

УДК 624.131

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА С ПОМОЩЬЮ ПО GEOSTUDIO И OPTUM G2 НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАЛДЫБУЛАК (ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ)

Джакупбеков Б.Т., Никольская О.В.

Институт машинovedения, автоматика и геомеханика НАН КР.

В данной статье представлен сравнительный анализ устойчивости откоса, выполненный с использованием программных продуктов GeoStudio и Optum G2 в рамках двумерной (2D) постановки задачи. Целью исследования является сопоставление особенностей численного моделирования, методов расчёта коэффициента устойчивости (FoS), а также оценка точности и эффективности получаемых результатов в каждой из программных сред.

Ключевые слова: GeoStudio, Optum G2, анализ устойчивости откоса, Сейсмическое ускорение, Сейсмическое нагрузка

ТАЛДЫ-БУЛАК (ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ) ТОО-КЕНИНИН МИСАЛЫНДА GEOSTUDIO ЖАНА OPTUM G2 МЕНЕН ЖАНТАЙМАНЫН ТУРУКТУУЛУГУНА САЛЫШТЫРМАЛУУ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

Джакупбеков Б.Т., Никольская О.В.

Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын
Машина куруу, автоматика жана геомеханика институту.

Бул макалада GeoStudio жана Optum G2 программаларын колдонуу менен эки өлчөмдүү (2D) көйгөйдү түзүүдө жасалган эңкейиштердин туруктуулугунун салыштырма анализи берилген. Изилдөөнүн максаты - сандык моделдөөнүн өзгөчөлүктөрүн, туруктуулук коэффициентин (FoS) эсептөө ыкмаларын салыштыруу жана ар бир программалык чөйрөдө алынган натыйжалардын тактыгын жана натыйжалуулугун баалоо.

Баштапкы сөздөр: GeoStudio, Optum G2, эңкейиштин туруктуулугун талдоо, сейсмикалык ылдамдатуу, сейсмикалык жүк

A COMPARATIVE ANALYSIS OF SLOPE STABILITY USING GEOSTUDIO AND OPTUM G2: A CASE STUDY OF THE TALDYBULAK (LEVOBEREZHNY) DEPOSIT

Djakupbekov B.T., Nikolskaya O.V.

Institute of Mechanical Engineering, Automation, and Geomechanics,
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

This article presents a comparative analysis of slope stability, performed using GeoStudio and Optum G2 software, within a two-dimensional (2D) problem formulation. The objective of the study is to compare the features of numerical modeling, methods for calculating the coefficient of stability (FoS), and to evaluate the accuracy and effectiveness of the results obtained in each software environment.

Keywords: GeoStudio, Optum G2, slope stability analysis, seismic acceleration, seismic load.

Введение. Устойчивость является одной из ключевых проблем при оценке устойчивости склонов часто применяют различные методы численного моделирования, используя специализированные программные комплексы, такие как GeoStudio и Optum G2. Оба этих программных продукта позволяют проводить анализ устойчивости склонов, но обладают различными возможностями и подходами к решению задач.

Особое внимание уделяется ключевым различиям в подходах к расчётам, включая применение метода предельного равновесия и численных методов, основанных на конечных элементах. В качестве примера для сравнительного анализа рассматривается месторождение Талдыбулак левобережный, геотехнические условия которого позволяют провести оценку поведения откоса в различных сценариях нагружения и физико-механических параметров грунтов.

Проведённый анализ позволяет не только выявить сильные и слабые стороны каждого программного комплекса, но и определить целесообразность их применения в зависимости от сложности инженерной задачи и требуемой точности расчётов.

GeoStudio — это мощный пакет программ для анализа геотехнических и гидрогеологических процессов, широко используемый в инженерной практике. Он включает несколько модулей, среди которых наиболее часто для анализа устойчивости склонов применяется модуль SLOPE/W. Этот модуль позволяет моделировать и анализировать устойчивость склонов с учетом различных типов грунтов, водонасыщенности и других факторов.

Программа использует метод предельных равновесий для вычисления коэффициента безопасности (FoS) и анализа различных сценариев сдвига. Преимущество GeoStudio заключается в простоте интерфейса и широком наборе стандартных функций, что делает программу удобной для применения в большинстве практических задач.

[1]

Optum G2 представляет собой более современный и мощный инструмент для решения задач геотехники. Он предлагает как методы предельного равновесия, так и методы численного моделирования, включая конечные элементы. Основное отличие Optum G2 от GeoStudio заключается в возможности проводить более глубокий анализ поведения грунта и взаимодействий между элементами конструкции, например, для сложных многоуровневых систем.

С помощью Optum G2 можно реализовать более точное моделирование поведения грунта на основе реальных данных, что особенно полезно для сложных геологических условий. Программа также предлагает множество опций для вариационного анализа, позволяя учитывать большое количество параметров, включая влияние водонасыщенности, напряженно-деформированного состояния и механических характеристик материалов.

Методы решения:

- GeoStudio ориентирован на классические методы предельных равновесий, что обеспечивает быстрые и достаточно точные результаты для стандартных геотехнических задач.
- Optum G2 использует более сложные методы численного моделирования, что позволяет более точно учитывать реальные механизмы разрушения и взаимодействия материалов.
- Золоторудное месторождение, расположенное в Чуйской области Кыргызстана, на юго-востоке от села Талды-Булак. Оно находится в предгорьях Тянь-Шаньского хребта.

Месторождение приурочено к зоне тектонического меланжа на границе слюдистых сланцев, гранито-гнейсов РР1 (тегерментинская свита) и зеленых сланцев, амфиболитов ϵ -О1 (куперлисайская свита). Все тектонические пакеты собраны в антиклинальную складку, разбиты субширотными и СВ разломами, прорваны дайкообразными монцодиоритовыми порфиритами и лавобрекчиями О-С.

Границы образования трещин начались в 2010 г. к и находятся на северном склоне месторождения на районе закладочного комплекса. Основными породами, слагающими данный склон, являются покровные образования, представленные конусом выноса пролювиальных отложения, которые перекрывают амфиболовые сланцы и метасоматиты смешанного типа.

Устойчивость склона — это способность склона сохранять свое равновесие и противостоять деформациям и разрушениям под воздействием внутренних и внешних сил. Она определяется балансом между силами, удерживающими грунт на месте, и силами, вызывающими сдвиг или оползень. Высокая устойчивость обеспечивает безопасность и долговечность природных и искусственных склонов, тогда как её снижение приводит к развитию геодинамических процессов и риску катастрофических последствий.

Оползни представляют собой опасные геодинамические процессы, заключающиеся в смещении масс грунта или горных пород вниз по склону под действием силы тяжести. Развитие оползневых процессов обуславливается рядом взаимосвязанных природных и антропогенных факторов.

К основным причинам относятся:

- **Геологическое строение** местности, включающее наличие слабосвязанных, глинистых или сильнотрещиноватых пород;
- **Гидрологические и климатические условия**, особенно переувлажнение склонов в результате интенсивных осадков, снеготаяния, паводков или фильтрации воды из инженерных сооружений;
- **Крутизна склонов**, превышающая угол естественного откоса для данного типа грунтов;
- **Человеческое вмешательство**, такое как подрезка склонов при строительстве дорог, прокладке коммуникаций и других инженерных работах без учета геотехнических условий;
- **Сейсмическая активность**, способствующая снижению прочности массива и активации склоновых деформаций.

Понимание причин и механизмов оползнеобразования необходимо для эффективного планирования инженерной защиты территорий, разработки мер по мониторингу и предотвращению оползней, а также безопасного освоения склоновых участков на рисунке 1 показано объект исследования. [2]



Рис 1. Склон на месторождении Талдыбулак (левобережный), красным отмечено контуры трещин.

Определение физико-механических свойств грунтов склона месторождения Талдыбулак левобережный. Отбор проб для изучения физико-механических свойств грунтов проводился на монолитах рис.2.



Рис. 2. Отбор проб от стенки срыва и из отвальной массы.

Сейсмическая активность региона. Кыргызстан является сейсмически активным регионом, с высокими рисками землетрясений. Сейсмическое ускорение (PGA-Peak Ground Acceleration) определяется путем указания сейсмического коэффициента, значение kh равно 0,2 будет означать, что горизонтальное ускорение равно 0,2 g . Особенности расчета устойчивости оползневого склона с учетом сейсмической нагрузки,

расположенных в сейсмоактивных регионах, должны учитываться силы возможных землетрясений.

Сейсмическая нагрузка, при оценке устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов, может быть учтена на основе использования псевдостатического или динамического анализа.

При подходе с использованием псевдостатического анализа эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительной силы, определяемой следующим образом (1): [3]

$$F = \frac{aW}{g} = kW \quad (1)$$

где, a – горизонтальное сейсмическое ускорение; g – ускорение свободного падения; W – удельный вес грунта; k – коэффициент сейсмичности.

Для расчета устойчивости оползневой массы с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа программном комплексе GeoStudio SLOPE/W использовали представленные данные согласно СН КР 20-02:2024. таб.1. [4].

Таблица 1. Свойства примененные при расчете устойчивости и сейсмическая нагрузка

Номер пробы	Плотность		Угол внутреннего трения	Сцепление		Сейсмическое ускорение, a_g		по шкале MSK-64	
	т/м ³	кН/м ³		МПа	кПа	В долях, g		Баллы	
Проба 1 (2024)	2,450	24.026	26,5	0,071	71	0,2	0,52	8	>9

Оценка запаса устойчивости склона на месторождении Талдыбулак Левобережный в районе закладочного комплекса с использованием программных комплексов GeoStudio (SLOPE/W) и Optum G2. Для моделирования расчётов устойчивости склона (оползневой массы) так же необходимы геометрические параметры склона или разрезы для этого использовано ПО Google sketchUp для получения разрезов. Рис.3-4. [5]

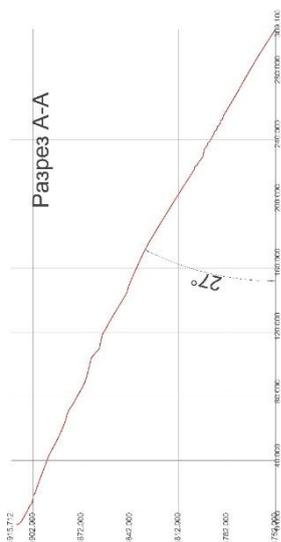
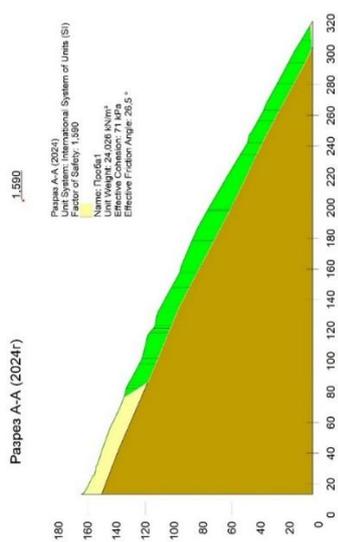
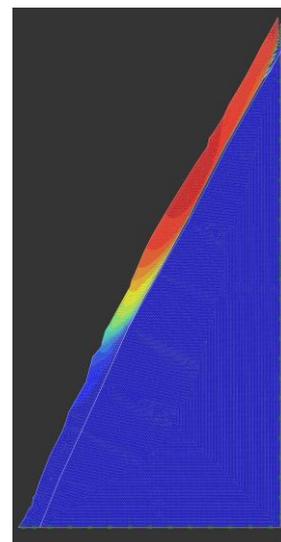


Рис. 3. Полученные разрезы с помощью Google sketchUp



GeoStudio (SLOPE/W)



Optum G2.

Рис. 4. Результаты расчетов

Таблица 2 Результаты расчетов фактора безопасности оползневой массы

разрезы	балл	Сейсмическое ускорение, g	Значение	Значение
			коэффициента устойчивости 1	коэффициента устойчивости 2
Разрез А-А (2024)	-	-	Ky – 1,590	Ky – 1,525
	8	0,20	Kc – 1,071	-
	>9	0,52	Kc – 0,736	-

Выводы

На основе сравнительного анализа состояния оползневого склона в районе закладочного комплекса установлено, что по разрезам, на текущий момент времени склон находится в устойчивом равновесии:

- GeoStudio (SLOPE/W) $K_y=1,59$ и
- Optum G2 $K_y = 1,525$.

Учитывая, что месторождение Талдыбулак-Левобережный находится в зоне 9-балльного землетрясения, при сейсмических нагрузках склон может перейти в неустойчивое состояние и сползание грунтовых масс неизбежно.

1. Точность расчетов: Программы дают схожие результаты при решении задач с типичными геотехническими условиями. Однако при сложных многослойных моделях или нестандартных параметрах грунтов Optum G2 может предоставить более точные и детализированные результаты.

Optum G2 более гибок и позволяет более точно моделировать различные механизмы взаимодействия материалов, что особенно полезно при анализе нестандартных геотехнических ситуаций. Но для данной программы расчет сейсмических нагрузок требуется более глубокие знания и данные по сейсмике

2. GeoStudio Slope/w поддерживает моделирование сложных многослойных конструкций. Это позволяет учитывать взаимодействие разных материалов (почва, грунты, вода) и делать более точные прогнозы.

- **Статический анализ** — используется для оценки устойчивости склонов при постоянных нагрузках (например, вес грунта или зданий).
- **Динамический анализ** — используется для оценки поведения склонов под воздействием сейсмических нагрузок.

3. Если **коэффициенты устойчивости** для одинаковых задач, рассчитываемые в **GeoStudio (SLOPE/W)** и **Optum G2**, практически совпадают, это может свидетельствовать о том, что:

- **Методы расчёта** в обеих программах достаточно согласованы по подходу к анализу устойчивости склонов. Несмотря на то, что **SLOPE/W** использует методы предельного равновесия (limit equilibrium methods), а **Optum G2** — метод конечных элементов (FEM), основные результаты для простых задач могут быть схожими, особенно если расчёт проводится для стандартных типов грунтов и склонов.
- **Модели, входящие в расчёты**, могли быть аналогичными по своим геометрическим и физическим параметрам. Например, одинаковые свойства грунтов (плотность, угол внутреннего трения, коэффициент сцепления) и параметры нагрузки (статические или динамические силы) могут привести к похожим результатам для коэффициента безопасности в обеих программах.
- **Параметры материала и условия нагрузки** могли быть заданы схожим образом, что также может повлиять на сходство результатов. Даже в разных методах расчёта (предел равновесия vs. метод конечных элементов) при одинаковых начальных данных коэффициент безопасности может быть практически одинаковым.

Заключения.

- **GeoStudio (SLOPE/W)** будет лучшим выбором для пользователей, которым нужно быстро и точно оценить устойчивость склонов с использованием методов предельного равновесия, особенно при стандартных геотехнических задачах.

- **Optum G2** идеально подходит для сложных проектов, где требуется высокая точность, 3D моделирование, а также учёт нелинейных материалов и взаимодействий. Она предоставляет гибкость и более сложные возможности для анализа.
- Если результаты коэффициента безопасности для стандартных или относительно простых задач совпадают, это не означает, что одна из программ работает "неправильно". Это скорее подтверждает, что оба метода дают схожие результаты для таких случаев. Однако при более сложных условиях расчёты в **Optum G2** могут отличаться, особенно в сложных моделировании или при учёте пластичности материалов.
- Если важно провести более глубокий и точный анализ, например, для сложных сооружений, нестандартных склонов или сейсмических воздействий, **Optum G2** будет предпочтительнее. Для простых и стандартных задач **GeoStudio (SLOPE/W)** будет работать быстрее и легче.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slope Stability Modeling Copyright, © 2023 Seequent Limited, The Bentley Subsurface Company, pp. 98-100.
2. Айтматов И.Т., Кожогулов К.Ч., Никольская О.В. Геомеханика оползнеопасных склонов. - Бишкек: ИЛИМ, 1999г. – 209.
3. Krahn J. Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology. The 3rd Edt. – Canada, 2007. – 355p. 10.3 Pseudostatic analysis.
4. СН КР 20 02:2024 «Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования». Утверждён приказом Госстроя КР № 68 нпа от 7 марта 2024 г. (введён в действие с 29 марта 2024 г.).
5. Джакупбеков Б.Т. Определение параметров отвалов на горных склонах с применением программного приложения Google Sketchup. Современные проблемы механики. 2016. № 26 (4). С. 58-64.