

Работа в программах Slide2 и Slide3 пакета RocScience: анализ причин разрушения армированного склона



Предлагаем вниманию читателей краткий обзор статьи Джеймса Коллина с соавторами [1] «Анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния при разрушении армированного склона в аэропорту Иджер», опубликованной в «Журнале по геотехнике и геозекологии» (Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering) под эгидой Американского общества инженеров гражданского строительства (ASCE) в начале 2021 года (с привлечением дополнительных материалов [2]). Эти американские исследователи провели двумерный и трехмерный анализ предельного равновесия (LEM – Limit Equilibrium Methods) в программах Slide2 и Slide3, являющихся частью программного комплекса RocScience, с целью выявления причин разрушения 72-метрового армированного склона в конце взлетно-посадочной полосы № 5 аэропорта Иджер (г. Чарльстон, Западная Вирджиния, США) в 2015 году.

Обзор статьи выполнен аналитической службой журнала «ГеоИнфо» при поддержке ООО «Современные изыскательские технологии» по материалам Rocnews Rocscience.

Аналитическая служба

Введение

12 марта 2015 года после 8 лет эксплуатации катастрофически разрушился армированный георешетками нисходящий склон (армогрунтовый откос) высотой 72 м в конце взлетно-посадочной полосы № 5 в аэропорту Иджер (г. Чарльстон, шт. Западная Вирджиния, США).

Для выяснения причин произошедшего были привлечены инженеры-геологи. Им также необходимо было понять, можно ли точно спрогнозировать подобное с помощью анализа предельного равновесия (LEM – Limit Equilibrium Methods) с использованием исходных данных по исследуемому участку до разрушения, а также результатов исследования образцов грунта.

Укрепление склона

В связи с обновлением требований Федерального управления гражданской авиации США в 2005 году в аэропорту Иджер потребовалось удлинить взлетно-посадочную полосу № 5 примерно на 150 м. Из-за сложного рельефа для этого пришлось армировать нисходящий склон в конце полосы георешетками с использованием насыпного материала (рис. 1). Строительство началось в августе 2005 года и было завершено к декабрю 2006 года.



Рис. 1. Усиленный георешетками склон в конце взлетно-посадочной полосы № 5 аэропорта Иджер: а – во время строительства; б – после разрушения 12 марта 2015 года [1]

В районе строительства было пробурено 29 инженерно-геологических скважин. Из 8 скважин были взяты образцы грунта, использованного в качестве насыпного материала. Перед строительством для разработки проекта усиления склона был проведен анализ его устойчивости методом предельного равновесия. На основе полученных результатов было принято решение о первичном армировании (отвечающем за общую устойчивость склона) с использованием двух различных типов одноосных георешеток (10G и 20G), укладываемых горизонтально, и вторичного армирования с целью поддержки поверхности откоса с применением более легкой геосетки, обеспечивающей защиту от эрозии и дающей возможность развиваться растительности.

На рисунке 2 показаны вертикальные сечения армированного склона по проекту и по результатам строительства (при котором длина георешеток в нижней части была сокращена с 53,4 до 20,7 м).

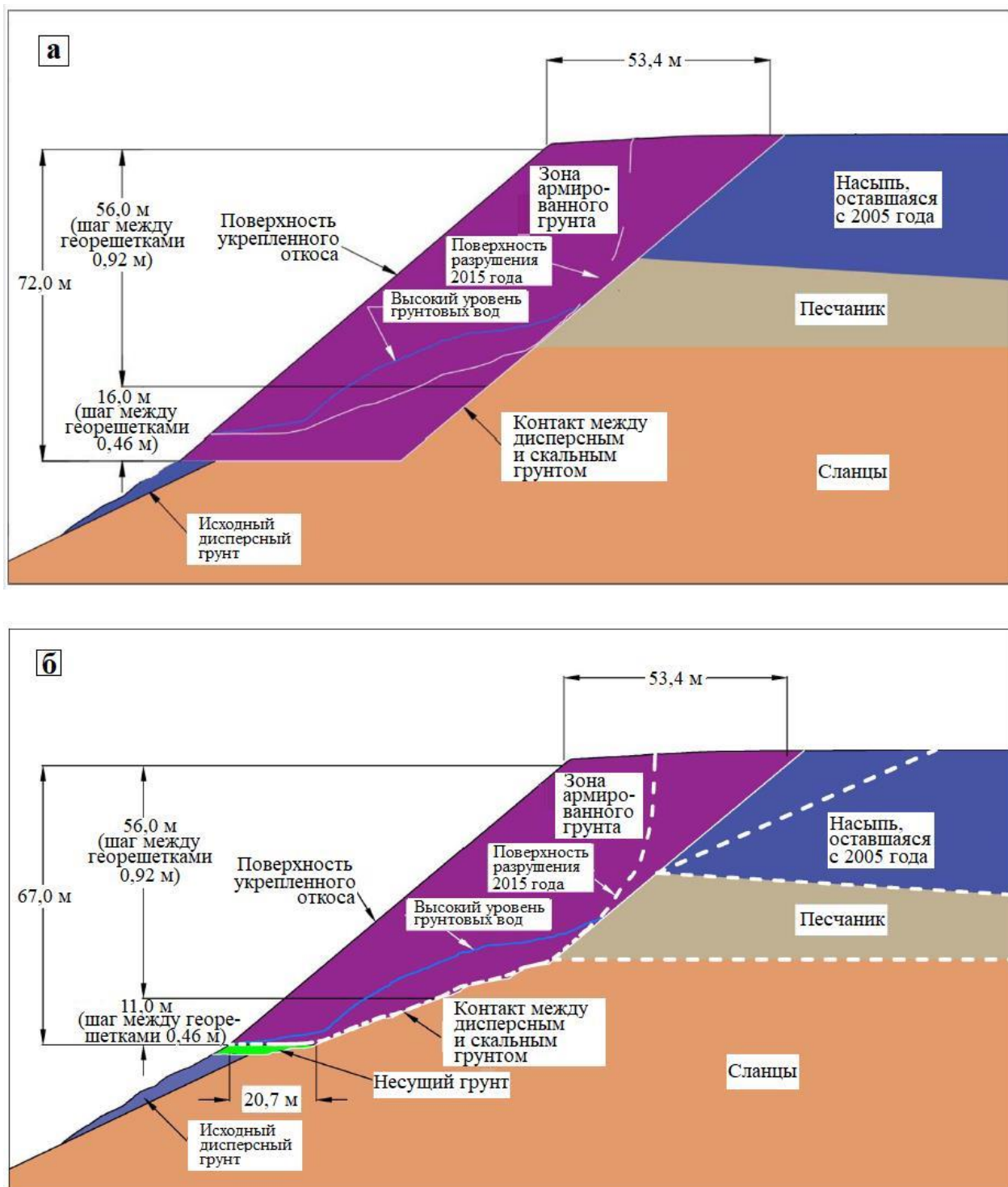


Рис. 2. Вертикальные сечения укрепленного откоса по проекту (а) и по результатам строительства (б)

Разрушение армированного склона

С момента завершения строительства в 2006 году на протяжении нескольких лет не наблюдалось никаких заметных изменений в структуре армогрунтового откоса. В 2013 году произошло незначительное оползание поверхности внешнего глинистого грунта у основания склона, которое существенно не изменило его геометрию. В связи с дальнейшим развитием склоновых процессов первоначальные исследования были расширены. К 2015 году были пробурены скважины для получения образцов дисперсных грунтов и скальных горных пород, а также для установки пьезометров и инклинометров. К февралю 2015 года наметившийся ранее оползневый блок опустился на 23 см, при этом скорость деформаций постепенно увеличивалась. В начале марта в 28 м за бровкой склона образовалась трещина закола, а к 10 числу ее глубина достигла 1,8 м. В это время для изучения возникшей ситуации в аэропорт Иджер прибыли инженеры-геологи. Дальнейшие деформации они связали с проливными дождями, продолжавшимися несколько дней, в результате чего поверхностные воды попадали в армированную зону через указанную трещину. Сначала у основания склона был обнаружен оползень мощностью 3,7 м. А 12 марта 2015 года, армогрунтовой откос был разрушен. Из оползневой массы были взяты образцы для анализа, а оставшаяся ее часть была удалена, чтобы снова стабилизировать склон.

Анализ методом предельного равновесия

После случившегося катастрофического события был проведен двумерный анализ предельного равновесия (LEM) для оценки устойчивости армогрунтовой зоны склона как на момент завершения строительства в 2006 году, так и на момент ее разрушения в 2015 году. Исходные данные были получены при строительстве и при испытаниях образцов, отобранных после аварии. Параметры, использованные для анализа, приведены в таблице.

Таблица. Параметры, использованные для анализа

Материал	Общий удельный вес, кН/м ³	Сдвиговая прочность	Параметры степенной функции	
			<i>a</i>	<i>b</i>
Ненарушенная скальная порода ($D = 0$)	22	Пиковая	3,07	0,602
Нарушенная скальная порода ($D = 0,7$)	22	Пиковая	1,64	0,687
Насыпной грунт армированной зоны	21,4	Пиковая	1,26	0,85
Старый сохранившийся насыпной грунт	20,6	Пиковая	0,757	0,973
Контакт между насыпным скальным грунтом	20,6	Полученная путем обратного расчета*	0,565	0,905
Контакт между насыпным скальным грунтом	20,6	Полностью ослабленного грунта	0,418	0,905
Контакт между насыпным скальным грунтом	20,6	Остаточная	0,26	0,88

* Параметр обратного расчета *a* – для получения коэффициента устойчивости 1 для поверхности скольжения за армированной зоной.

Важно отметить, что силы сдвига были представлены с использованием двухпараметрических степенных функций из-за нелинейности огибающей насыпного материала. Прочность геосинтетической решетки на разрыв составила 117,8 кН/м. Растягивающее усилие в георешетке было основано на коэффициенте ее трения по грунту 0,8 и на приблизительном угле внутреннего трения выбранного заполняющего насыпного материала 41 град.

Анализ проводился в программе Slide2 программного комплекса RockScience с использованием метода Спенсера с оптимизацией поверхностей скольжения, а итоги

сравнивались с результатами, полученными сотрудниками Техасского университета в Остине.

Отправная точка для анализа

В проведенном анализе поверхность раздела между насыпным дисперсным и скальным грунтом моделировалась как часть подстилающего массива ненарушенных скальных пород. Критическая поверхность скольжения проходила через несколько слоев георешеток вблизи основания армированной зоны, что соответствовало коэффициенту устойчивости $K_y = 2,14$. Если бы предположение о разрушении использовалось для вышеуказанной границы раздела, то K_y был бы равен 1,77.

Анализ показал, что общая (глобальная) минимальная поверхность скольжения была за пределами армированной зоны.

Более того, было показано, что после строительства склон был достаточно стабильным.

Анализ ситуации на момент разрушения

По результатам анализа, после разрушения в зоне контакта между насыпным дисперсным грунтом и скальной породой имеются следы скольжения. Это позволяет предположить, что некоторые области в пределах этой зоны достигли предельного состояния, поэтому в качестве прочности на сдвиг здесь следует использовать остаточную прочность. При таком подходе для критической поверхности скольжения $K_y = 0,8$. Эта граница на рисунке 3 обозначена как «поверхность 1», и ее выход наверх соответствует местоположению трещины закола, наблюдавшейся в 2013 году.

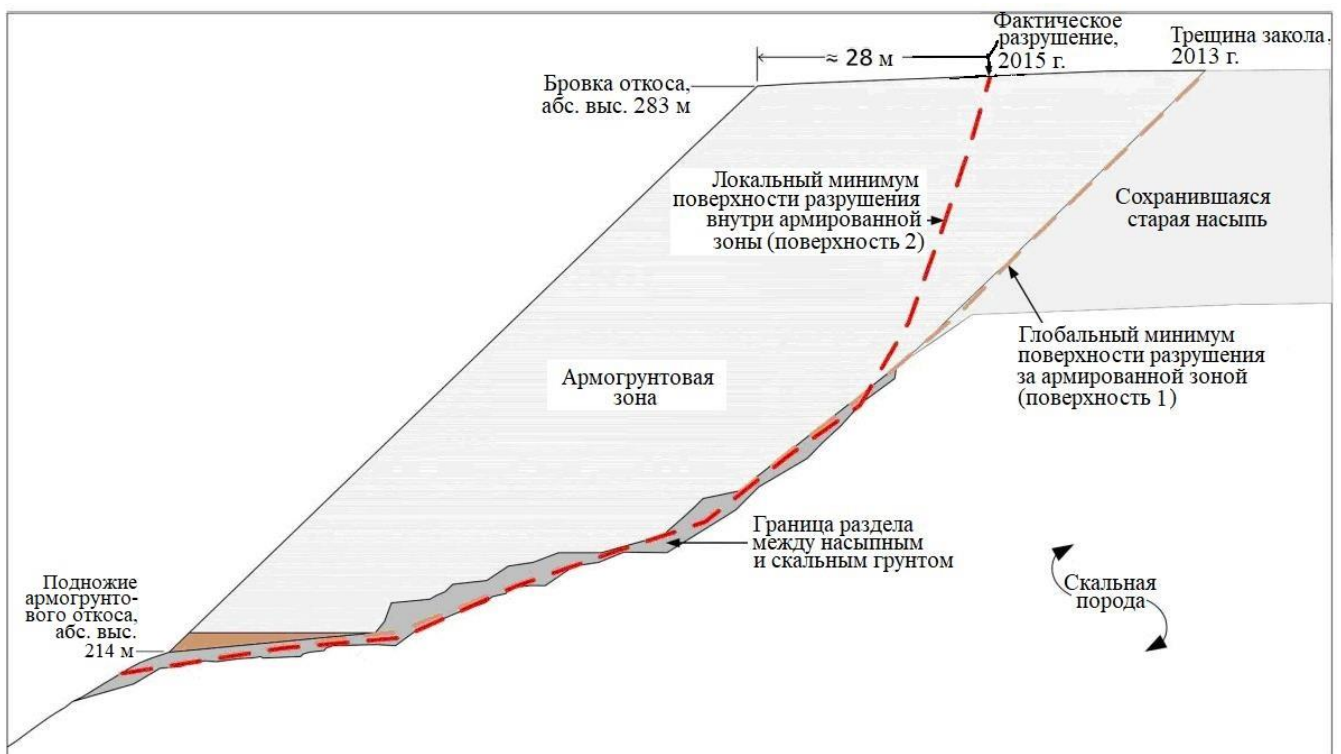


Рис. 3. Поверхности разрушения, полученные на основе расчетов

Затем был проведен обратный анализ с использованием нескольких нелинейных огибающих зоны разрушения для определения параметров сдвиговой прочности грунтов насыпи, которые могли бы сделать K_y равным единице. На рисунке 3 показаны результаты и этих расчетов. Коэффициент устойчивости, равный единице, был рассчитан в программе Slide2 при $a = 0,565$ для «поверхности 1».

Несмотря на то что расположение «поверхности 1» соответствовало местоположению трещины закола, обнаруженной в 2013 году, фактическое разрушение произошло в 28 м от бровки откоса, что означает, что поверхность разрушения прошла сквозь верхние слои армогрунтовой зоны по «поверхности 2» (см. рис. 3).

Может быть множество причин, объясняющих разницу между расчетным критическим скольжением и реальным разрушением: характеристики оставшегося заполнителя, распределение сил армирования, локальные зависимости напряжения от деформации и пр. Если бы остаточная прочность грунтов насыпи на сдвиг была на 10–20% выше, то «поверхность 2» имела бы более высокий коэффициент устойчивости, чем «поверхность 1». По мере того как склон с течением времени деформировался, развивались локальные концентрации напряжений, создающие неравномерные растягивающие усилия. По мере деградации прочности насыпных грунтов георешетки подвергались все большим нагрузкам. Доказательством является то, что после разрушения в верхней части армированной зоны в георешетках были зафиксированы значительные напряжения.

На рисунке 4 (слева) показана сложность компоновки георешетки на высоте 281,5 м. 3D-анализ позволил смоделировать фактическую компоновку каждой полосы георешетки на основе информации из строительных эскизов. Сценарий MATLAB версии 9.7 был написан для вычисления координат каждой полосы георешетки для построения 3D-модели в Slide3, показанной на рисунке справа.

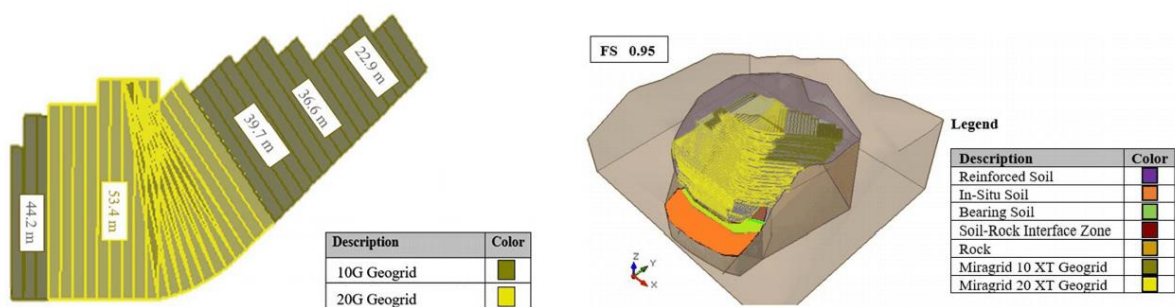


Рис. 4. Схема расположения георешетки, созданная во время строительства на высоте 281,5 м (слева). Выход Slide3 для уклона в момент разрушения при высоком уровне грунтовых вод и анизотропной прочности георешетки на растяжение (справа).

Проведенный 3D-анализ устойчивости отлично согласуется с полевыми наблюдениями и условиями в момент разрушения укрепленного откоса ($K_y = 0,95$).

Заключение

Рассмотренное место на территории аэропорта Иджер является примером разрушения армированного склона, где задействовано множество различных факторов влияния. Поэтому даже после обширного LEM-анализа осталась неопределенность в причинах этого катастрофического события.

При этом полученные результаты подчеркнули, насколько важно учитывать все эти факторы и использовать метод предельного равновесия при выполнении анализа для проектирования в аналогичных ситуациях. Авторы работы [2] выразили надежду, что понимание причин подобных событий приведет к созданию надежных и безопасных проектов в будущем.

Данный пример так же возвращает нас к вопросу: когда достаточно 2D-анализа и когда следует использовать 2D и 3D анализы вместе?

Мы рекомендуем прочитать [полный текст статьи на английском языке](#), чтобы ознакомиться со всеми подробностями.

Чтобы узнать, как Slide2 может помочь вам, [попробуйте его бесплатно в течение двух недель](#).

Источники

1. Collin J.G., Stark T.D., Lucarelli A., Taylor Th.P., Berg R.R. Stability and stress-deformation analyses of reinforced slope failure at Yeager Airport // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2021. Vol. 147(3). Article 04020179.
2. VandenBerge, D. R.; Valentine, R. J.; Brandon, T. L. & Wright, S. G. (2021), 'Case History: Failure of the Reinforced Soil Slope at Yeager Airport, Charleston, West Virginia', Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 147(1), 05020013.