



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

CURRENT TRENDS IN SLOPE STABILITY CALCULATIONS

ФОМЕНКО И.К.

Главный специалист по изысканиям Московского филиала компании «Галф Интерстейт Инжиниринг», к.г.-м.н., г. Москва, ifolga@gmail.com

FOMENKO I.K.

The main specialist for engineering surveys of the Moscow branch of the «Gulf Interstate Engineering» company, candidate of geological-mineralogical sciences, Moscow, ifolga@gmail.com

Ключевые слова:

оползневая опасность; методы оценки устойчивости склонов; оптимизация поверхности скольжения; трехмерное моделирование; динамический анализ; вероятностный анализ.

Key words:

landslide hazard; slope stability assessment methods; sliding surface optimization; 3D modeling; dynamic analysis; probabilistic analysis.

Аннотация

В статье рассматриваются современные тенденции в расчетах устойчивости оползневых склонов (УС), дается общая классификационная схема используемых в современной практике методов математического моделирования УС, приводятся примеры использования дополнительных возможностей анализа УС (оптимизации поверхности скольжения, трехмерного моделирования, динамического и вероятностного анализа).

Введение

Происходящее в нашей стране реформирование проектно-изыскательских работ, связанное с изменением законодательства и введением в действие Федерального закона № 184 ФЗ от 27.12.2002 г. [2], а также принятое направление гармонизации российских нормативных документов с международными стандартами заставляют по-новому взглянуть на состояние инженерно-геологических и геотехнических исследований.

Это в полной мере относится и к задачам по оценке устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов. Заслуги отечественной инженерно-геологической школы, ее вклад в решение этой непростой проблемы трудно переоценить. Однако следует отметить, что в последние десятилетия данное направление в России практически не развивалось. Доказательством этому служат нормативные документы, например часть 2 СП 11-105-97 [5], где в п. 4.2.11 сказано, что «*расчеты устойчивости склонов (откосов) следует выполнять по программам, разработанным, как правило, на основе общепринятых методов расчета (методов Терцаги, прислоненного откоса, Маслова — Берера, Шахунянца, Чугаева; при расчетах устойчивости склонов в слабых породах — методов Можжевитинова, Бишона, Тейлора, Моргенитерна и Прайса; при расчетах устойчивости склонов в скальных породах — методов дефицита удерживающих сил и Фисенко)*». Рекомендуемые в данном документе методы были разработаны в 50–70-х годах прошлого столетия. Возникает вопрос: что же изменилось за последние полвека в мировом опыте расчетов устойчивости склонов? Как показывает анализ зарубежной научно-технической литературы, изменения весьма значительны, что в основном обусловлено интенсивным развитием компьютерных технологий, с помощью которых стало возможным решение ранее недоступных задач.

Цели данной статьи: (1) предложить классификационную схему применяемых в современной практике методов расчета устойчивости склонов (УС), основ-

Abstract

The article reviews current trends in calculations of slope stability (SS), presents a general classification scheme of SS mathematical modeling methods used in the current practice, gives some examples of using additional capabilities of SS analysis (sliding surface optimization; 3D modeling; dynamic and probabilistic analysis).



ным принципом систематизации в которой является механико-математический подход к решению задачи; (2) рассмотреть результаты применения некоторых перспективных дополнительных возможностей анализа устойчивости склонов при ее расчетах.

Классификации методов расчета устойчивости склонов

Классификации методов расчета устойчивости склонов развиваются параллельно с развитием расчетных методик. Начало развития направления по математическому моделированию УС было положено Кулоном в 1773 г., когда им было сформулировано условие прочности грунта исходя из предельного равновесия призмы обрушения. Первый способ расчета УС, основанный на принципе Кулона, был предложен в 1820 г. Г. Франсе [4]. Однако спустя почти два века оценка устойчивости склонов по-прежнему остается сложной задачей в геотехнике. В настоящее время существует достаточно много, более 200, подходов к расчету УС. Выбор тех или иных методов в первую очередь определяется математическим аппаратом решения задачи, типом оползневого процесса и механизмом возможного смещения оползневых масс.

Различия в существующих классификациях расчетов устойчивости склонов в первую очередь связаны с используемым базисом классификации. В классификациях М.Е. Певзнера [3], И.В. Федорова [7], Г.Л. Фисенко [8] в качестве основного признака для отнесения способа расчета к определенному классу принимается форма поверхности скольжения. В классификации А.М. Демина [1] методы расчета подразделяются по нескольким определяющим признакам: по подходу к решению задачи (эмпирические или теоретические методы), по используемым в расчетах характеристикам (методы, учитывающие силы или деформации), по способу решения задачи (аналитические, графоаналитические, графические методы), по способу рассмотрения поверхности разрушения (задается поверхность или отыскивается). По используемому математическому принципу методы расчета устойчивости склонов могут быть разделены на детерминистические и вероятностные [6]. Существуют классификации, учитывающие механизм развития оползневого процесса и модели поведения грунтов.

В качестве базиса для классификации расчетных методов оценки устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов может лежать одна из двух предельных схем [10]. Идея предельной схемы фактических и уменьшенных прочностных характеристик состоит в нахождении таких критических значений прочностных характеристик грунта, при которых расчетный склон перешел бы в состояние предельного равновесия. Соответственно, коэффициент устойчивости при подобном подходе определяется как отношение фактических прочностных характеристик к их критическим значениям.

$$K_y = (c + \sigma_n \tan \varphi) / (c_r + \sigma_n \tan \varphi), \quad (1)$$

где c, φ — параметры прочности, σ_n — компонента нормального фактического напряжения; c_r, φ_r — параметры приведенной прочности, достаточные для поддержания равновесия.

Идея предельной схемы удерживающих и сдвигающих усилий заключается в изучении соотношения сдвигающих и удерживающих усилий, действующих на склон. Коэффициент устойчивости в этом случае может быть определен как отношение удерживающих моментов к сдвигающим или как отношение удерживающих сил к сдвигающим:

$$\begin{aligned} M_{уд} / M_{сдв} &= K_y \\ \text{или} \\ F_{уд} / F_{сдв} &= K_y. \end{aligned} \quad (2)$$

Стоит отметить, что определение коэффициента устойчивости в двух описанных предельных схемах различно и использование схемы фактических и уменьшенных прочностных характеристик с точки зрения механики является более обоснованным. Однако на практике оба определения коэффициента устойчивости дают близкие результаты.

Зарубежные подходы к классификациям методов расчета устойчивости склонов, которые следует упомянуть, рассматриваются в работах [11, 12, 14].

В задачи данной статьи не входит сравнительный анализ используемых при создании классификаций методов расчета устойчивости склонов. Однако очевидно, что основание классификации должно быть единым для всех выделяемых классов. В связи с интенсивным развитием подходов к расчету УС многие ранее используемые критерии для классификации в настоящий момент не могут быть применены ко всему множеству методов. Например, форма поверхности скольжения неприемлема для разделения на классы при численном анализе методами конечных разностей и конечных элементов. Более того, даже в методах предельного равновесия, как будет показано ниже, с введением процедуры оптимизации форма поверхности скольжения не может являться определяющим критерием при классификации.

Классификационная схема методов расчета устойчивости склонов, основанная на механико-математическом подходе

Не имея цели создания новой классификации методов расчета устойчивости склонов, автор предлагает классификационную схему таких методов, основанную *на механико-математическом подходе* к решению задачи (рис. 1). Методы расчета УС условно можно разделить на несколько принципиальных групп: интуитивные; основанные на анализе предельного равновесия; основанные на предельном анализе; имитационного моделирования; специальные; вероятностного анализа; гибридные.

К группе *интуитивных* отнесены все графические и аналоговые методы. Объемна по количеству группа методов, основанных на *анализе предельного равновесия* (Limit Equilibrium Methods — LEM). В ней можно выделить две основные подгруппы — методы отсеков и методы монолитного тела. Также значительна по объему группа методов, основанных на *предельном анализе* (Limited Analysis Method — LAM). Она объединяет методы, основанные на анализе предельных деформаций и основанные на анализе предельных на-

пряжений. Последние, в свою очередь, могут подразделяться на аналитические и численные. Появление компьютеров привело к развитию подходов, основанных на искусственных нейронных сетях, объединяемых с методиками расчета на основе клеточных автоматов в группу *имитационных методов*. Методики расчета, разрабатываемые под узкоспециализированные задачи, объединены в группу *специальных методов*. Две последние группы включают методы *вероятностного анализа* и *гибридные* (в т.ч. и на основе ГИС-технологий).

Следует отметить, что группы методов расчета устойчивости склонов, которые постоянно развиваются и совершенствуются в связи с их интенсивным использованием (например, методы, основанные на анализе предельного равновесия и численные методы, основанные на законах механики сплошной среды), показывают достаточно хорошую сходимость в результатах моделирования устойчивости склонов.

Примеры результатов расчета устойчивости склонов

Для примера рассмотрим результаты расчета устойчивости склона, полученные методом конечных элементов (Finite Element Method — FEM) и методом общего предельного равновесия (General Limit Equilibrium — GLE). В качестве расчетного профиля был взят инженерно-геологический разрез нижней части склона северной экспозиции хребта Аибга (в районе урочища Ржаная Поляна Краснополянского поселкового округа г. Сочи). Полученные модели представлены на рис. 2, 3. Отношение между коэффициентами устойчивости (K_y), рассчитанными методами GLE ($K_y = 1,51$) и FEM ($K_y = 1,30$), составило примерно 1,16. Много это или мало? По мнению автора, результат, полученный методом GLE без оптимизации поверхности скольжения, завышен. Это, в свою очередь, может привести к необоснованному выводу об устойчивости потенциально

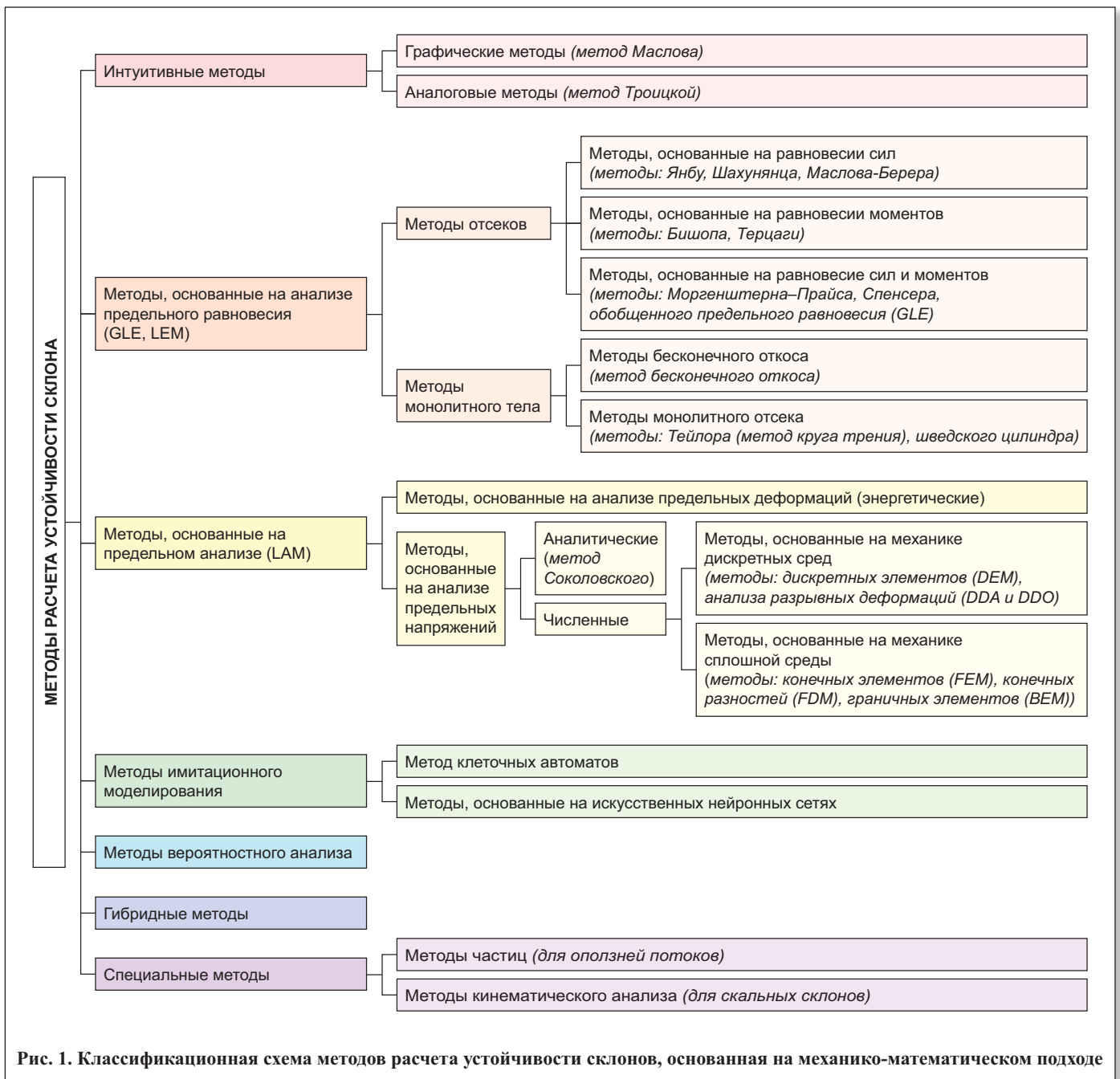


Рис. 1. Классификационная схема методов расчета устойчивости склонов, основанная на механико-математическом подходе

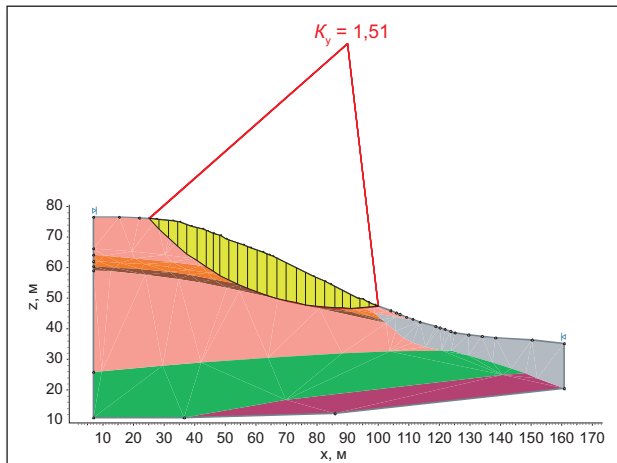


Рис. 2. Модель расчета устойчивости склона методом GLE ($K_y = 1,51$). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

оползнеопасного склона. В качестве примера ниже будет рассмотрено сравнение полученных результатов с итогами расчета методом GLE с использованием оптимизации поверхности скольжения (рис. 4, табл. 1).

Дополнительные возможности оценки устойчивости склона

Среди дополнительных возможностей оценки устойчивости склона стоит обратить внимание на такие направления, как: (1) оптимизация поверхности скольжения; (2) трехмерный анализ; (3) динамический анализ с учетом сейсмического воздействия; (3) вероятностный анализ.

Определение формы и пространственного положения критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом запаса остается одним из ключевых вопросов анализа устойчивости склонов.

На начальном этапе развития расчетов были определены простые виды поверхностей скольжения (ПС), по которым происходит возможное смещение оползневых тел: плоская, круглоцилиндрическая, в форме логарифмической спирали, заранее заданная сложная, блоковая. Нахождение критической поверхности скольжения (если она не задана априори) в методах предельного равновесия является многошаговым. На первом шаге определяется вероятная ПС и высчитывается коэффициент устойчивости склона. Эта процедура повторяется для целого ряда возможных ПС. В итоге поверхность скольжения с наименьшим коэффициентом устойчивости определяется как критическая. Однако в случае неоднородных склонов реальные ПС могут существенно отличаться от простых. Очень часто оптимальная плоскость скольжения контролируется стратиграфическими границами или приурочена к отдельным геологическим телам (основному деформирующему горизонту по В.В. Кюнцелю). Исследования последних лет выявили возможность инкрементального изменения частей поверхности скольжения [16, 17], в результате которого происходит снижение коэффициента устойчивости склона, а сама ПС при этом приобретает вид, отличный от простого. Данная техника минимизации коэффициента устойчивости за счет пошагового изменения частей вычисленной простой ПС получила название *оптимизации*

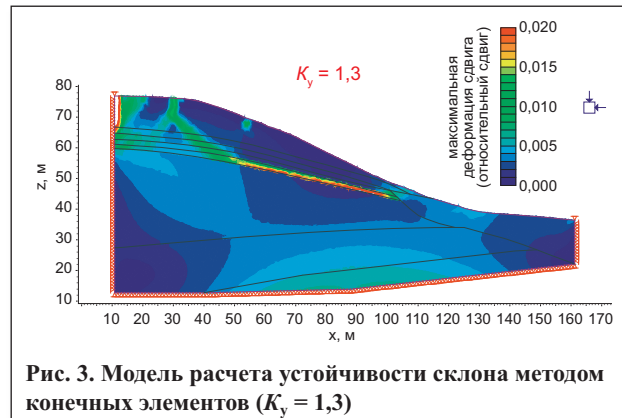


Рис. 3. Модель расчета устойчивости склона методом конечных элементов ($K_y = 1,3$)

плоскости скольжения. Ее основными методами при расчетах устойчивости склонов являются методы Монте-Карло, Греко, алгоритма имитации отжига (SA).

Модель расчета устойчивости модельного склона для оптимизированной поверхности скольжения, представленная на рис. 4, также выполнена для нижней части склона северной экспозиции хребта Аибга в районе урочища Ржаная Поляна Краснополянского поселкового округа. Анализ результатов расчета, полученных в этом случае для круглоцилиндрической и оптимизированной ПС методом GLE с результатами моделирования по методу FEM (см. табл. 1), позволяет сделать следующие выводы:

- разница между коэффициентами устойчивости, полученными в результате расчетов по круглоцилиндрической и по оптимизированной поверхности скольжения, составляет порядка 17%;
- коэффициент устойчивости, вычисленный для оптимизированной поверхности скольжения, практически равен K_y по FEM;
- зона максимальных сдвигающих деформаций, полученных в результате моделирования по FEM, по форме и положению близка к оптимизированной поверхности скольжения, полученной в результате расчета методом GLE;
- различие между результатами расчетов внутри группы методов предельного равновесия по круглоци-

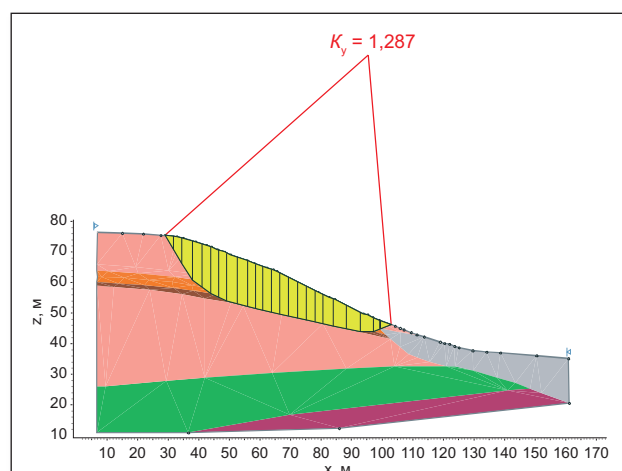


Рис. 4. Модель расчета устойчивости склона по оптимизированной поверхности (методом использования алгоритма имитации отжига (SA), $K_y = 1,287$). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

Таблица 1

Результаты расчетов по круглоцилиндрической и оптимизированной поверхностям скольжения и по методу конечных элементов				
Параметр	Расчетный метод			GLE/FEM
	GLE	Бишопа	Янбу	
K_y1 по круглоцилиндрической поверхности скольжения	1,510	1,507	1,497	1,16
K_y2 по оптимизированной поверхности скольжения	1,287	1,290	1,269	0,990
K_y1/K_y2	1,17	1,17	1,18	-

линдрической и по оптимизированной поверхности скольжения более значительны, чем между результатами расчета по оптимизированной ПС и моделирования по методу конечных элементов; зависимость коэффициента устойчивости от алгоритма поиска ПС в методах предельного равновесия связана с одним из существенных ограничений — отсутствием связи между силами (напряжениями) и смещениями (деформациями).

Важным и активно развивающимся направлением в расчетах устойчивости склонов является **трехмерный анализ** [13, 14]. Моделирование УС в 3D-варианте, бесспорно, более правильно и перспективно в сравнении с двумерными моделями, а преимущества, связанные с объемным анализом, очевидны. Укажем на некоторые из них.

Во-первых, в трехмерной постановке задачи поверхность скольжения моделируется (при условии однородности свойств грунтов) в виде сегмента сферы. Круглоцилиндрическая ПС при расчете в двухмерном варианте не является ее аналогом. С точки зрения механики рассматриваемая задача не может считаться плоской и, как следствие, не может корректно, без существенных допущений, решаться в двухмерной постановке.

Во-вторых, даже в случае допустимости применения двумерного варианта при расчете устойчивости склонов существует большое количество условий, которые необходимо соблюдать при решении задачи, например однородность геологического строения и топографическая однородность склона в направлении его простирания. Но на практике существует множество случаев, когда именно эти факторы оказывают су-

щественное влияние на устойчивость (например, тектонический разлом, пересекающий склон под углом, или срезка части склона при строительстве дорог и трубопроводов). Все это можно учесть только при построении трехмерной модели.

Третьим важным преимуществом трехмерной оценки устойчивости склонов является то, что такой расчет позволяет прогнозировать развитие оползневого процесса не только по глубине проникновения (в массиве), но и в плане. Это дает возможность более объективно оценивать риски, связанные с его пространственной активизацией.

Опыт автора в трехмерных расчетах устойчивости склонов основан на бета-тестировании программного продукта SVSlope 3D, разработанного канадской компанией SoilVisionSystems.

В процессе моделирования при расчетах устойчивости склонов в трехмерной постановке автором были использованы следующие методы:

- метод Янбу, относящийся к группе методов, удовлетворяющих равновесию сил;
- метод Бишопа, входящий в группу методов, удовлетворяющих равновесию моментов сил;
- метод Спенсера, относящийся к группе методов, удовлетворяющих общему равновесию сил и моментов.

В качестве алгоритма поиска критических поверхностей скольжения в трехмерной постановке был использован метод «entry and exit». Модели по методу Спенсера представлены на рис. 5–7. Результаты расчета с использованием трехмерного и двумерного моделирования представлены в табл. 2.

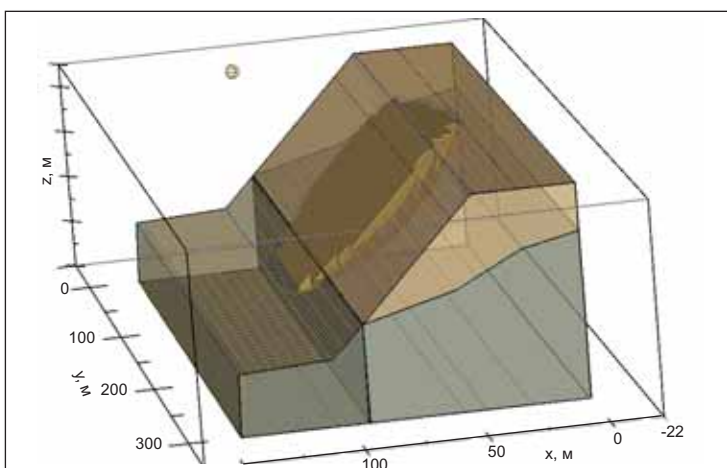


Рис. 5. Модель расчета устойчивости склона по методу Спенсера (3D-вариант). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

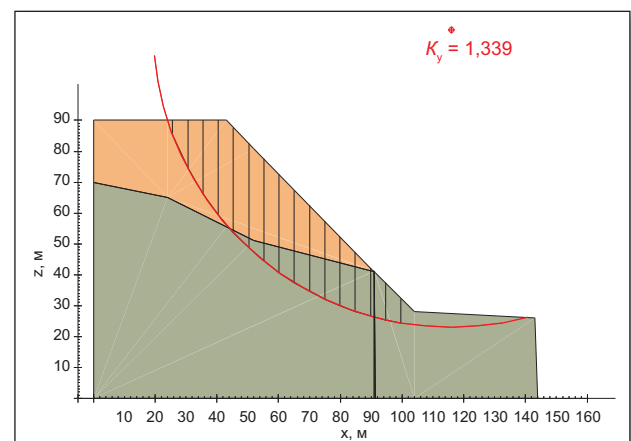


Рис. 6. Модель расчета устойчивости склона (3D-вариант) в 2D-проекции (по методу Спенсера). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

Таблица 2

Результаты расчета коэффициентов устойчивости при 3D- и 2D-моделировании			
Вариант расчета	Расчетный метод		
	Спенсера	Бишона	Янбу
3D	1,339	1,292	1,256
2D	1,272	1,256	1,224
3D/2D	1,053	1,029	1,026

Анализ полученных результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы: (1) критические поверхности скольжения, полученные в результате трехмерного и двухмерного моделирования, отличаются друг от друга; (2) коэффициенты устойчивости склона, полученные в результате трехмерного моделирования, выше K_y , полученных при решении задачи в плоской постановке.

Таким образом, по результатам проведенного бетатестирования можно подтвердить вывод А.У. Скемптона [15] о том, что в простых случаях для сопоставления результатов трехмерного и двухмерного моделирования может быть использована следующая зависимость:

$$K_y(3D) = 1,05K_y(2D), \quad (3)$$

где $K_y(3D)$, $K_y(2D)$ — коэффициенты устойчивости склона, полученные при 3D- и 2D-моделировании соответственно.

Зависимость (1) показывает, что в случае моделирования устойчивости склонов в трехмерной постановке происходит увеличение K_y на 5% по сравнению с результатами двухмерного расчета. Стоит отметить, что для склонов со сложной объемной геометрией, геологической структурой и гидрогеологической обстанов-

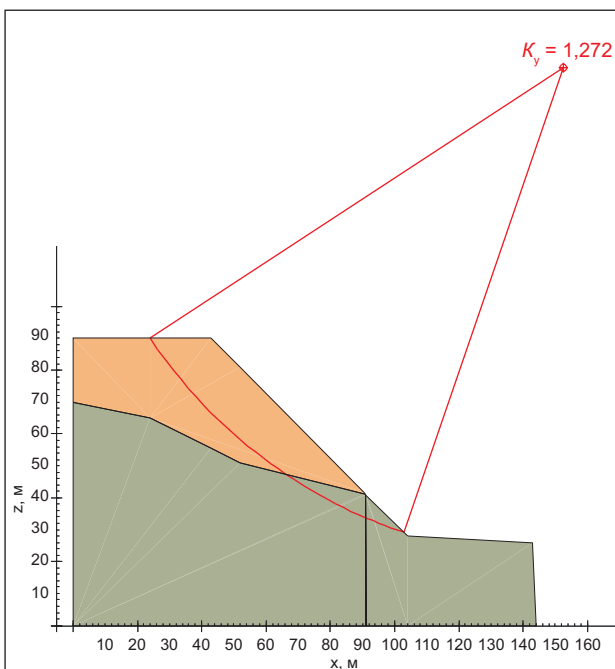


Рис. 7. Модель расчета устойчивости склона (2D-вариант) по методу Спенсера. Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

кой различие между двух- и трехмерными расчетами может составлять 20–30% [14].

Однако 3D-моделирование лишено таких важных инструментов, как вероятностный анализ, анализ чувствительности, оптимизация плоскости скольжения, методы динамического программирования и т.д., а развитие обладающих ими 2D-методов в настоящее время продвинулось далеко вперед. Остается надеяться, что весь арсенал дополнительных возможностей, разработанный для 2D-методов, со временем станет доступен и при 3D-моделировании.

Известно, что трехмерное моделирование, основанное на методах предельного равновесия, имеет ряд существенных ограничений. Во-первых, трехмерные методы анализа численно менее устойчивы в сравнении с двухмерными расчетами. На рисунке 8 приведен пример 3D-модели по методу Спенсера, где в качестве алгорит-

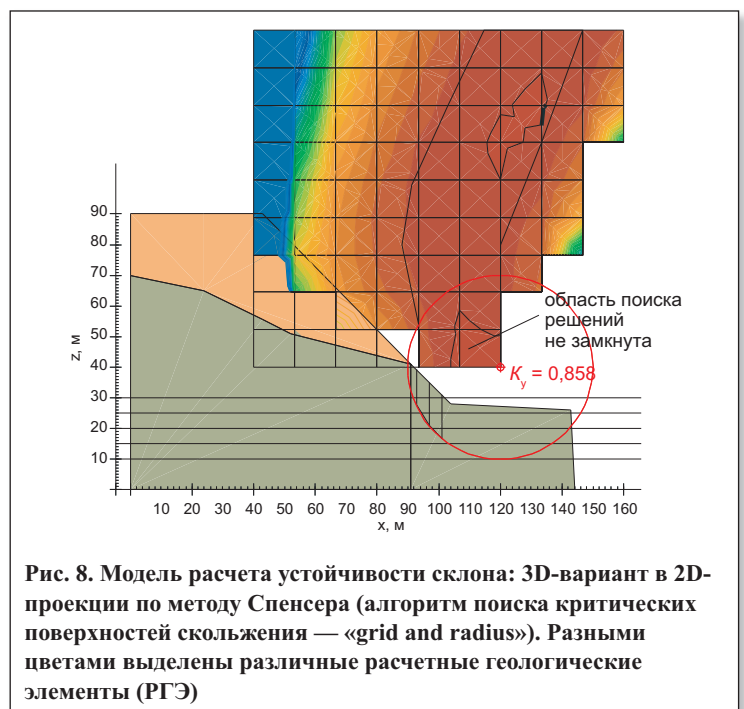


Рис. 8. Модель расчета устойчивости склона: 3D-вариант в 2D-проекции по методу Спенсера (алгоритм поиска критических поверхностей скольжения — «grid and radius»). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

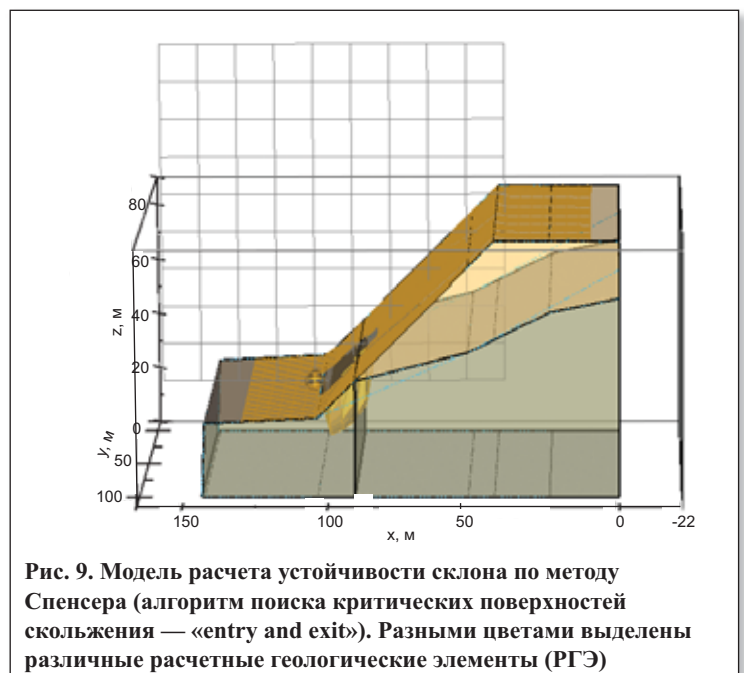


Рис. 9. Модель расчета устойчивости склона по методу Спенсера (алгоритм поиска критических поверхностей скольжения — «entry and exit»). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

ма поиска критических поверхностей скольжения был использован метод «grid and radius». Анализ полученных результатов показывает, что область поиска решений не замкнута, а решение существенно отличается от полученного по методу поиска «entry and exit» (рис. 9).

Во-вторых, необходимо помнить, что в общем случае решение задачи об устойчивости склонов методами предельного равновесия статически не определено. В частности, при использовании методов отсеков задача является статически определенной для каждого отдельного отсека, однако в отношении сил, действующих на их границах, возникает необходимость принятия тех или иных допущений. В настоящее время общепризнанным подходом для решения вопроса о величине и направлении сил, действующих на границах отсеков, является использование зависимости, предложенной Моргенштерном и Прайсом (1965 г.):

$$X = E \lambda f(x), \quad (4)$$

где $f(x)$ — функция связи между нормальной силой и силой сдвига на границе отсека; λ — коэффициент влияния величины нормальной силы на величину силы сдвига на границе отсека, д.ед.; E, X — соответственно нормальная сила и сила сдвига, действующие на границе между отсеками, Н.

Следует обратить внимание, что функция $f(x)$ может быть любой и методика ее определения лежит в большей степени в области философии, чем в области механики. Так как при трехмерном моделировании устойчивости склонов методами предельного равновесия неопределенность сил, действующих на границах отсеков, распространяется не на одно, а на два направления, получаемые в результате различия между результатами 2D- и 3D-расчетов частично будут определяться используемой зависимостью между этими силами.

Другим важным фактором при образовании оползней является *сейсмическая активность Земли*, когда землетрясения являются «спусковыми крючками» для оползней. Сейсмическая нагрузка при оценке устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов может быть учтена на основе использования псевдостатического и динамического анализов [16].

При *псевдостатическом анализе* эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительной силы, действующей на расчетный отсек склона и определяемой следующим образом:

$$F = aW / g = kW, \quad (5)$$

где a — горизонтальное (вертикальное) сейсмическое ускорение, m/c^2 ; g — ускорение свободного падения, m/c^2 ; W — вес грунта в расчетном отсеке, Н; k — коэффициент сейсмичности.

При *динамическом анализе* расчет основан на данных акселерограмм, что позволяет принимать во внимание продолжительность и интенсивность землетрясения. Данный метод дает более реалистичную оценку результатов сейсмического воздействия на потенциально неустойчивый склон. В основе динамического анализа лежит конечно-элементное решение уравнения движения, опирающееся на концепцию анализа оползневой устойчивости Ньюмарка (1965 г.).

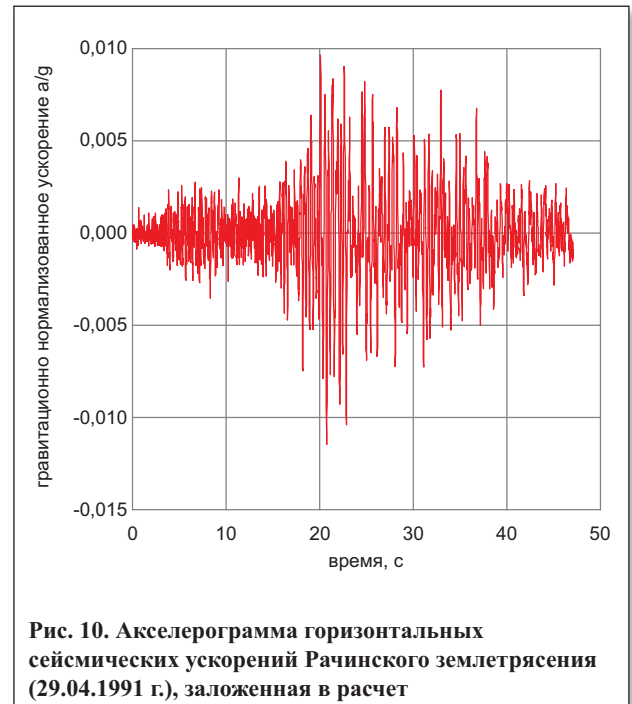


Рис. 10. Акселерограмма горизонтальных сейсмических ускорений Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.), заложенная в расчет

Проведение анализа по описываемому методу требует данных по динамической стабильности склона, которая количественно определяется как критическое (пороговое) ускорение основания a_c , необходимое для преодоления силы трения покоя и начала движения.

В качестве примера был выполнен расчет устойчивости оползневой склона на Краснополяском геодинамическом полигоне с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа с использованием данных по Рачинскому землетрясению (имевшему магнитуду поверхностных волн $M_s = 6,9$, магнитуду по Канамори $M_w = 6,8$, глубину очага $H = 5$ км), произошедшему 29.04.1991 г. В рассматриваемом регионе это было самое последнее сильное землетрясение. Использовалась его запись, сделанная на станции Akhal-kalaki (расположенной в 115 км от его эпицентра). Акселерограмма этого землетрясения, использованная при расчете, приведена на рис. 10. Итоговые геомеханические схемы с результатами оценки устойчивости указанного склона на основе псевдостатического и динамического анализов приведены на рис. 11, 12.

Анализ полученных расчетных данных позволяет сделать следующие выводы:

- коэффициент устойчивости, полученный в результате динамического анализа, ниже, чем при псевдостатическом расчете;
- зависимость между сейсмическим ускорением и коэффициентом устойчивости при динамическом анализе носит нелинейный характер, тогда как при псевдостатическом расчете она линейна;
- учитывая функцию зависимости коэффициента устойчивости от величины сейсмического ускорения, можно предположить, что при возрастании интенсивности сейсмического воздействия величина K_y по результатам псевдостатического расчета станет меньше, чем значение K_y по данным динамического анализа.

Вероятностный метод анализа [6, 16] устойчивости склонов приобретает актуальность в мировой практике и все больше применяется с ростом понимания



дискретности (по существу, случайности) имеющих в распоряжении рядов значений физико-механических характеристик грунтов, полученных в ходе инженерно-исследовательских работ. Учитывая широкий спектр колебаний таких характеристик, вероятностный метод, связанный, кроме всего прочего, с прогнозом их изменений, позволяет взглянуть на анализ оползневой опасности склонов более универсально, под новым углом зрения.

Консервативные, детерминистические методы расчетов устойчивости склонов, применяемые в отечественной практике, учитывают изменчивость свойств грунтов лишь опосредованно, через использование в математических моделях их расчетных (в статистической терминологии) значений. Полученные на основании подобных расчетов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень риска, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними, их вероятностью и, соответственно, вероятностью развития оползневой опасности. Вероятностные же методы расчетов позволяют выполнить полный анализ оползневой опасности и использовать его результаты для решения множества практических задач. Сущность такого анализа заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон.

Вероятностный подход к оценке устойчивости склонов подразумевает, что в условиях существующей изменчивости плотности и прочности грунтов в массиве риск развития оползневой опасности на склоне с большим K_y необязательно будет меньше такового при меньшем K_y . Например, склон с коэффициентом устойчивости 1,5 и его стандартным отклонением $\sigma_K = 0,5$ имеет более высокую вероятность движения, чем склон с $K_y = 1,2$ и $\sigma_K = 0,1$.

Для оценки устойчивости склонов при вероятностном анализе используется показатель надежности β , который, по сути, является коэффициентом устойчивости, стандартизованным по дисперсии:

$$\beta = (K_y - 1,0) / \sigma_K. \quad (6)$$

Из двух склонов большую устойчивость и меньшую вероятность движения имеет тот, у которого значение β выше. Если известна форма вероятностного распределения, то показатель надежности может напрямую относиться к вероятности развития оползневой опасности [16]. На рисунке 13 показана взаимосвязь между β и вероятностью развития оползневой опасности для нормально распределенного коэффициента устойчивости.

В качестве примера вероятностного анализа оползневой опасности рассмотрим расчеты устойчивости склонов долины реки Хоямбусибин на о. Сахалине, пересекаемых трубопроводами двух крупных нефтегазовых проектов — «Сахалин-1» и «Сахалин-2». Работы проводились в 2004 году в рамках разработки проекта программы мониторинга оползневых и оползнеопасных участков на трассах этих трубопроводов.

Расчеты были выполнены по методу Моргенштерна и Прайса, удовлетворяющему общему равновесию моментов и сил. Полученные модели представлены на рис. 14, 15. Значения параметров, приведенные в табл. 3, на-

глядно демонстрируют различия между детерминистическим и вероятностным подходами к оценке устойчивости склонов № 1 и № 2. Детерминистические расчеты, основанные на средних значениях характеристик грунтов при общей устойчивости обоих склонов ($K_y > 1$), указывают на большую устойчивость второго склона ($K_y = 2,75$) по сравнению с первым, в то время как вероятностные расчеты, основанные на частных значениях физико-механических характеристик, говорят о противоположном. Это в первую очередь связано с тем, что расчетный профиль № 1 сложен грунтами, ранее не затронутыми оползневой процессом. Как следствие, их свойства достаточно однородны. Грунты расчетного склона № 2 представлены делювиальными образованиями и, как

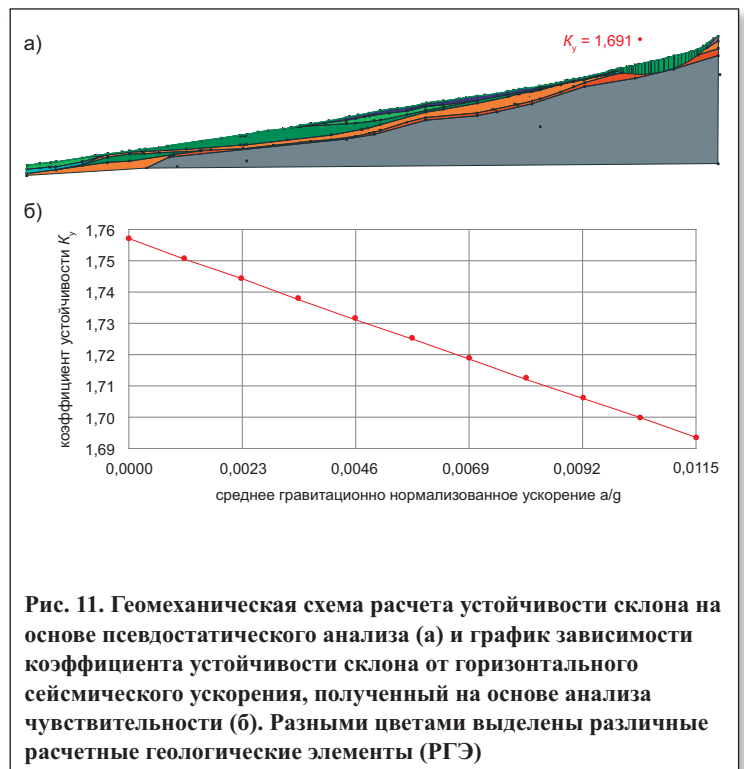


Рис. 11. Геомеханическая схема расчета устойчивости склона на основе псевдостатического анализа (а) и график зависимости коэффициента устойчивости склона от горизонтального сейсмического ускорения, полученный на основе анализа чувствительности (б). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

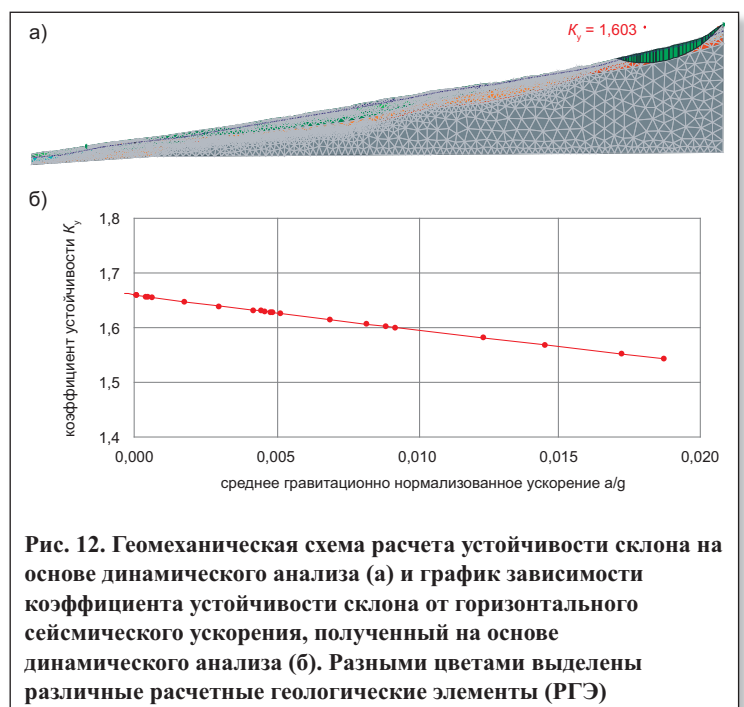


Рис. 12. Геомеханическая схема расчета устойчивости склона на основе динамического анализа (а) и график зависимости коэффициента устойчивости склона от горизонтального сейсмического ускорения, полученный на основе динамического анализа (б). Разными цветами выделены различные расчетные геологические элементы (РГЭ)

Таблица 3

Результаты вероятностных расчетов устойчивости склонов					
№ расчетного профиля (склона)	Средний коэф-фициент устойчи-вости склона K_y	Вероятностные параметры для анализа риска образования оползня по поверхности скольжения, захватывающей трубопровод*			
		K_{\min}	K_{\max}	β	$f_k, \%$
1	1,29	1,08	1,58	5,01	0,00
2	2,75	0,11	7,38	1,47	6,97

* K_{\min} — минимальный коэффициент устойчивости; K_{\max} — максимальный коэффициент устойчивости; β — показатель надежности; f_k — вероятность развития оползневого процесса.

следствие, характеризуются значительным разбросом их физико-механических свойств. При отсутствии какой-либо вероятности движения грунта на склоне № 1 вероятность перехода склона № 2 в состояние предельного равновесия ($K_y = 1$) составляет порядка 7%.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- детерминистические расчеты, основанные на средних значениях показателей свойств грунтов при общей устойчивости обоих склонов ($K_y > 1$), указывают на большую устойчивость склона № 2 ($K_y = 2,75$);
- вероятностные расчеты, основанные на частных значениях физико-механических характеристик, говорят совсем о противоположном: при отсутствии

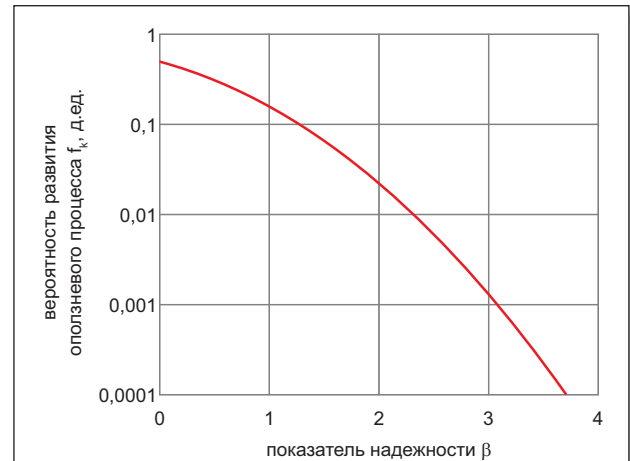


Рис. 13. Взаимосвязь между показателем надежности и вероятностью развития оползневого процесса для нормально распределенного коэффициента устойчивости склона [16]

вероятности движения грунта на склоне № 1 ($\beta = 5,01$) вероятность активизации оползневого процесса на склоне № 2 составляет порядка 7% ($\beta = 1,47$). Закономерен вопрос: насколько такая вероятность реализации опасного события допустима? Для ответа на него стоит обратиться к понятию приемлемого риска, концепция которого широко представлена в специальной и методической литературе.

Необходимо отметить, что в рамках данной работы были рассмотрены дополнительные возможности ана-

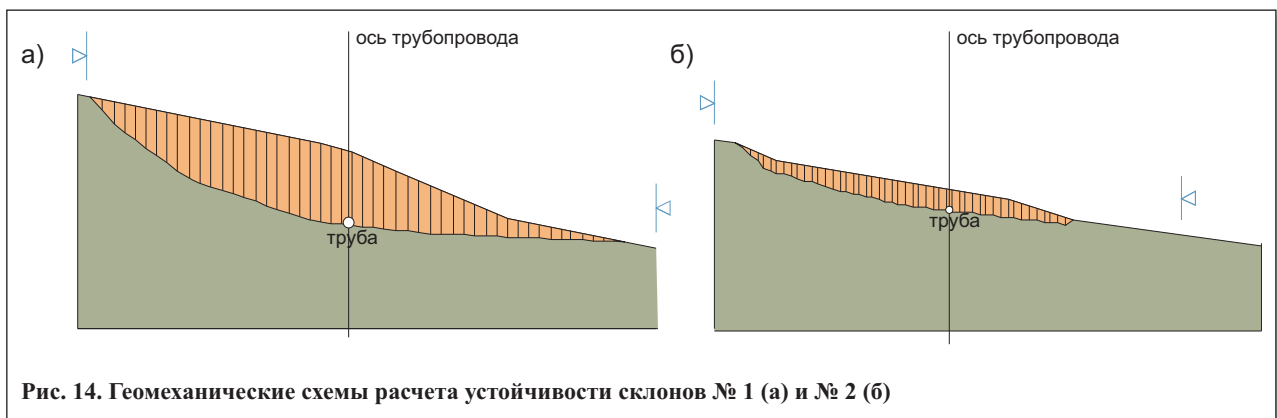


Рис. 14. Геомеханические схемы расчета устойчивости склонов № 1 (а) и № 2 (б)

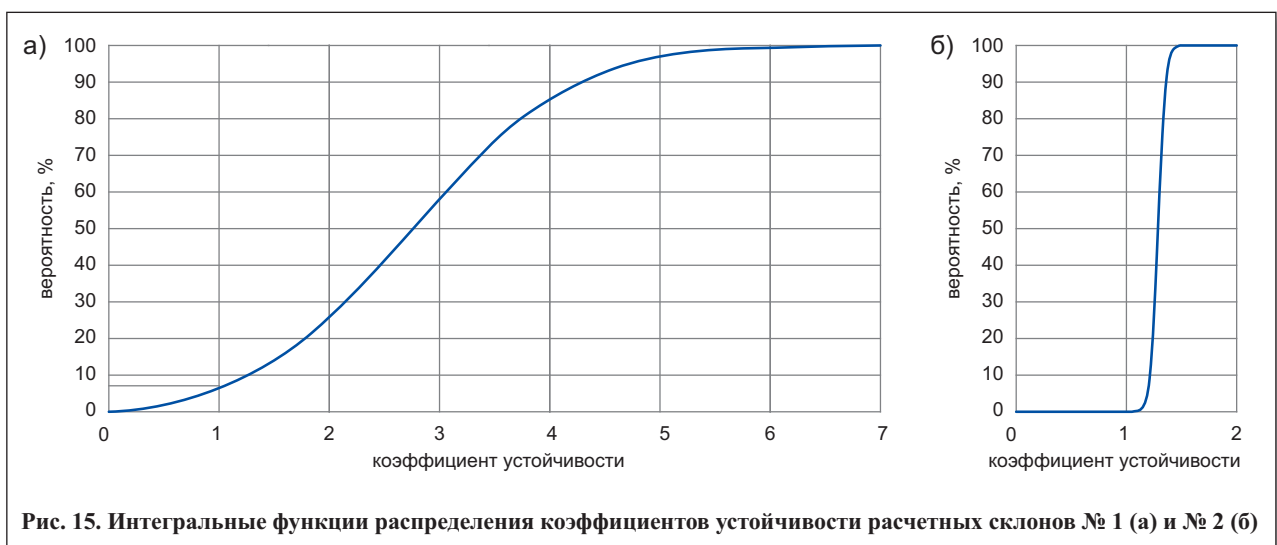


Рис. 15. Интегральные функции распределения коэффициентов устойчивости расчетных склонов № 1 (а) и № 2 (б)



лиза устойчивости склонов, реализованные в классе методов предельного равновесия. Однако такие возможности, как трехмерный, динамический и вероятностный анализ при расчетах УС, реализованы и в классе численных методов.

Заключение

Таким образом, в настоящее время существует достаточно много подходов к расчету устойчивости склонов, что, в свою очередь, требует понимания применимости тех или иных методов. С этой целью автор предлагает разработать классификацию методов расчета УС, основанную на механико-математическом подходе к решению задачи. В настоящей статье приведена принципиальная авторская схема этих методов в качестве первого шага к разработке подобной классификации. При этом необходимо отметить, что использование современных возможностей анализа устойчивости склонов позволяет значительно повысить достоверность результатов ее расчета.

Как было показано в статье, применение процедуры оптимизации поверхности скольжения позволяет существенно увеличить надежность получаемых результатов. Показательным является тот факт, что различие между результатами расчетов внутри группы методов предельного равновесия по круглоцилиндрической и по оптимизированной поверхности скольжения оказываются более значительными, чем между результатами расчетов по оптимизированной ПС и моделирования по методу конечных элементов.


Несмотря на большие перспективы использования при расчете УС трехмерного анализа, выявлено, что использование методов предельного равновесия имеет ряд существенных ограничений.

Главным недостатком трехмерного моделирования устойчивости склонов методами предельного равновесия, по мнению автора, является то, что неопределенность сил, действующих на границах отсеков, распространяется не на одно, а на два направления и получаемые в результате различия между результатами 2D- и 3D-расчетов частично будут определяться используемой зависимостью между этими силами.

Применение динамического анализа при расчете УС позволяет дать более реалистичную оценку результатов сейсмического воздействия на потенциально неустойчивый склон. В отличие от псевдостатического анализа при использовании динамического анализа зависимость между коэффициентом устойчивости и сейсмическим ускорением носит нелинейный характер.

Применение вероятностного анализа позволяет взглянуть на проблему расчета устойчивости по-новому. Показательным является то, что при его использовании возможен случай, когда склон с большим расчетным значением K_y может иметь более высокую вероятность развития оползневой опасности, чем склон с меньшей величиной K_y . Вероятностный анализ при расчете УС делает доступным проведение полного анализа оползневой опасности (в терминах вероятности активизации процесса).

Однако, несмотря на развитие методов расчета устойчивости склонов, обеспечение их достаточной надежности еще далеко до завершения.

Хотелось бы надеяться, что описанные в данной статье подходы к количественной оценке устойчивости склонов найдут широкое применение в отечественной практике расчетов и войдут в актуализированные версии нормативных документов. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А.М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. М.: Недра, 1973. 232 с.
2. О техническом регулировании / Федеральный закон № 184 ФЗ от 27.12.2002. М.: ГД ФС РФ, 2002.
3. Левзнер М.Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах. М.: Недра, 1978. 255 с.
4. Попов И.И., Шпаков П.С., Поклад Г.Г. Устойчивость породных отвалов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1987. 224 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 РФ, 2000.
6. Сысоев Ю.А., Фоменко И.К. Вероятностный анализ оползневой опасности // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса: Черноморье, 2011. С. 93–99.
7. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. М.: Стройиздат, 1962. 204 с.
8. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 380 с.
9. Фоменко И.К., Сироткина О.Н., Самаркин-Джарский К.Г. Расчет устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения», 23–24 марта 2010 г. Вып. 12. М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 234–240.
10. Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Комплексная методика расчета устойчивости склонов // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований-2011». Одесса: Черноморье, 2011. С. 88–96.
11. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1983. С. 240.
12. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. Slope stability and stabilization methods. New York, USA: John Wiley & Sons, 2002. 736 p.
13. Fomenko I.K., Zerkal O.V. Tree-dimensional slope stability analysis // Proceeding of the Workshop on Soil-Structure Interaction and Retainig Walls (Technical Meeting TC207), 6–8 October 2011, Dubrovnic — Zagreb, Croatia, 2011. P. 125–128.
14. Gitiрана G.(Jr.), Santos M.A., Fredlund M. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide // Proceedings of the GeoCongress'2008, New Orleans, 9–12 March 2008. New Orleans, 2008. P. 5.
15. Skempton A.W. Residual strengths of clays landslides, folded strata and the laboratory // Geotechnique. 1985. V. 35. № 1. P. 3–18.
16. Stability modeling with SLOPE/W 2007. An engineering methodology. Second Edition. GEO-SLOPE International Ltd., 2007. P. 396.
17. SVOOffice 2006. User's and theory guide. Saskatoon, SK, Canada. SoilVision Systems Ltd., 2007. P. 815.