона, под четвертичными отложениями, залегают низкопрочные аргиллиты верхнепалеогенового возраста (элемент 7). Свойства грунтов, слагающих склон, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства грунтов тестового склона

Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Friction Angle (peak) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)
1		Field Stress and Body Force	20	Isotropic	5000	0.4	Mohr Coulomb	Plastic	13	7
3		Field Stress and Body Force	18.9	Isotropic	10000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	10	13
4		Field Stress and Body Force	17.5	Isotropic	20000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	34	6
5		Field Stress and Body Force	21.3	Isotropic	20000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	25	36
6		Field Stress and Body Force	21	Isotropic	20000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	35	19
7		Field Stress and Body Force	23.5	Isotropic	20000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	24	51

Анализ результатов количественной оценки устойчивости

С целью оценки возможностей 3D моделирования в программном комплексе RS3 v.2, авторам показалось интересным сравнить результаты 3D полученным методом конечных элементов в RS3 v.2 beta и методом предельных равновесий в SVSLOPE 3D. Дополнительно было выполнено сравнение 2D и 3D расчётов в программных комплексах Rocscience (Slide, RS2, RS3) и SVSLOPE.

Сравнение результатов, полученное методами предельного равновесия 2D и 3D (SVSLOPE). На рис. 2, 3 приведены модели тестового склона с результатами расчёта в 2D и 3D постановке, выполненные в SVSLOPE. Расчёт 2D, выполненный в SVSLOPE по методу Моргенштерн-Прайса, показал $K_{уст} = 1,09$, указывающий, что склон находится в условно устойчивом состоянии (требуются мероприятия по повышению его устойчивости до $K_{уст} > 1,20$).

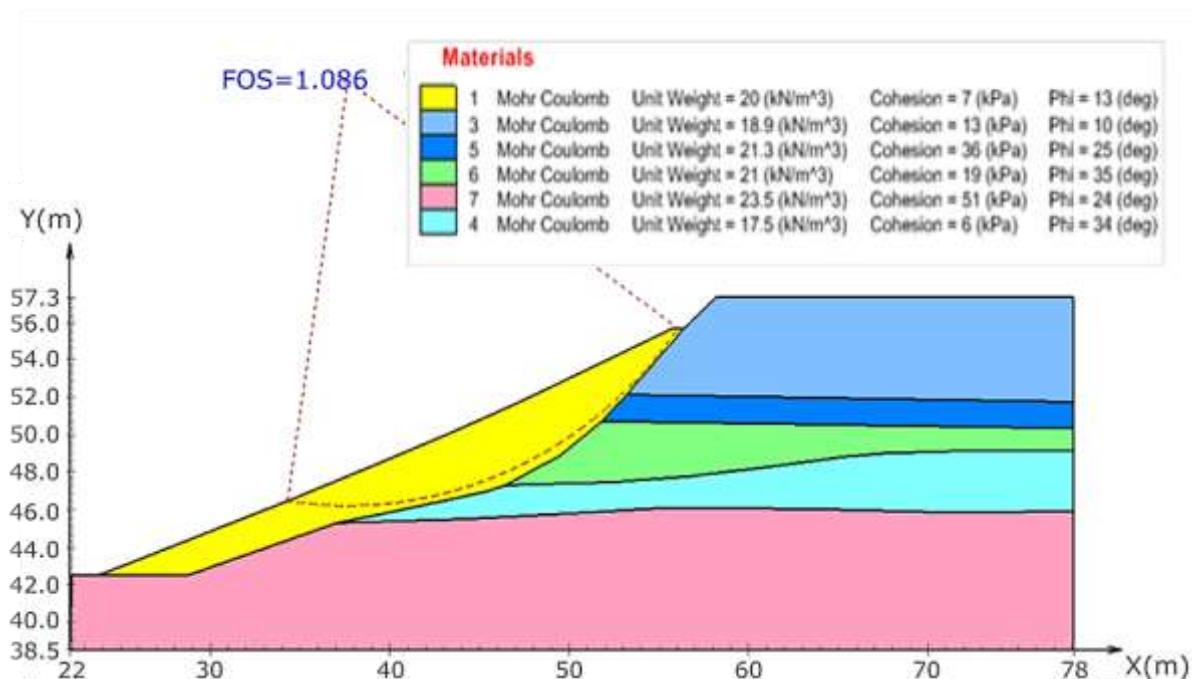


Рис. 2. SVSLOPE 2D расчёт по методу Моргенштерна-Прайса. Цветом показаны выделенные расчётные элементы (РГЭ)

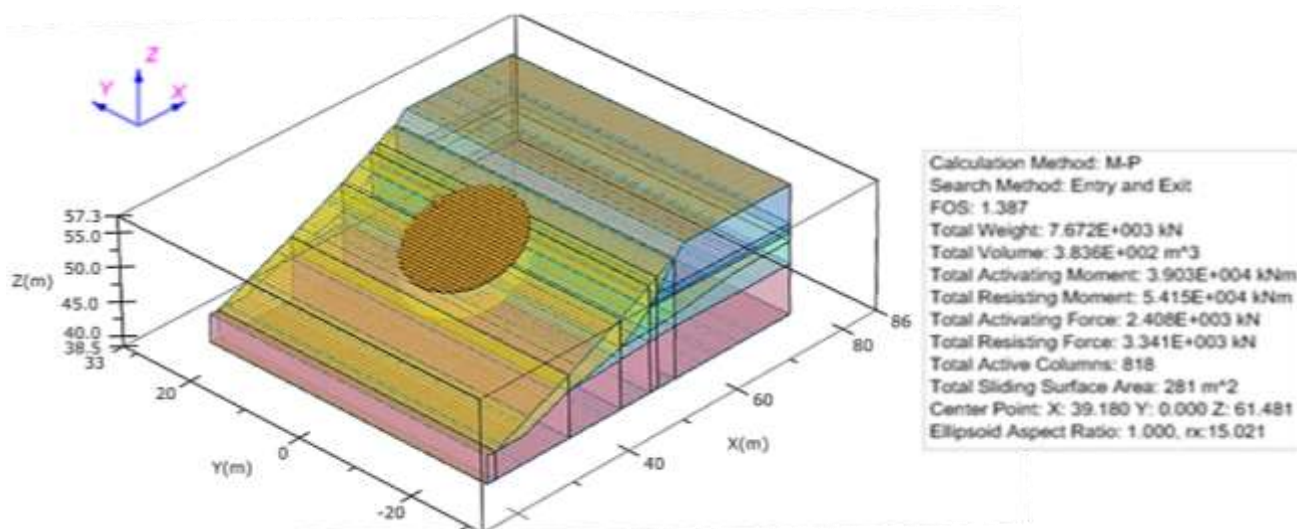


Рис. 3. SVSLOPE 3D расчёт по методу Моргенштерна-Прайса

Расчёт 3D, выполненный в SVSLOPE по методу Моргенштерн-Прайса, показал более высокий $K_{уст} = 1,387$ ($K = K_{уст3d}/K_{уст2d} = 1,277$). Разница составляет

27,7%, что существенно выше принимаемых средних величин, на которые должны различаться K_{ycm3d} и K_{ycm2d} , составляющие порядка 5%, согласно зависимости $K_{ycm}(3D) = 1,05 * K_{ycm}(2D)$ для простых склонов (по Skempton, 1985). Возможно, данный эффект связан с недостаточной детальностью модели при 3D моделировании. Также наблюдается различие в положении поверхностей скольжения в расчётном сечении, полученных в 2D и 3D расчётах (рис. 2, 3).

Сравнение результатов, полученное методами предельного равновесия 2D (SVSLOPE и Rocscience Slide). Расчёт 2D по методу Morgenштерн-Прайса был выполнен дополнительно к SVSLOPE в Rocscience Slide по круглоцилиндрической поверхности скольжения (рис. 4). Оба результата указывают, что склон находится в устойчивом состоянии после проведения мероприятий. Отношение $K = K_{ycmSVS} / K_{ycmRS} = 1,09 / 1,065 = 1,0197$, то есть порядка 2%.

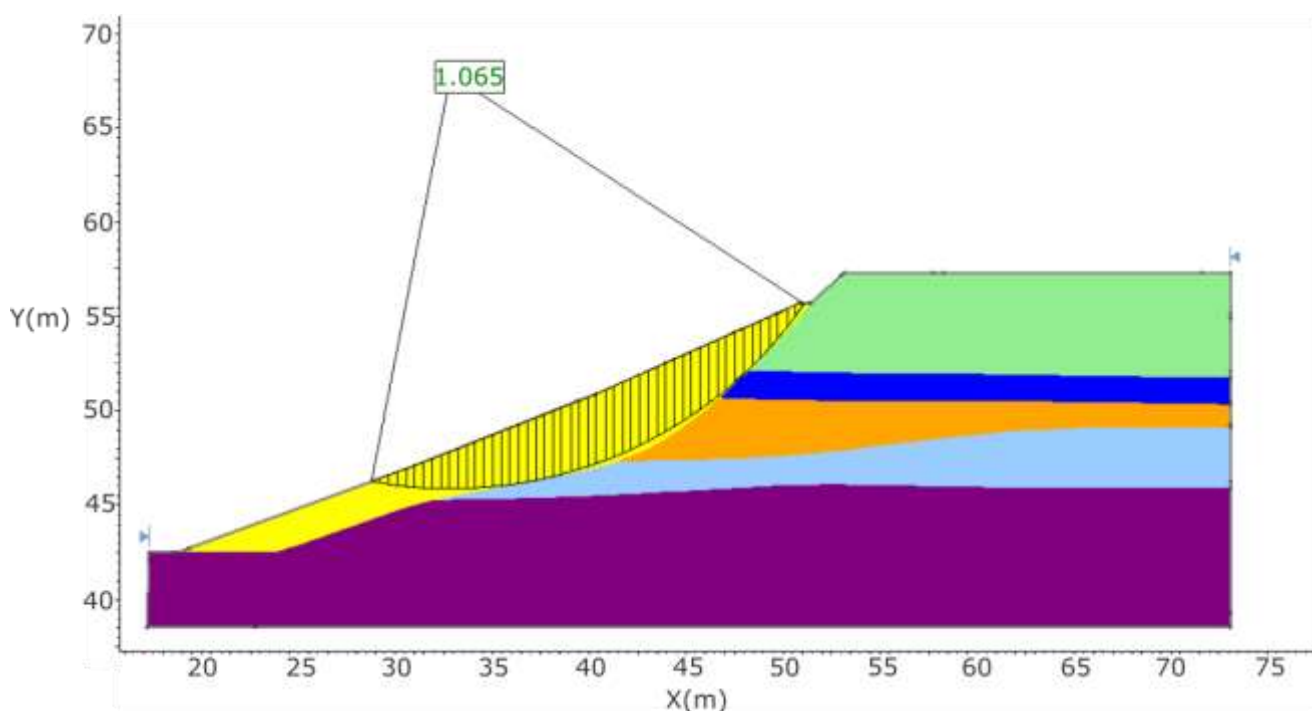


Рис.4. Rocscience Slide расчёт по методу Morgenштерн-Прайса (круглоцилиндрическая поверхность скольжения)

Сравнение результатов, полученных методом конечных элементов (МКЭ) 2D (Rocscience Slide и SVSolid). С целью сравнения результатов расчёта устойчивости модельного склона, полученных МКЭ в плоской постановке задачи, был выполнен расчёт в RS 2 и SVSolid (рис. 5, 6).

Расчёт, выполненный МКЭ в RS2, показал $K_{ycm} = 1,06$, что близко к $K_{ycm} = 1,065$, полученному по методу Morgenштерн-Прайса при расчёте по круглоцилиндрической поверхности (Rocscience Slide). В результате расчёта, выполненного в SVSolid, получено более высокое значение $K_{ycm} = 1,18$. Отношение $K = K_{ycmSVS} / K_{ycmRS} = 1,18 / 1,06 = 1,11$.

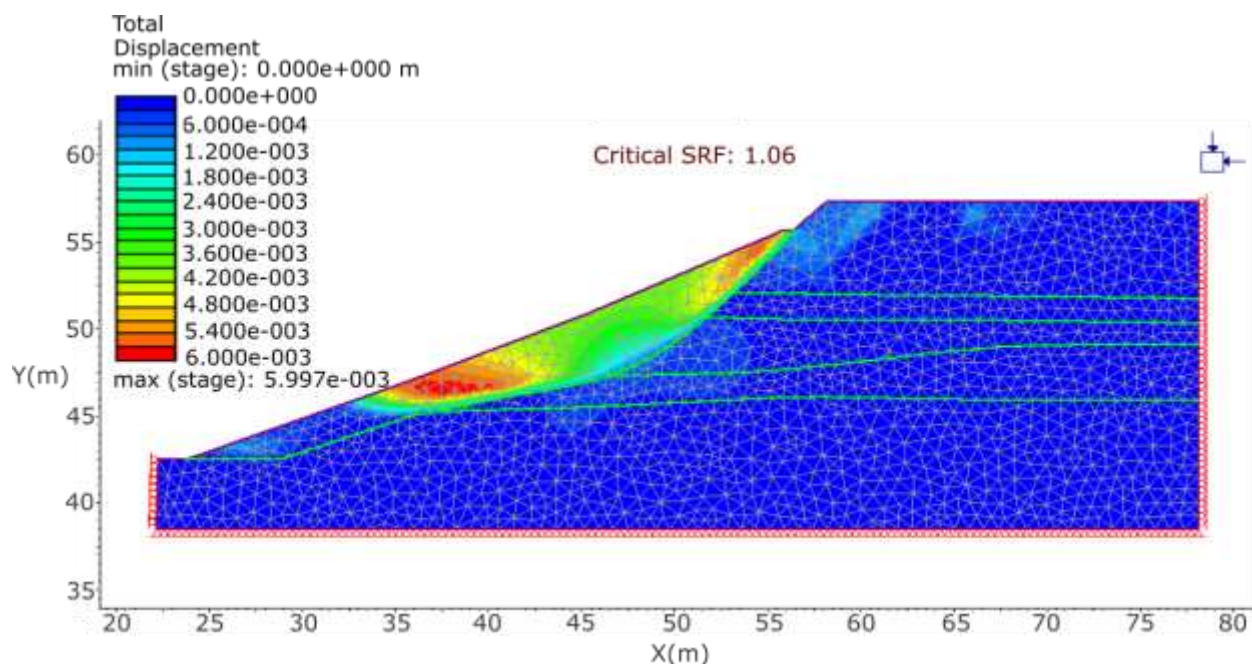


Рис. 5. RS2 расчёт устойчивости МКЭ, цветом показаны общие перемещения

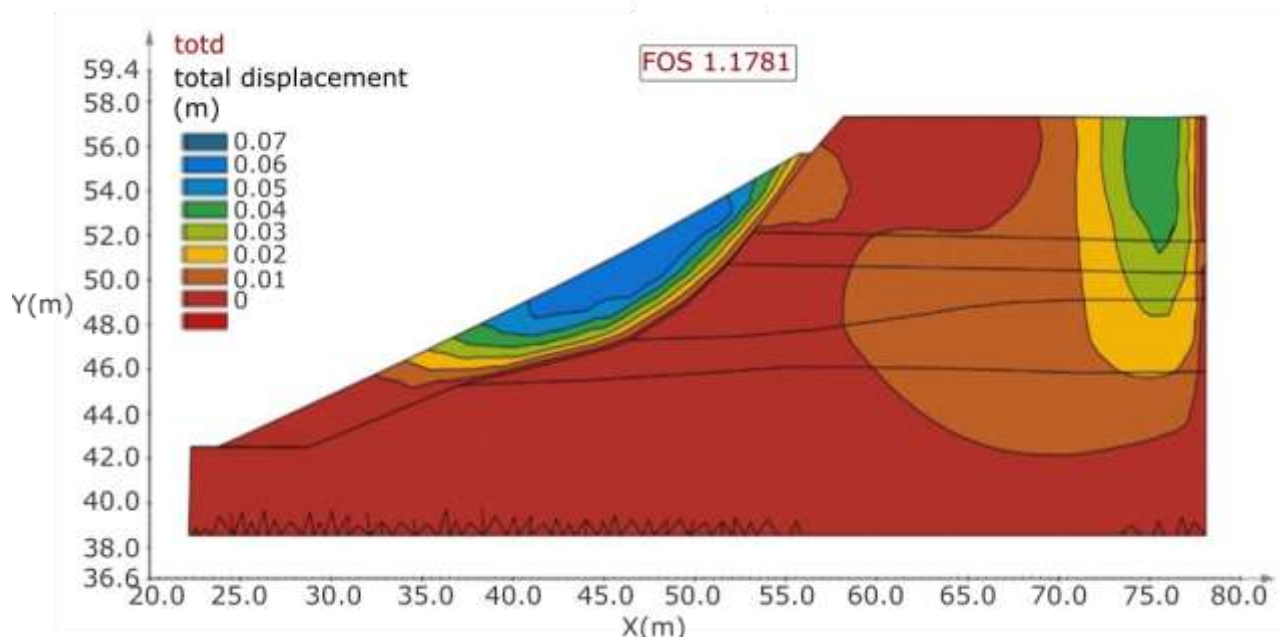


Рис.6. SVSolid расчёт устойчивости МКЭ, цветом показаны общие перемещения

Сравнение результатов, полученных методом конечных элементов (МКЭ) 2D и 3D. Результат моделирования устойчивости склона 3D методом конечных элементов приведен на рис. 7.

Расчёт 3D, выполненный МКЭ, показал $K_{ycm} = 1,13$. Отношение результатов RS3 к RS2 $K = K_{ycm3d}/K_{ycm2d} = 1,066$, то есть меньше 7%. Отношение результатов RS3 к SVSolid $K = K_{ycm3d}/K_{ycm2d} = 0,96$, то есть меньше 5%, однако, следует отметить, что K_y , полученный в результате трёхмерного расчёта, оказался ниже, чем K_y , полученный при плоской постановке задачи.

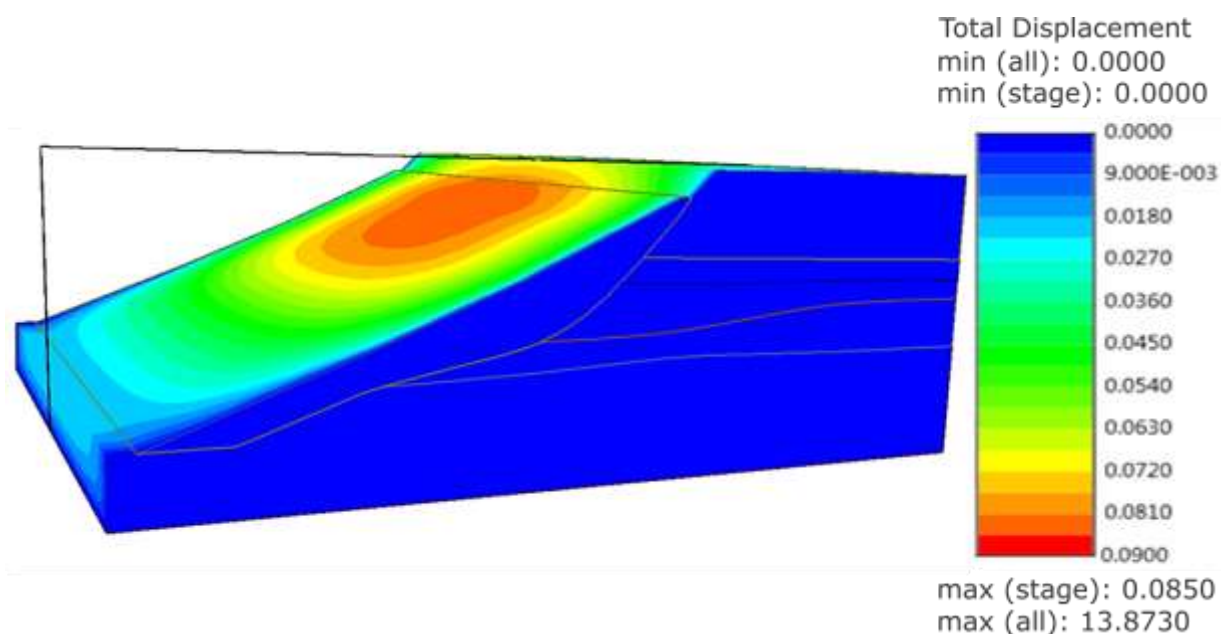


Рис. 7. Модель оценки устойчивости тестового склона (SSR) (в общих деформациях), полученная в RS3 v.2.beta

Сравнение результатов 3D RS3 v.2 и SVSLOPE 3D. Сравнение 3D расчётов RS3 v.2 beta и SVSLOPE 3D дало отношение $K = K_{устGLE} / K_{устFEM} = 1,22$. Выполненный комплекс расчётов позволяет сделать вывод о более корректном результате, полученным в RS3 v.2.

Итоговые результаты выполненных расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов устойчивости склона, выполненные в двумерной и трёхмерной постановках задачи

Методы предельного равновесия	2D	Slide (Rocscience)	1,065
		SVSlope (SoilVision)	1,09
	3D	SVSlope (SoilVision)	1,26
МКЭ	2D	RS2 (Rocscience)	1,06
		SVSolid (SoilVision)	1,18
	3D	RS3 (Rocscience)	1,13

Заключение

Анализ данных выполненного математического моделирования позволяет сделать следующие основные выводы о влиянии на результаты расчётов устойчивости склона следующих факторов:

- используемый метод расчёта;
- размерность решаемой задачи;
- выбор используемого программного обеспечения.

Список литературы

1. Зеркаль С.В., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Зеркаль О.В. Моделирование движения оползней-потоков «методом частиц» // Сб. «Сергеевские чтения». М.: ГЕОС, 2007. Вып. 9. С. 117–121.
2. Фоменко И.К., Зеркаль О.В. Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трёхмерной постановке // Геотехника. 2011. № 5. С. 38–43.
3. Фоменко И.К. Общая классификационная схема методов расчёта устойчивости склонов // Научные труды SWorld. Иваново: ООО «Научный мир», 2012. Т. 35. № 3. С. 75–80.
4. Crosta G.B., Imposimato S., Roddeman D.G. Numerical modelling of large landslides stability and runout // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2003. № 3. P. 523–538.
5. Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches // Canadian Geotechnical Journal. 1995. Vol. 32. № 4. P. 610–623.
6. Hungr O., Evans S.G. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model // Proceedings of the 7th international symposium on landslides, Trondheim, Norway, 16–21 June 1996. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. Vol. 1. P. 233–238
7. Hungr O., McDougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis // Computers & Geosciences. 2008. № 35. P. 978–992.
8. McDougall S., Hungr O. A model for the analysis of rapid landslide runout motion across three-dimensional terrain // Canadian Geotechnical Journal. 2004. № 41. P. 1084–1097.
9. McDougall S., Hungr O. Modelling of landslides which entrain material from the path // Canadian Geotechnical Journal. 2005. № 42. P. 1437–1448.
10. Sassa K., Nagai O., Solidum R., Yamazaki Y., Ohta H. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide // Landslides. 2010. № 7. P. 219–236.
11. Sassa K., He B., Dang K., Nagai O., Takara K. Progress in Landslide Dynamics / Landslide Science for a Safer Geoenvironment / K. Sassa, P. Canuti, Y. Yin (eds.) // Proceedings of World Landslide Forum 3, 13–16 June 2014, Beijing, China. Springer, 2014. Vol. 1. P. 37–67.
12. Sosio R., Crosta G.B., Hungr O. Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices // Landslides. 2012. № 9. P. 315–334.