



ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ASSESSMENT OF LANDSLIDE SLOPE STABILITY ON THE BASIS OF 3D MODELING

ГАВРИЛОВ А.В.

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
gavrilov1alex@gmail.com

GAVRILOV A.V.

Postgraduate student of the engineering and ecological geology department
of the geology faculty of the Lomonosov Moscow State University,
gavrilov1alex@gmail.com

Ключевые слова:

оползень; оценка устойчивости склонов; двумерное моделирование; трехмерное моделирование; коэффициент устойчивости; дефицит устойчивости; расчетный метод Ховланда.

Key words:

landslide; slope stability assessment; two-dimensional modeling; three-dimensional modeling; stability factor; stability deficit; Hovland's computational method.

Аннотация

В статье рассматриваются двух- и трехмерные расчеты устойчивости склонов и проводится их сравнение. Также описываются преимущества трехмерного метода расчета перед двумерным. Рассмотрена полученная автором схема распределения дефицита устойчивости оползневого тела.

Введение

В настоящее время трехмерное моделирование находит все большее применение как в геологии в целом, так и в инженерной геологии в частности. В связи с этим встает вопрос о возможности использования получаемых на его основе данных в практических целях. В других отраслях геологии (гидрогеологии, поисках и разведке полезных ископаемых и др.) трехмерное моделирование уже заняло лидирующие позиции как способ представления данных и их обработки.

Данная работа посвящена применению трехмерного моделирования для оценки устойчивости склонов. Ее основной целью является сравнение методов трехмерного расчета устойчивости оползневых тел с уже рекомендовавшими себя методами оценки устойчивости в плоском сечении.

Характеристика инженерно-геологических условий оползневого участка

Сравнение трехмерных и двумерных методов расчета устойчивости склона и оценка возможности применения первых проводились на примере оползневого участка, находящегося в районе северных порталов комплекса тоннелей № 3 совмещенной (автомобильной и железной) дороги Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» (в нижней части северного склона горы Высокая в пределах левого борта долины реки Мзымта в ее среднем течении напротив впадения реки Кепша). В геологическом строении этого участка принимают участие отложения нижнего отдела меловой системы, а также четвертичные (рис. 1).

Меловые апт-альбские отложения на склоне практически целиком перекрыты оползневыми телами, а стенки отрыва оползней — делювиальными грунтами значительной мощности. Толща меловых отложений имеет циклическое строение и представлена ритмично чередующимися мергелями, алевритами и глинистыми мергелями, которые падают в сторону склона. По своему стратиграфическому объему эти грунты соответствуют

Abstract

The article discusses and compares two- and three-dimensional slope stability calculations. It also describes advantages of the three-dimensional computational method over the two-dimensional one. A scheme of distribution of landslide body stability deficit that was constructed by the author is considered.



свите Кепш (K_1kr). К меловым отложениям приурочены трещинные воды, которые встречаются в зонах повышенной трещиноватости. Эти воды, как правило, слабонапорные. Величина напора в среднем составляет 4–5 м.

Четвертичные грунты оползневого участка представлены современными делювиальными и оползневыми отложениями, перекрывающими свыше 80% склона, а также современным аллювием.

Современные аллювиальные отложения приурочены к руслу и пойме реки Мзымта. Они представлены галечниковыми и валунно-галечниковыми грунтами с песчано-супесчано-суглинистым заполнителем. Их мощность — от первых метров до 25 м и более. К аллювиальным отложениям приурочен водоносный горизонт, который распространен в русловой и пойменной части долины Мзымты. Его воды либо безнапорные, либо имеют местный незначительный напор.

Оползневые отложения представляют собой смесь из обломков и целых блоков меловых пород, суглинков и глин различной консистенции с содержанием обломочного материала от 0 до 30%, дресвяных и щебнистых грунтов с различным количеством заполнителя. Переслаиваются эти грунты без всякой закономерности. Их мощность достигает 32 м.

Поверхность скольжения по данным бурения представляет собой грунт от суглинка до глины с дресвой и щебнем мергеля (до 10–15%) от мягкопластичной до текучей консистенции. Ниже грунтов зоны скольжения залегают мергели апт-альбского яруса с элементами залегания, характерными для коренных отложений, а выше — дресвяно-щебнистые грунты и отдельные блоки меловых пород. К крупнообломочным прослоям и линзам в зоне скольжения, а также к дресвяно-щебнистым грунтам выше поверхности скольжения приурочены водопроявления, которые были отмечены при бурении.

В современных оползневых отложениях выделено несколько водоносных горизонтов — как безнапорных,

так и с небольшим напором. Водовмещающими породами являются линзы и прослои щебнистых и дресвяных грунтов. Водоносные горизонты невыдержанны, часто не связаны между собой.

Питание водоносных горизонтов в оползневом массиве происходит как за счет инфильтрации атмосферных осадков, так и за счет разгрузки трещинных вод из подстилающих пород мелового возраста.

Делювиальные отложения распространены на оползневом участке локально и представлены суглинками и глинами с включением дресвы и щебня. Их мощность изменяется от 1,5 до 15,0 м.

Исследуемое оползневое тело находится непосредственно в районе северных порталов вышеуказанного комплекса тоннелей. Оползень характеризуется блоковым строением и имеет протяженность по оси смещения 170 м при ширине до 100 м. Его общий объем достигает 200 тыс. м³ (рис. 2). Вблизи стенки отрыва и нижней части оползневой массы отмечаются признаки оползневой активности (трещины отрыва, «пьяный лес» и др.).

Схематизация инженерно-геологических условий

Для расчетов и анализа устойчивости оползневой массы необходимо перейти от описания природной ситуации к упрощенной схеме, подходящей для выполнения расчетов, путем схематизации инженерно-геологических условий оползневой массы.

Исходя из описанных выше инженерно-геологических условий и данных, полученных при изучении оползневой массы и прилегающего к нему участка склона, в модели было выделено два объекта — само оползневое тело и окружающий его массив.

Построение трехмерной модели оползневой массы основывается на следующих положениях:

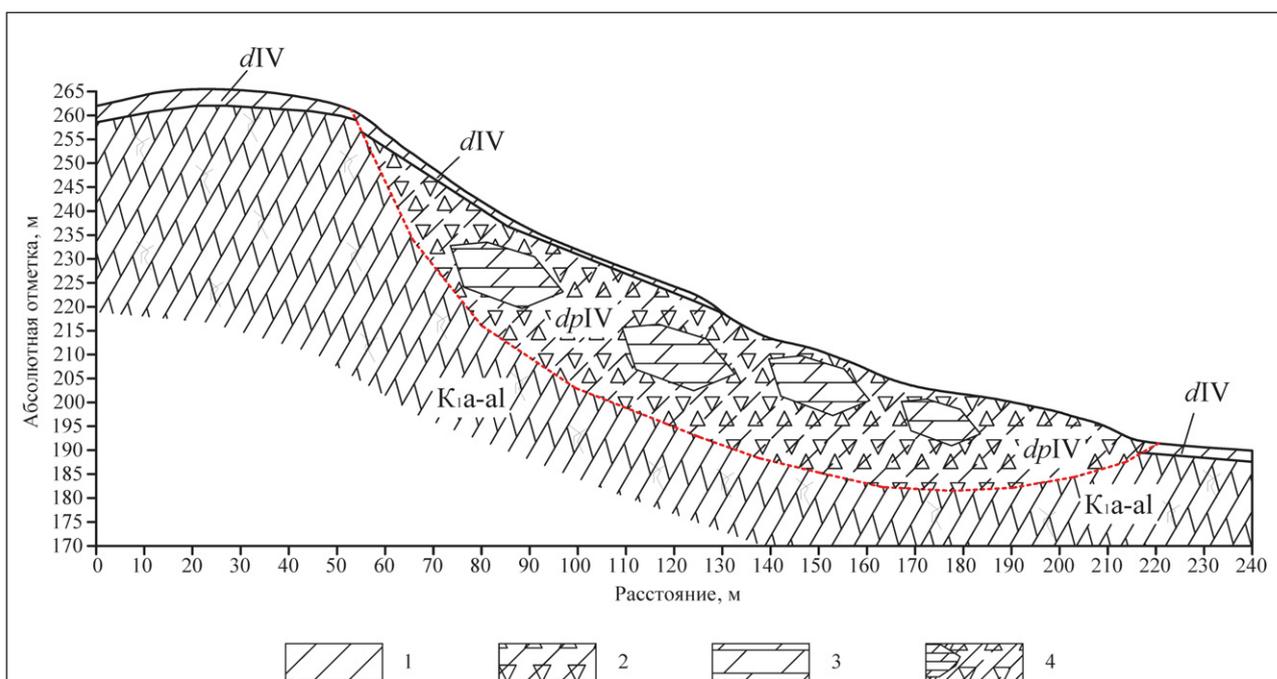


Рис. 1. Схематический разрез I—I (рис. 2) оползневой массы: 1 — суглинок, 2 — суглинок щебнистый, 3 — мергель, 4 — обломки и глыбы мергелей в суглинках щебнистых

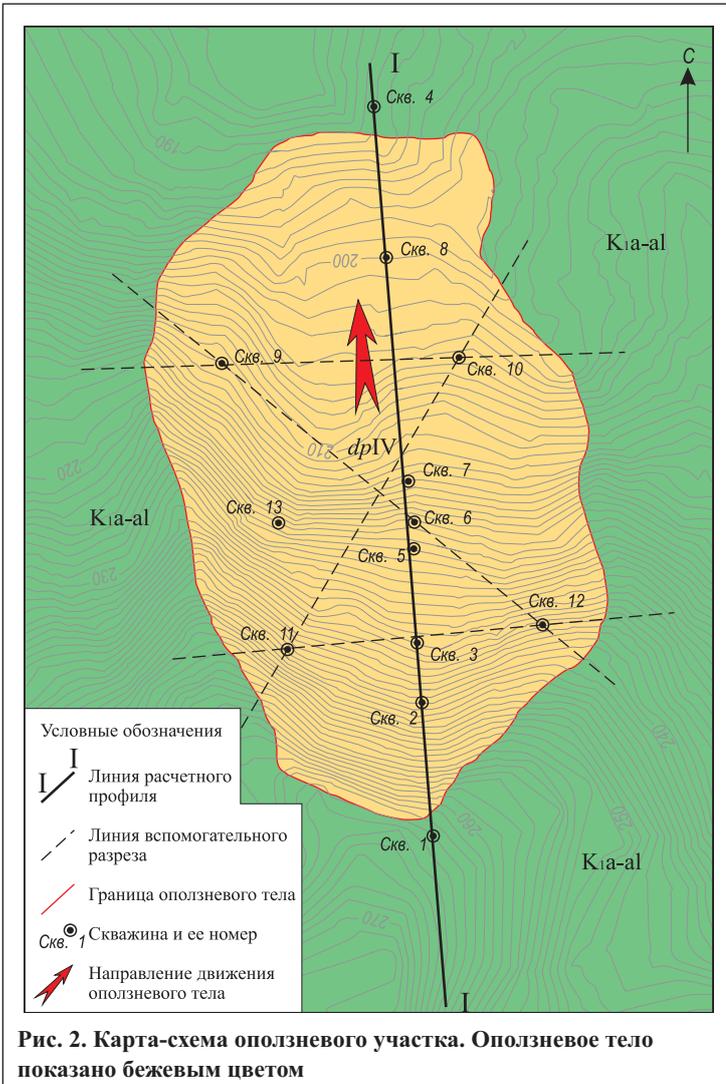


Рис. 2. Карта-схема оползневого участка. Оползневое тело показано бежевым цветом

- кровля оползневого тела в области его распространения совпадает с поверхностью рельефа;
- подошва оползневого тела совпадает с подошвой выделенной зоны скольжения;
- кровля меловых отложений совпадает с поверхностью рельефа вне области распространения оползневого тела и с подошвой зоны скольжения в этой области;
- наличие грунтовых вод в модели не учитывается.

На основе данных, полученных при геодезической съемке рассматриваемого участка, была построена модель поверхности рельефа (рис. 3).

Информация о поверхности скольжения оползневого тела была получена из двух различных источников — из описаний горных выработок и из результатов съемки, на основе которой было с достаточной точностью околонушено оползневое тело. В разрезе зона скольжения выделялась по следующим характерным признакам:

- переход от неоднородной дезинтегрированной толщи суглинков и глин с обломками и блоками мергелей к однородно слоистой (под углом $60-70^\circ$ к оси керна) толще мергелей;
- наличие глин и суглинков от мягкопластичных до текучих, располагающихся выше толщи мергелей, аналогичной по элементам залегания коренным отложениям (по данным геологических карт района);
- обводнение отложений выше зоны скольжения, а также непосредственно в этой зоне по линзам и прослоям крупнообломочных грунтов.

Кроме того, помимо расчетного профиля для наиболее правильного и обоснованного построения трехмерной поверхности скольжения было получено и учтено четыре вспомогательных профиля (см. рис. 2)

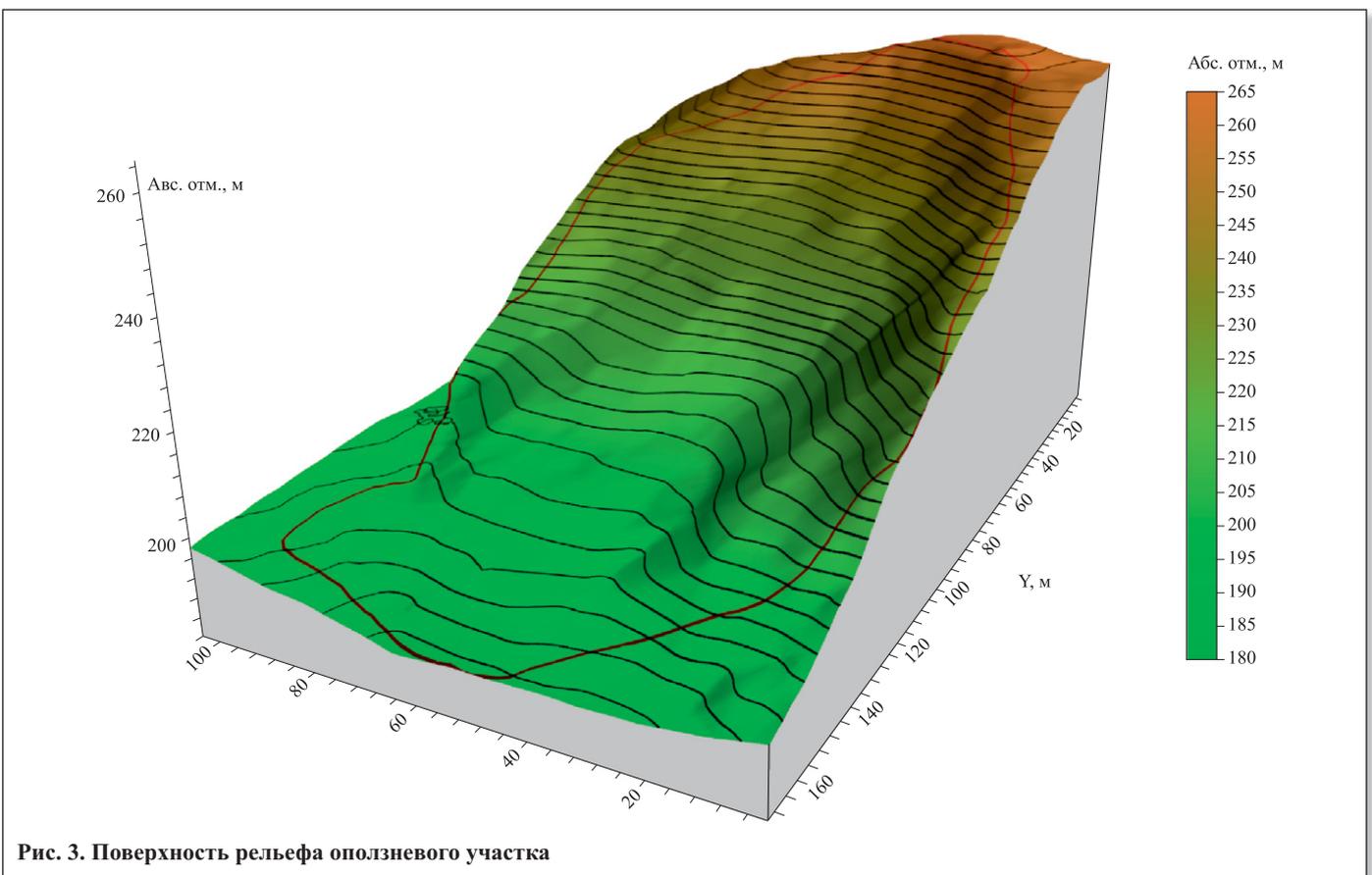


Рис. 3. Поверхность рельефа оползневого участка

Таблица 1

Свойства грунтов оползневого участка					
Тип грунта	Залегание	Плотность ρ , г/см ³	Угол внутр. трения ϕ , град.	Удельн. сцепл. c , кПа	Условия испытаний
Мергель	коренное	2,51	42	5050	Естественное состояние
			58	1750	Водонасыщенное состояние
	в оползневом теле	2,45	50	4450	Естественное состояние
			52	970	Водонасыщенное состояние
	в зоне скольжения	2,23	22	45	Естественное состояние
			16	12	Срез по подготовленной поверхности
Суглинок	в оползневом теле	2,21	22	70	Естественное состояние
			16	10	Срез по подготовленной поверхности
	в зоне скольжения	2,23	19	30	Естественное состояние
			16	5	Срез по подготовленной поверхности

В результате обобщения этих данных была построена поверхность скольжения оползневого тела, которая представлена на рис. 4.

Следующей задачей после построения поверхностей скольжения и рельефа в модели оползневого склона было определение свойств, необходимых для расчетов устойчивости в пространстве этой модели.

Исходя из геологического строения участка и консеквентного механизма смещения оползня, для апробации нового способа трехмерного расчета устойчивости склона было решено считать оползневое тело однородным, изотропным и сплошным, а перемещение — происходящим без разрыва его сплошности и

деформации. Так как поверхность скольжения неоднородна по своему строению (от глин и суглинков до крупнообломочных разностей), расчеты устойчивости проводились с использованием возможных максимальных, минимальных и промежуточных значений прочностных характеристик грунтов.

Каждое состояние грунта характеризуется своими значениями показателей его свойств (плотности, сцепления, угла внутреннего трения), необходимых для расчетов устойчивости. Кроме параметров, присущих естественному состоянию грунтов, были определены показатели их физико-механических свойств в «ухудшенных» условиях: для мергелей в коренном залегании —

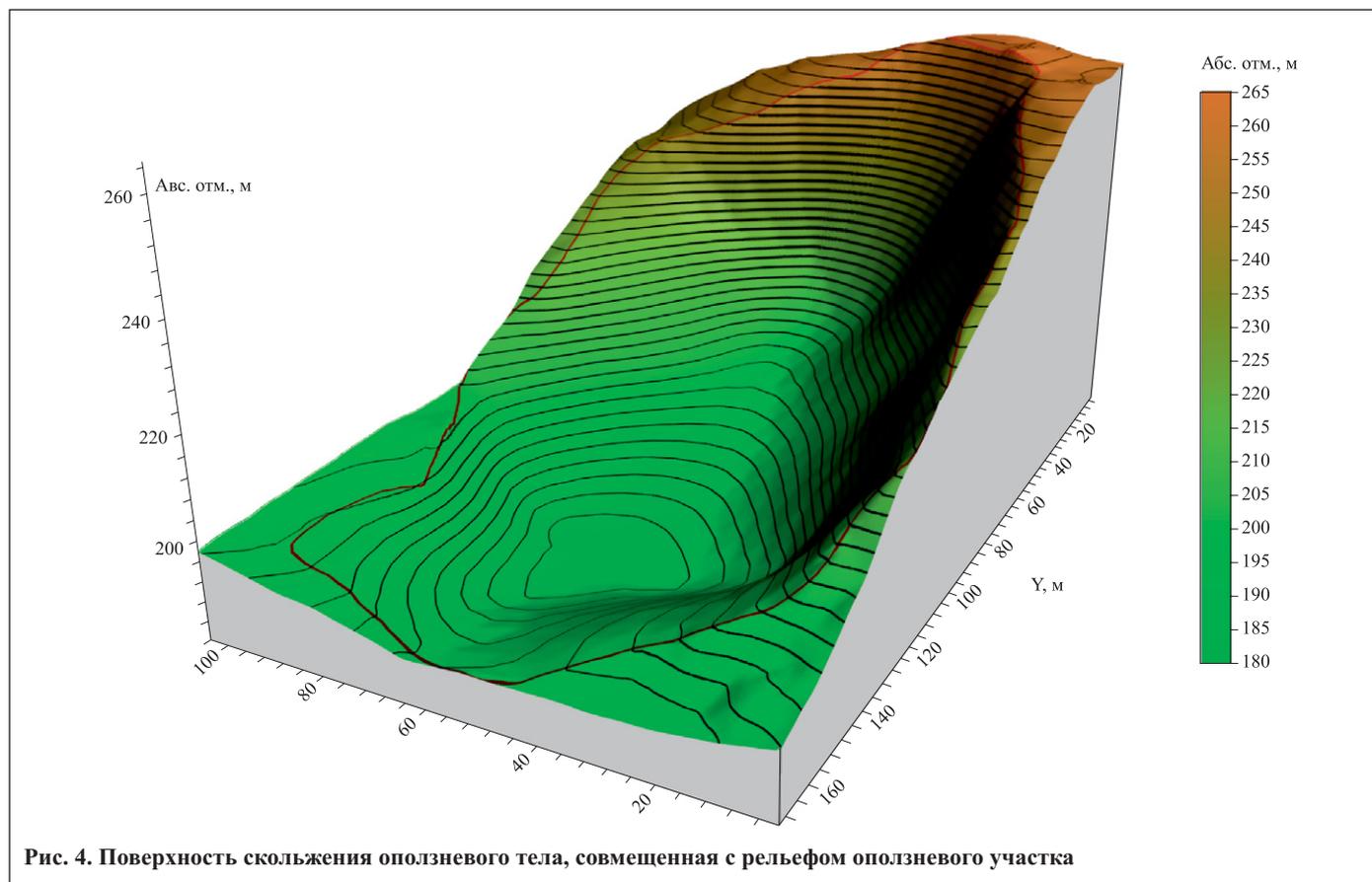


Рис. 4. Поверхность скольжения оползневого тела, совмещенная с рельефом оползневого участка

Таблица 2

Коэффициенты устойчивости оползневого тела, рассчитанные методом Ямбу при разбиении оползневого тела на 17 (в числителе) и 168 (в знаменателе) блоков								
Тип грунта	Залегание	Плотность ρ , г/см ³	Мергель		Суглинок			
			в зоне скольжения		в оползневом теле		в зоне скольжения	
			в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности
Мергель	коренное	2,51	$\frac{1,73}{1,77}$	$\frac{1,07}{1,08}$	$\frac{1,97}{2,02}$	$\frac{1,04}{1,06}$	$\frac{1,44}{1,47}$	$\frac{0,98}{0,99}$
	в оползневом теле	2,45	$\frac{1,74}{1,78}$	$\frac{1,07}{1,09}$	$\frac{1,98}{2,03}$	$\frac{1,04}{1,06}$	$\frac{1,45}{1,48}$	$\frac{0,98}{0,99}$
	в зоне скольжения	2,23	$\frac{1,78}{1,83}$	$\frac{1,08}{1,10}$	$\frac{2,04}{2,10}$	$\frac{1,05}{1,07}$	$\frac{1,47}{1,50}$	$\frac{0,98}{1,00}$
Суглинок	в оползневом теле	2,21	$\frac{1,79}{1,83}$	$\frac{1,08}{1,10}$	$\frac{2,05}{2,11}$	$\frac{1,05}{1,07}$	$\frac{1,48}{1,51}$	$\frac{0,98}{1,00}$
	в зоне скольжения	2,23	$\frac{1,78}{1,83}$	$\frac{1,08}{1,10}$	$\frac{2,04}{2,10}$	$\frac{1,05}{1,07}$	$\frac{1,47}{1,50}$	$\frac{0,98}{1,00}$

в увлажненном состоянии, для суглинков и мергелей из зоны скольжения — для подготовленной поверхности (результатов повторного среза) (табл. 1).

Для изучения влияния детальности разбиения оползневого тела на блоки на величину коэффициента устойчивости *при расчетах в плоском сечении* по разрезу, представленному на рис. 1, было произведено два разбиения: на 168 блоков (средней шириной 1 м) и на 17 блоков (средней шириной 10 м).

Трехмерный метод расчета устойчивости Ховланда основан на расширении предположений, связанных с двумерными методами. При его использовании все сдвигающие силы между колоннами, на которые разбито оползневое тело, игнорируются. Нормальные и сдвигающие силы, действующие в основании каждой колонны, получаются как компоненты веса последней. Еще одно предположение заключается в том, что существует движение только в одном направлении, и равновесие системы рассчитывается для этого направления.

Для трехмерного расчета устойчивости оползневое тело было разбито на 13 549 колонн размером в плане 1×1 м — так, чтобы две боковые грани каждой из них были параллельны направлению предполагаемого движения оползня. На рисунке 5 для наглядности приведено более простое разбиение оползневого тела на колонны размером в поперечнике 5×5 м. Каждая из них однородна и изотропна. Трехмерные расчеты были произведены так же, как и в двумерном случае, для всех сочетаний показателей свойств грунтов в зоне скольжения.

Расчет устойчивости оползневого тела

Расчеты устойчивости оползневого тела производились в два этапа: (1) с использованием двумерных методов; (2) с применением трехмерного метода Ховланда [2].

Так как поверхность скольжения оползневого тела, полученная по данным исследований, приближена в разрезе к круглоцилиндрической, то двумерные расчеты коэффициентов устойчивости оползневого тела,

разбитого на блоки, как было указано выше, производились двумя различными способами — методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения (Ямбу), который подразумевает равновесие всех сил, и методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения (Терцаги), который подразумевает равенство нулю моментов сил [1]. Коэффициенты устойчивости, рассчитанные методом Ямбу для всех сочетаний свойств грунтов, представлены в табл. 2.

На основе полученных результатов расчета методом Ямбу можно сделать следующие выводы.

1. Чем детальнее разбиение оползневого тела на блоки, тем больше получаемый коэффициент устойчивости. Однако разница в получаемых результатах не является существенной и достигает 12% при больших коэффициентах.

2. С ростом прочностных параметров «по поверхности скольжения» (т.е. с ростом коэффициента устойчивости) наблюдается увеличение разницы между результатами расчетов для двух разбиений (рис. 6).

Коэффициенты устойчивости, рассчитанные методом Терцаги для всех сочетаний свойств грунтов, представлены в табл. 3. На основе результатов расчетов с использованием этого метода можно сделать вывод, что разная детальность разбиения оползневого тела на блоки не дает существенного расхождения получаемых значений.

В процессе данного исследования было также проведено сравнение двух уже зарекомендовавших себя методов двумерного расчета устойчивости склона. В результате коэффициент устойчивости оползневого тела, рассчитанный методом Терцаги, меньше, чем полученный методом Ямбу, при любом разбиении и для всех сочетаний показателей свойств грунтов.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующий вывод. *Наблюдается повышение коэффициента устойчивости с уменьшением плотности пород при неизменных показателях прочностных характеристик.* Такую зависимость можно объяснить тем, что сдвигающие силы находятся в прямой зависимости от веса пород оползневого тела, т.е. с ростом плотности они увеличиваются. Плотность также влияет и на удерживающие силы.



живающие силы: при увеличении плотности повышается сила реакции опоры, а следовательно, и сила трения. Но рост удерживающих сил с увеличением плотности меньше, чем в случае со сдвигающими силами.

Трехмерный расчет коэффициента устойчивости оползневого тела был осуществлен методом Ховланда [2]. Общая схема сил, действующих на единичную колонну в трехмерном случае, изображена на рис. 7.

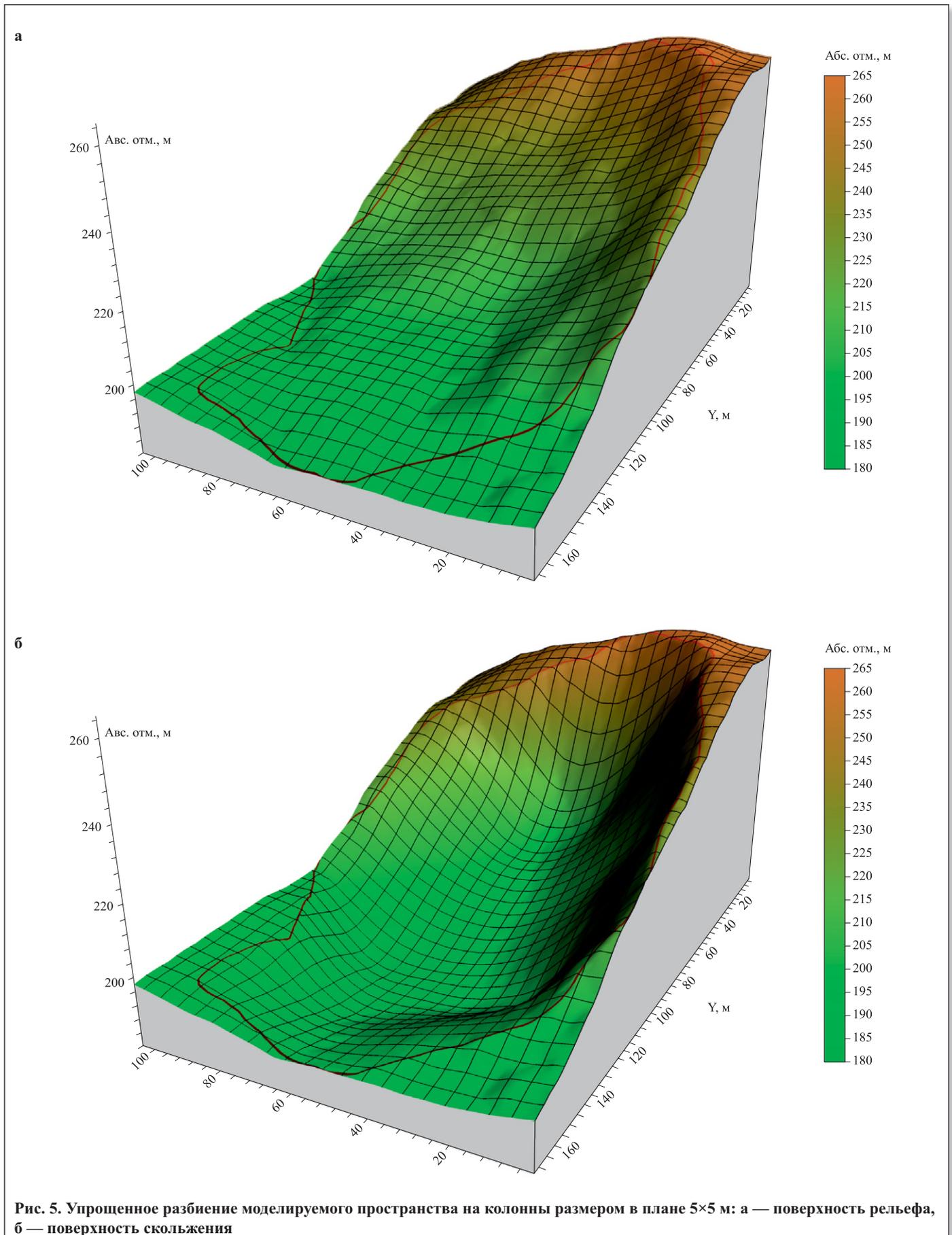


Таблица 3

Коэффициенты устойчивости оползневого тела, рассчитанные методом Терцаги при разбиении оползневого тела на 17 (в числителе) и 168 (в знаменателе) блоков								
Тип грунта	Залегание	Плотность ρ , г/см ³	Мергель		Суглинок			
			в зоне скольжения		в оползневом теле		в зоне скольжения	
			в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности
Мергель	коренное	2,51	$\frac{1,46}{1,45}$	$\frac{0,90}{0,89}$	$\frac{1,65}{1,64}$	$\frac{0,88}{0,88}$	$\frac{1,21}{1,20}$	$\frac{0,83}{0,82}$
	в оползневом теле	2,45	$\frac{1,46}{1,46}$	$\frac{0,90}{0,90}$	$\frac{1,66}{1,65}$	$\frac{0,88}{0,88}$	$\frac{1,21}{1,21}$	$\frac{0,83}{0,82}$
	в зоне скольжения	2,23	$\frac{1,50}{1,49}$	$\frac{0,91}{0,91}$	$\frac{1,71}{1,70}$	$\frac{0,89}{0,88}$	$\frac{1,23}{1,23}$	$\frac{0,83}{0,83}$
Суглинок	в оползневом теле	2,21	$\frac{1,50}{1,49}$	$\frac{0,91}{0,91}$	$\frac{1,71}{1,71}$	$\frac{0,89}{0,88}$	$\frac{1,24}{1,23}$	$\frac{0,83}{0,83}$
	в зоне скольжения	2,23	$\frac{1,50}{1,49}$	$\frac{0,91}{0,91}$	$\frac{1,71}{1,70}$	$\frac{0,89}{0,88}$	$\frac{1,23}{1,23}$	$\frac{0,83}{0,83}$

В методе, предложенном профессором Ховландом [2], коэффициент устойчивости рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{y3D} = \frac{\sum x \sum y [c A_3 + W \cos(DIP) \operatorname{tg} \varphi]}{\sum x \sum y W \sin \alpha_{xy}}$$

где $A_3 = \Delta x \Delta y [(1 - \sin^2 \alpha_{xz} \sin^2 \alpha_{yz})^{-0.5} / (\cos \alpha_{xz} \cos \alpha_{yz})]$; $\cos(DIP) = (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{xz} + \operatorname{tg}^2 \alpha_{yz})^{-0.5}$; $W = \gamma z \Delta x \Delta y$; α_{xz} , α_{yz} — углы наклона поверхности скольжения в плоскостях XZ и YZ соответственно, град.; c — удельное сцепление по поверхности скольжения, кН/м²; φ — угол внутреннего трения по поверхности скольжения, град.; Δx — размер единичной колонны вдоль оси X, м; Δy — размер единичной колонны вдоль оси Y, м; z — высота колонны, м; γ — удельный вес грунта, которым сложена колонна, кН/м³.

Результаты расчета коэффициентов устойчивости методом Ховланда представлены в табл. 4. Несложно заметить, что они в некоторых случаях больше, а в некоторых меньше коэффициентов, рассчитанных двумерными методами (здесь и далее сравнение проводится с результатами применения метода Терцаги при разделении оползневого тела на 168 блоков).

Для отслеживания различий между коэффициентами устойчивости, полученными трехмерными ($K_y 3D$) и двумерными ($K_y 2D$) методами, были вычислены отношения между ними $K_y 3D / K_y 2D$ для каждого использованного при расчетах сочетания показателей свойств грунтов (рис. 8). В результате анализа графика, представленного на рис. 8, можно заключить, что это отношение стремится к единице при состоянии предельного равновесия оползневого тела. Как видно из рисунка, при коэффициентах устойчивости, немного превышающих единицу (до 1,07), $K_y 3D < K_y 2D$, т.е. в

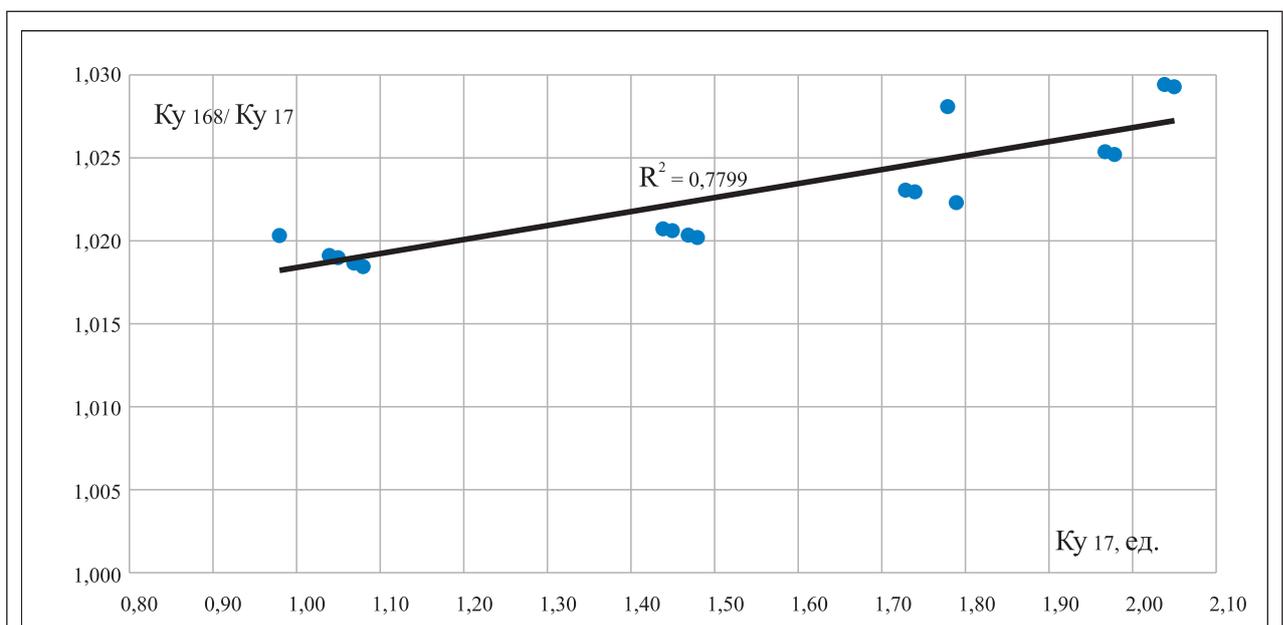


Рис. 6. Отношение коэффициентов устойчивости, рассчитанных методом Ямбу при разбиении на 168 (K_{y168}) и 17 (K_{y17}) блоков, в зависимости от величины K_{y17} . R^2 — коэффициент детерминации



Таблица 4

Коэффициенты устойчивости оползневого тела, рассчитанные трехмерным методом Ховланда								
Тип грунта	Залегание	Плотность ρ , г/см ³	Мергель		Суглинок			
			в зоне скольжения		в оползневом теле		в зоне скольжения	
			в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности	в естественном сложении	по подготовленной поверхности
Мергель	коренное	2,51	1,56	0,86	1,89	0,83	1,25	0,75
	в оползневом теле	2,45	1,58	0,86	1,92	0,84	1,26	0,75
	в зоне скольжения	2,23	1,64	0,88	2,01	0,85	1,29	0,76
Суглинок	в оползневом теле	2,21	1,64	0,88	2,02	0,85	1,30	0,76
	в зоне скольжения	2,23	1,64	0,88	2,01	0,85	1,29	0,76

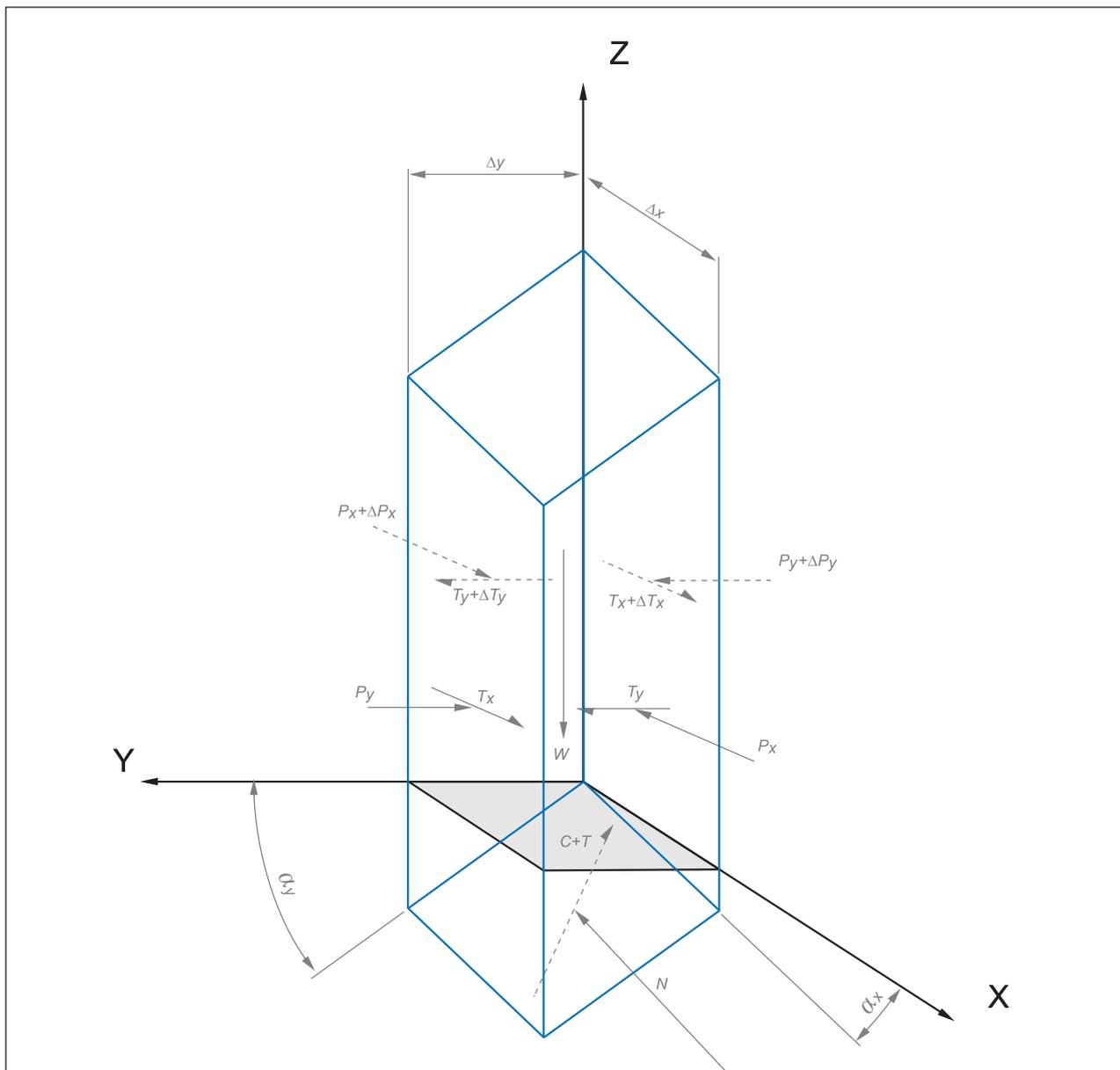


Рис. 7. Общая схема сил, действующих на единичную колонну в трехмерной постановке: Δx — размер единичной колонны вдоль оси X; Δy — размер единичной колонны вдоль оси Y; α_{xz}, α_{yz} — углы наклона поверхности скольжения в плоскостях XZ и YZ соответственно; W — вес единичной колонны; $P_x, (P_x + \Delta P_x), P_y, (P_y + \Delta P_y)$ — нормальная составляющая сил взаимодействия единичной колонны с соседними колоннами по боковым поверхностям вдоль оси X и Y соответственно; $T_x, (T_x + \Delta T_x), T_y, (T_y + \Delta T_y)$ — касательная составляющая сил взаимодействия единичной колонны с соседними колоннами по боковым поверхностям вдоль оси X и Y соответственно; C — сила сцепления по поверхности скольжения; T — сила трения по поверхности скольжения; N — сила реакции опоры от воздействия колонны на поверхность скольжения

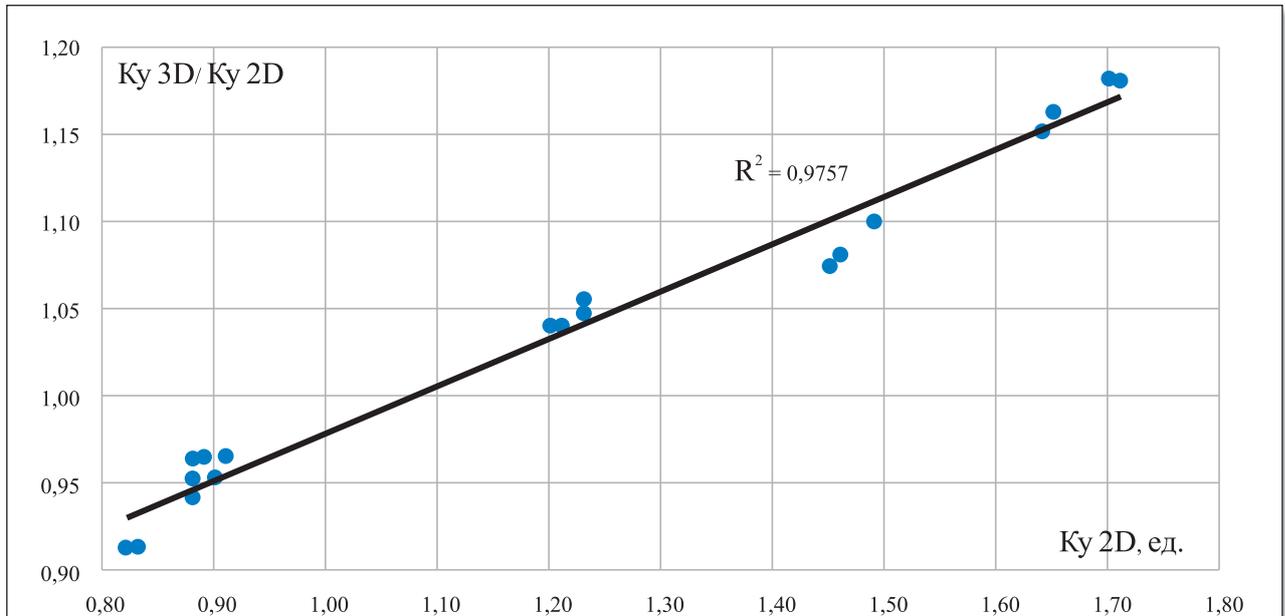


Рис. 8. Отношение коэффициентов устойчивости, рассчитанных трехмерным методом Ховланда (K_y , 3D) и двумерным методом Терцаги (K_y , 2D), в зависимости от величины K_y , 2D. R^2 — коэффициент детерминации

таких случаях выбор метода расчета (двумерного или трехмерного) может иметь решающее значение. И при низких значениях прочностных свойств «по поверхности скольжения» целесообразно применять именно трехмерный расчет устойчивости склона, т.к. он дает меньшие коэффициенты устойчивости и учитывает геометрию всего оползневого склона. Подобная закономерность может быть объяснена следующим образом: при двумерном расчете в плоскости, которая па-

раллельна оси движения оползневого тела, не учитывается изменение геометрии в перпендикулярном направлении («вдоль простирания склона»), в результате чего не учитывается трение по периферической части оползневого тела. К тому же в его боковых частях площадь поверхности скольжения, приходящаяся на одну колонну, возрастает с приближением к краю, в то время как масса колонны снижается. При низких значениях показателей прочностных свойств трение, по-видимому, становится менее заметным и возрастает роль сдвигающих сил.

Так как оползневое тело в настоящее время находится в устойчивом состоянии, на основе произведенных расчетов можно сделать вывод, что показатели прочностных свойств грунтов «по поверхности скольжения» близки к таковым для суглинка из зоны скольжения в естественном состоянии (удельное сцепление 30 кПа, угол внутреннего трения 19°). Но в периоды активного снеготаяния и выпадения большого количества дождевых осадков, когда наблюдаются признаки оползневых подвижек, для оценки устойчивости стоит применять прочностные параметры, характеризующие суглинка из зоны скольжения при испытании по подготовленной поверхности (удельное сцепление 5 кПа, угол внутреннего трения 16°).

Хотя коэффициент устойчивости и является количественной характеристикой, наиболее информативными будут данные о дефицитах устойчивости оползневого тела. Если для типичного двумерного расчета дефицит устойчивости меняется только в одном направлении (по падению склона), то на основе трехмерного моделирования предоставляется возможность построения карт и схем распределения дефицита устойчивости в плане. Такие данные, по мнению автора, являются более информативными с практической точки зрения — для проектирования защитных сооружений.

Для изучаемого оползневого участка были рассчитаны и представлены в виде изолиний дефицита устойчивости, выраженные в сотнях ньютонов, для

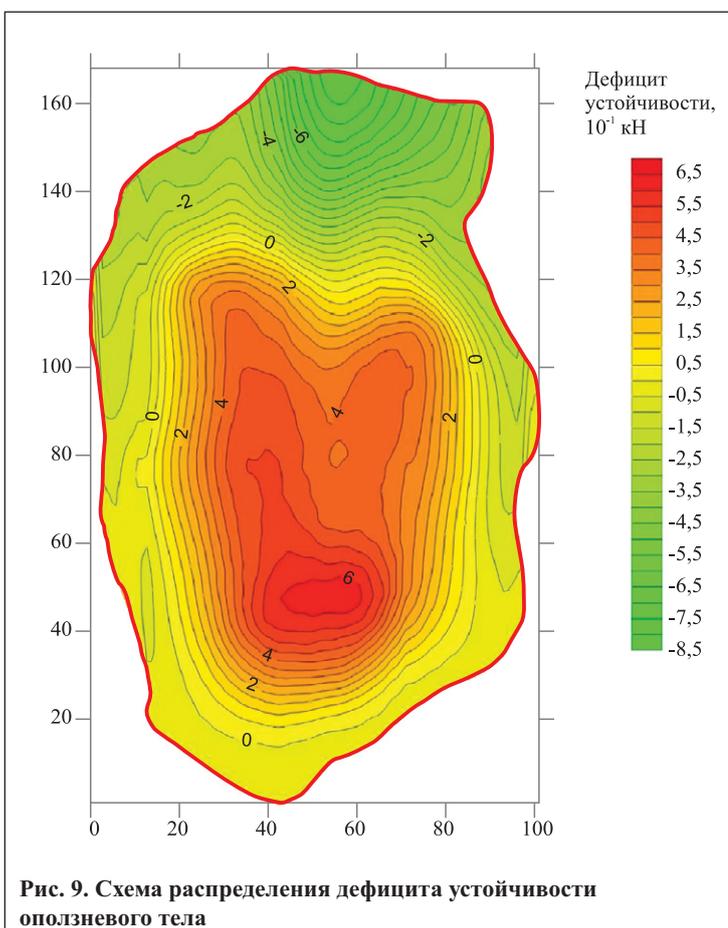


Рис. 9. Схема распределения дефицита устойчивости оползневого тела



каждой колонны (при плотности $2,21 \text{ г/см}^3$, сцеплении $29,8 \text{ кПа}$ и угле внутреннего трения 19°) (рис. 9). Как видно из рис. 9, максимальные дефициты наблюдаются в средней части склона и составляют $0,5 \text{ кН}$, а минимальные — в нижней части (минус $0,8 \text{ кН}$). При отдалении от центральной части они довольно быстро снижаются во всех направлениях (как вниз, так и вверх по склону, а также в сторону боковых частей оползневого тела). Отрицательные дефициты устойчивости говорят о том, что блок, находящийся в данной точке, обладает запасом устойчивости, а оползневое тело с отрицательным дефицитом во фронтальной части является устойчивым.

Любопытно, что в верхней части оползневого тела наблюдается область с незначительным, но все-таки имеющимся запасом устойчивости. Такой результат объясняется наличием сцепления по поверхности скольжения. По мере приближения к границе оползневого тела мощность оползневых отложений уменьшается, а следовательно, уменьшается и сдвигающая составляющая, зависящая от веса расчетного блока. В то же время площадь поверхности скольжения, приходящаяся на расчетный блок, увеличивается вследствие роста угла наклона поверхности скольжения при неизменном размере блока в плане ($1 \times 1 \text{ м}$). А в результате увеличения площади поверхности скольжения растет и сила сцепления расчетного блока. В краевых частях оползневого тела, даже в его головной части, сила сцепления оказывается больше, чем сумма всех сдвигающих сил, что и приводит к небольшому запасу устойчивости в краевых областях.

Стоит заметить также, что в распределении дефицитов устойчивости наблюдается асимметрия, которая обусловлена геометрией оползневого тела. Такое распределение должно учитываться при разработке противооползневых мероприятий в будущем.

Заключение

Трехмерное моделирование склонов в совокупности с новыми методиками расчета коэффициента устойчивости и оползневого давления дает результаты, которые ближе к реальности, чем данные, полученные традиционными двумерными методами, т.к. учитывает геометрию всего склона и всей поверхности скольжения, а не только области вдоль расчетного профиля.

Трехмерные методы расчета, а также схемы распределения дефицитов устойчивости являются более информативными и полезными с точки зрения прогноза и проектирования защитных сооружений.

Исследованное оползневое тело для принятых в расчете показателей свойств грунтов является устойчивым. Устойчивое состояние подтверждается как рассчитанным коэффициентом устойчивости, так и распределением дефицита устойчивости. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во МГУ, 2006. 256 с.
2. Hovland H.J. Three-dimensional slope stability analysis method // Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1977. V. 103. № 9. P. 971–986.

ГЕОТЕХНИКА

Международный журнал для изыскателей,
проектировщиков и строителей

Цель журнала — знакомство российских специалистов
с передовым отечественным и зарубежным опытом
в области геотехники



Периодичность в 2014 году:
6 номеров

Стоимость годовой подписки:
3900 рублей
info@geomark.ru